

DOMOS DESPLEGABLES

MÉTODO GEOMÉTRICO A PARTIR DE POLÍGONOS REGULARES

Natalia Paola Torres Londoño

Tesis doctoral dirigida por:
Dr. Ramon Sastre Sastre
Tutor: Xavier Gimferrer Vilaplana

Universitat Politècnica de Catalunya
Doctorado en Tecnología de la Arquitectura, de la Edificación y del Urbanismo
Departamento de Tecnología de la Arquitectura
Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés
Barcelona, 2021



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH**



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

DOMOS DESPLEGABLES

MÉTODO GEOMÉTRICO A PARTIR DE POLÍGONOS REGULARES

Natalia Paola Torres Londoño

Tesis doctoral dirigida por:
Dr. Xavier Gimferrer
Dr. Ramon Sastre Sastre

Universidad Politécnica de Catalunya

Doctorado en Tecnología de la Arquitectura, de la Edificación y del Urbanismo
Departamento de Tecnología de la Arquitectura
Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés
Barcelona, 2021

Resumen

Esta investigación propone un método de diseño para domos desplegables a partir del sistema tipo tijera, partiendo de la base geometría de polígonos regulares para su configuración.

La geometría de los polígonos regulares inscritos en una circunferencia, permite determinar la forma general de un arco en el estado final del despliegue, definiendo la cantidad de barras necesarias, el posicionamiento de los agujeros, las distancias de los puntos de articulación, la longitud de la barra y el ángulo necesario de apertura para obtener una geometría de específica.

Tomando el arco como el principal componente estructural para la configuración de domos, el método propuesto permite implementar el diseño correlacionado con plataformas de suelo plegables y cubiertas textiles desplegables para lograr un despliegue simultáneo entre estructura y cerramientos.

El estudio desarrolla como parte de la viabilidad constructiva, un proceso de montaje basado en el sistema tradicional para erigir arcos y domos, es decir, a través de la aproximación progresiva de semiarcos desde el suelo, los cuales se encontraran en un punto medio, a una altura específica, de esta forma se pretende aprovechar la ventaja de las estructuras desplegables para elevar los arcos, optimizando los tiempos de montaje y facilitando el método de ejecución en estructuras desplegables. La viabilidad y demostración del método, se comprueba a través de la construcción de varios prototipos a escala desarrollados durante la investigación que exponen su validez constructiva, arquitectónica y estructural.

Finalmente el objetivo es proponer nuevas alternativas espaciales de domos desplegables, a través de una tabla interactiva que permite al usuario explorar diferentes geometrías de arcos formados con el sistema tipo tijera y aplicados a un recinto con requerimientos específicos de altura, radio o longitud de barras.

Abstract

This research proposes a design method for deployable domes from the scissor-type system, starting from the geometry of regular polygons for its configuration.

The geometry of the regular polygons inscribed in a circumference, allows to determine the general shape of an arch in the final state of the deployment, defining the number of necessary bars, the positioning of the holes, the distances of the points of articulation, the length of the bar and the necessary opening angle to obtain a specific geometry.

Taking the arch as the main structural component for the configuration of domes, the proposed method allows to implement the correlated design with folding floor platforms and folding textile covers to achieve a simultaneous deployment between structure and enclosures.

The study develops as part of the constructive viability, an assembly process based on the traditional system to erect arches and domes, that is, through the progressive semi-arches approximation from the floor, to midpoint, at a specific height, in this way, the advantage of deployable structures is used to raise the arches, optimizing assembly times and facilitating the execution method in deployable structures. The method viability and demonstration is verified through the construction of several scale prototypes developed during the investigation that expose the validity constructive, architectural and structural

Finally, the objective is to propose new spatial alternatives for deployable domes, through an interactive table that allows the user to explore different geometries of arches formed with the scissor-type system and applied to an enclosure with specific requirements for height, radius or length of bars.

العلم ان لم ينفكك لم يضرك

Agradecimientos

A todos aquellos que por sus aportes, consejos, recomendaciones, críticas constructivas, generosidad y apoyo brindado hicieron que esta investigación fuera posible.

A Dios, a mis padres y a mi esposo

Gracias.

Uno nunca ve lo que esta hecho, sino que ve lo que queda por hacer.

Marie Curie

CONTENIDO

PRIMERA PARTE - CONTEXTUALIZACIÓN

Introducción	18
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO	23
1.1 Formulación del problema	24
1.2 Delimitación	34
1.3 Justificación	37
1.4 Objetivos	38
1.4.1 Objetivos generales	38
1.4.2 Objetivos específicos	38
1.5 Metodología	39
1.6 Génesis de la investigación	44
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE	47
2.1 Antecedentes	50
2.1.1 Primeras aplicaciones	50
2.1.2 La naturaleza como inspirador - Biomímesis	52
2.1.3 Definición de estructura desplegable	53
2.2 Sistema tipo tijera	55
2.2.1 Principales diseñadores	55
2.2.2 Grupos de investigación	65
2.2.3 Aplicaciones comerciales	68
2.2.3.1 Refugios militares y albergues	68
2.2.3.2 Pop up	72
2.2.3.3 Plataformas de elevación tipo tijera	73

2.3 Cerramientos para las estructuras desplegadas del tipo tijera	75
2.3.1 Paneles rígidos-Origami	75
2.3.1.1 Principales investigadores técnica origami	75
2.3.1.2 Aplicaciones	82
2.3.2 Cubiertas textiles desplegadas	89
2.3.2.1 Primeras aplicaciones	89
2.3.2.2 Principales diseñadores	91
2.3.2.3 Otras aplicaciones	100
2.4 Conclusiones	104
CAPÍTULO 3. SISTEMA TIPO TIJERA Y TIPOS DE DESPLIEGUE	115
3.1 Sistema tipo tijera y clasificación	118
3.1.1 Tijeras anguladas	121
3.1.2 Tijeras rectas	122
3.1.2.1 Tijeras con articulación central	122
3.1.2.2 Tijeras con articulación excéntrica	123
3.2 Tipos de despliegue con tijeras rectas	125
3.2.1 Despliegue lineal	127
3.2.1.1 Tijeras rectas con articulación central. Agrupación plana	127
3.2.1.2 Tijeras rectas con articulación excéntrica. Agrupación plana	128
3.2.1.3 Tijeras rectas con articulación excéntrica. Agrupación plana. Despliegue inclinado	129
3.2.1.4 Agrupación de tijeras que no genera el pliegue total	130
3.2.1.5 Redes Desplegadas a partir de planos	131
3.2.1.6 Agrupaciones tridimensionales	132
a. Red Cuadrangular	134
b. Red Triangular	138

3.2.2 Despliegue con curvatura	141
3.2.2.1 Superficie clásica con simple curvatura	144
a. Red Cuadrangular	144
b. Red Triangular	147
3.2.2.3 Superficie anticlástica	150
a. Red Cuadrangular	150
b. Red Triangular	154
3.2.2.4 Superficie sinclástica	155
a. Red Cuadrangular	155
b. Red Triangular	159
c. Geometría a partir de la configuración de bóvedas	180
3.3 Conclusiones	185
CAPÍTULO 4. MÉTODOS EXISTENTES PARA CONFIGURAR ARCOS Y SUPERFICIES DESPLEGABLES...	191
4.1 Método Emilio Pérez Piñero.....	194
4.2 Método Félix Escrig	196
4.3 Método Gantes	200
4.4 Método Sánchez Cuenca.....	201
4.5 Método Temmerman	203
4.6 Método Negar Kalantar	206
4.7 Método Babaei	208
4.8 Conclusiones.....	209

SEGUNDA PARTE - EXPERIMENTACIÓN

CAPÍTULO 5. MÉTODO A PARTIR DE POLÍGONOS REGULARES PARA CONFIGURAR ARCOS

DESPLEGABLES	213
5.1 Análisis sobre la posición de la articulación central	216
5.2 Método geométrico a partir de polígonos regulares	219
5.2.1 Polígonos estrellados	219
5.2.2 Descripción del método geométrico a partir de polígonos regulares	220
5.3 Análisis etapas de despliegue polígonos seleccionados	225
5.4 Geometrías resultantes método propuesto	231
5.4.1 Configuración arcos desplegados	231
5.4.2 Configuración de bóvedas. desplegadas	235
5.5 Cálculo longitud de barra y posicionamiento de articulación excéntrica	241
5.5.1 Cálculo de la barra a partir de la longitud requerida	244
5.5.2 Cálculo de la barra a partir del diámetro requerido.....	246
5.5.3 Cálculo altura libre, flecha y canto	249
5.6 Conclusiones	251

CAPÍTULO 6. ARCOS DESPLEGABLES.....255

6.1 Geometría seleccionada para la proyección de domos desplegadas.....	258
6.2 Sistema de montaje	260
6.3 Análisis 2d de semiarcos en WinEva (v. 8)	266
6.3.1 Dimensionamiento y características del semiarco	266
6.3.2 Discretización e introducción de datos para WinEva (v. 8)	269
6.3.3 Generalidades para el análisis	272

6.4 Análisis etapas de despliegue	275
6.4.1 Posición plegada	276
6.4.2. Posición intermedia	278
6.4.3 Posición desplegada	286
6.4.4 Posición ideal de despliegue	294
6.5 Conclusiones	304
CAPÍTULO 7. NODO PRINCIPAL	313
7.1 Definición nodo principal	316
7.2 Principales referentes de nodos	317
7.2.1 Sistema Mero	318
7.2.2 Sistema Triodetic	319
7.2.3 Nodos para domos geodésicos	320
7.3 Diseño de nodos para nodos desplegables	323
7.3.1 Propuesta de nodo. Impresión 3D	325
7.3.2 Propuesta de nodos prototipos construidos	339
7.4 Conclusiones	346
CAPÍTULO 8. PLATAFORMA PLEGABLE	351
8.1 Tijeras de la plataforma plegable	354
8.2 Soportes semiarcos	356
8.3 Despliegue con curvatura constante	360
8.3.1 Desarticulación tramos cortos entre tijeras adyacentes	362
8.3.2 Desarticulación tramos largos entre tijeras adyacentes	364
8.3.3 Desarticulación central en módulos de tijeras.....	366

8.4 Geometría plegadura.	368
8.4.1 Estudio del movimiento	369
8.5 Plataforma plegable. Detalles	379
8.6 Modelo físico	382
8.7 Conclusiones	388
CAPÍTULO 9. CUBIERTA DESPLEGABLE	393
9.1 Alternativas de cubierta	396
9.2 Discretización e introducción de datos en Wintess3	398
9.2.1 Búsqueda de la forma	398
9.2.2 Patronaje	402
9.2.3 Definición de materiales, determinantes y valores para el cálculo.....	406
9.3 Cálculo estructural	410
9.3.1 Cubierta interior	410
9.3.2 Cubierta exterior	414
9.3.3 Cubierta seccionada.....	417
9.4 Detalles y conexiones	421
9.4.1 Sujeción cubierta interior	422
9.4.2 Sujeción cubierta exterior.....	426
9.4.3 Sujeción cubierta seccionada	428
9.4 Conclusiones	431

TERCERA PARTE - RESULTADOS Y CONCLUSIONES

CAPÍTULO 10. TABLA INTERACTIVA. CONSTRUCCIÓN DE PROTOTIPOS	441
10.1 Tabla interactiva	444
10.2 Normativa.....	446
10.3 Escenario desplegable	451
10.3.1 Concepto	451
10.3.2 Búsqueda de la forma	452
10.3.3 Componentes estructurales.....	454
10.3.4 Materiales y cantidades.....	456
10.3.5 Dimensiones	458
10.3.6 Montaje y proceso de despliegue.....	460
10.3.7 Desmontaje y proceso d pliegue.....	462
10.3.8 Fabricación e implementación	464
10.3.9 Uso y durabilidad	468
10.4 Stand Egg	470
10.3.1 Concepto	470
10.3.2 Búsqueda de la forma	471
10.3.3 Componentes estructurales.....	475
10.3.4 Materiales y cantidades.....	477
10.3.5 Dimensiones	478
10.3.6 Montaje y proceso de despliegue.....	480
10.3.7 Fabricación e implementación	484
10.3.8 Uso y durabilidad	488

10.5 Domo bambú	490
10.5.1 Concepto	490
10.5.2 Búsqueda de la forma - Modelo físico en madera	491
10.5.3 Componentes estructurales.....	494
10.5.4 Materiales y cantidades.....	497
10.5.5 Dimensiones	498
10.5.6 Proceso de despliegue.....	500
10.5.7 Fabricación e implementación	502
10.5.8 Búsqueda de la forma - Modelo físico en bambú.....	505
10.5.9 Conexiones para las barras de bambú. Impresión 3D.....	508
10.5.10 Soporte plataforma plegables 3D.....	512
10.5.11 Dimensiones	514
10.5.12 Proceso de despliegue.....	516
10.5.13 Fabricación e implementación	519
10.5.14 Uso y durabilidad	528
CAPÍTULO 11. CONCLUSIONES GENERALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	531
11.1 Conclusiones	532
11.2 Futuras líneas de investigación	551
11.3 Conclusions.....	556
11.4 Future research lines	574
BIBLIOGRAFÍA	579
ANEXOS	594



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

DOMOS DESPLEGABLES

MÉTODO GEOMÉTRICO A PARTIR DE POLÍGONOS REGULARES

Natalia Paola Torres Londoño

Tesis doctoral dirigida por:

Dr. Ramon Sastre Sastre

Tutor: Xavier Gimferrer Vilaplana

PRIMERA PARTE. CONTEXTUALIZACIÓN

Universidad Politécnica de Catalunya
Doctorado en Tecnología de la Arquitectura, de la Edificación y del Urbanismo
Departamento de Tecnología de la Arquitectura
Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés
Barcelona, 2021

Introducción

Esta investigación surge como continuidad al estudio previo realizado a nivel de master, en el programa de Maestría de Construcción de la Universidad Nacional de Colombia, titulado TDES. Teatro Desplegable. Propuesta de un escenario con estructuras dinámicas [88].

El gran interés sobre estas tipologías de estructuras se fundamenta en la búsqueda de la forma para obtener un movimiento acertado de sus componentes y lograr diferentes configuraciones espaciales estructuralmente estables, principalmente configurar una posición plegada para su transporte o almacenamiento y una posición desplegada para su uso arquitectónico.

Este concepto es retomado de las primeras construcciones portátiles en poblaciones nómadas, como la yurta, el tipi y la haima. Sus características constructivas permiten retomar los conceptos básicos de diseño para las estructuras desplegables: sencillez, ligereza, modulación y utilización de los recursos mínimos necesarios, con el objetivo de crear espacios habitables que puedan transformarse, implementando procesos eficaces de ensamble, montaje y desmontaje de los elementos constructivos.

Su evolución técnica destaca en la modernidad con las propuestas de los principales pioneros en este tipo de estructuras: Emilio Pérez Piñero [71], R. Buckminster Fuller [25], Feliz Escrig [23], [24], [25] y [26], Gantes [30], Carlos Hernández [36]. Ellos desarrollaron grandes avances en propuestas espaciales con el sistema tipo tijera: barras articuladas con un pivote central que permite el giro de un elemento con respecto a otro sin que puedan separarse [13].

El encadenamiento de módulos tijera genera una variedad de configuraciones geométricas de redes desplegables planas o tridimensionales y con mayor interés para esta investigación, aquellas que generan estructuras con curvaturas, referidas a arcos, bóvedas o cúpulas a partir de la agrupación de módulos tijera con barras rectas. Básicamente los métodos más comunes para la búsqueda de la forma, para hallar estas superficies se basan en la proyección de cuadrículas sobre superficies y geodésicas, y otros métodos más complejos que se estudian más adelante.

La presente investigación propone un método geométrico para configurar domos desplegables a partir de la geometría de polígonos regulares, un método que permite configurar arcos desplegables, definiendo la longitud de las barras rectas, posición de la articulación central y cantidad de elementos según un diámetro, radio o longitud de barra requerida.

Esta exploración geométrica pretende llegar a la práctica real y demostrar su viabilidad constructiva a través de la construcción domos desplegables que incorporen un despliegue simultáneo de la estructura, la cubierta y la plataforma de suelo definidas gracias a la geometría base utilizada.

Para llegar a este objetivo, la investigación esta dividida en tres partes fundamentales con sus respectivos capítulos:

Primera parte: Contextualización

Segunda parte: Experimentación y análisis

Tercera parte: Demostración, resultados y conclusiones

La primera parte describe el planteamiento del estudio, enmarcando el tema en la aplicación de estructuras desplegables para usos temporales, seguido de la justificación, los objetivos, metodología y descripción de la investigación a nivel master que antecede este estudio.

A continuación se expone los principales antecedentes teóricos de las estructuras desplegables utilizados en la industria y en la arquitectura, junto con el estudio de los principales diseñadores e investigaciones recientes relacionados con el tema de la plegabilidad estructural y que aportan al presente estudio.

El capítulo tres describe los conceptos generales de sistema de barras articuladas definido a partir de ahora como **Sistema Tipo Tijera, STT**.

Este capítulo desarrolla la definición, características y clasificación del STT a partir de la geometría de sus componentes y el tipo de despliegue, dando a conocer a través de maquetas y tablas descriptivas, las diferentes posibilidades espaciales que se pueden obtener al combinar diferentes agrupaciones con este sistema y que aún genera un amplio camino por explorar.

El capítulo cuatro expone los principales referentes de aquellos investigadores que han utilizado métodos geométricos para configurar arcos, bóvedas, domos o superficies con curvatura, aplicado a las estructuras desplegadas conformadas con el STT.

La segunda parte de la investigación, inicia con el capítulo cinco que define y describe paso a paso la metodología propia del autor para la configuración de superficies desplegadas a partir de la geometría de polígonos regulares.

Desde este punto, los siguientes capítulos de la investigación se relacionan con los principales componentes estructurales que conforman un domo desplegado (figura 1.0).

- Capítulo 6: Arcos plegables
- Capítulo 7: Nodo Principal
- Capítulo 8: Plataforma plegable.
- Capítulo 9: Cubierta desplegada

En cada uno de estos componentes, se realiza un estudio geométrico, estructural y mecánico basado en los referentes existentes, que permiten reflexionar sobre las alternativas más viables para su construcción. Para la comprobación de estos estudios se utilizaron herramientas digitales (software) como WinEva© [136], WinTess© [137], Solidworks® [135], Grasshopper® [132] y la realización de modelos a escala, de gran importancia durante el proceso investigativo, los cuales facilitan la observación del movimiento de plegado, establecen la factibilidad constructiva del proyecto y permiten evidenciar las posibles debilidades en el diseño.

La tercera parte refiere a los resultados de todo el análisis geométrico, recopilación gráfica y la experiencia con la fabricación de modelos a escala, generando como aportación el diseño y configuración de una tabla interactiva para estructuras desplegadas, que al proporcionar valores específicos que requiera un diseño determinado, funciona como una herramienta informática en Excel, que optimiza los procesos de búsqueda de la forma, exponiendo una variedad de geometrías de superficies desplegadas posibles, con dimensiones, cantidades y características de la forma definidas.

Finalmente, la aplicación, demostración y validación del método geométrico propuesto, se realiza a través de la construcción de prototipos a escala desarrollados para esta investigación, formulados a través de la tabla interactiva y realizados durante estancias de investigación en la Escuela de Arquitectura, Arte y Diseño del Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, México; y en la Pontificia Universidad Católica de Minas Gerais de Belo Horizonte, Brasil.

La investigación cuenta con el apoyo técnico y suministro de material de entidades como el Ateneu de Fabricació Ciutat Meridiana, Bambusa estudio, Laboratorio de fabricación digital Universidad de Bath y la Escuela sede para el desarrollo de esta investigación, La Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallès. ETSAV.

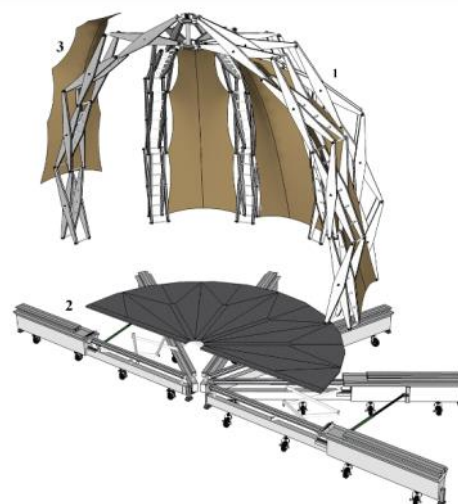
Además, se enfatiza en la importancia de la realización de prototipos, que permiten describir la experiencia en la fabricación, ensamble, montaje y procesos de despliegue en aplicaciones construidas, fundamentando el diseño en el desarrollo de las soluciones técnicas para los diferentes componentes estructurales, en el planteamiento de mecanismos y conexiones realizadas con una tecnología de bajo costo, idóneas para las estructuras desplegables.

Con el propósito de observar el proceso de despliegue de los sistemas estructurales proyectados en una aplicación real y analizar la factibilidad constructiva del diseño planteado, centrando la atención en el resultado de la metodología, en los procesos de fabricación, transporte y procesos de ensamble de las piezas.

La investigación concluye con las observaciones, reflexiones, conclusiones y resultados analizados, que sustentan el diseño y la aplicación de domos desplegables a partir de una metodología de diseño geométrico específica, ofreciendo al lector una aportación académica y práctica para futuras investigaciones o la posibilidad de implementar el método propuesto a nuevas aplicaciones arquitectónicas a partir del sistema tipo tijera.

Figura 1.0 Componentes estructurales planteados para un domo desplegable

1. Arcos plegables
 2. Plataforma plegable
 3. Cubierta plegable.
- Fuente: Elaboración del autor





1

CAPÍTULO

Planteamiento

El presente capítulo describe el génesis de esta investigación, proporcionando al lector la descripción del tema específico a tratar basado en las estructuras desplegables aplicadas en espacios arquitectónicos de mediana y pequeña escala. El desarrollo del capítulo expone la situación actual de las estructuras utilizadas para eventos temporales y del mercado industrial basado en estructuras desplegables, analizando sus ventajas y desventajas en el diseño.

Se plantea de esta forma, la formulación de una hipótesis que propone la viabilidad de un método de diseño para domos desplegables que promueva la aplicación de este tipo de estructuras, generando nuevas posibilidades de diseño diferentes a las que se encuentran en el mercado. Las razones y propósitos de esta investigación se explican en los apartados de justificación y objetivos, junto con la metodología desarrollada para llevar a cabo el presente estudio.

Contenido capítulo

1.1 Formulación del problema	24
1.2 Delimitación	34
1.3 Justificación	37
1.4 Objetivos	38
1.4.1 Objetivos generales	38
1.4.2 Objetivos específicos	38
1.5 Metodología	39
1.6 Génesis Investigación	44



Figura 1.1 Montaje de escenario en el Estadio Olímpico de Sevilla. Fuente <https://sevilla.abc.es/fotos-musica/20120509/montaje-escenario-para-concierto-98335.html> [Recuperada 12/06/2012]



Figura 1.2 Montaje de escenario. Festival de la Mercè. Barcelona Fuente: Fotografía del autor



Figura 1.3 Carpa plegable Fuente: <http://www.qualitytent.es/> Recuperado [02/03/2012].

1.1 Formulación del problema

La imagen de la arquitectura que comúnmente vemos, es por lo general una imagen basada en estructuras rígidas y estáticas que no contemplan la transformación del espacio para lograr fines adaptativos o beneficios constructivos como la facilidad en el montaje, modulación de los elementos y la capacidad de ser portable.

Con el objetivo de promover la aplicación de arquitectura transformable, el desarrollo de esta tesis plantea la continuidad investigativa a nivel estructural y constructivo de domos que contemplen las estructuras desplegables como una alternativa de diseño que facilite el montaje, el transporte y la adaptabilidad de su diseño a diferentes usos temporales como escenarios, stand o pabellones de exposición.

Los escenarios convencionales son generalmente tarimas limitadas al ensamble de varios elementos, que requieren de días para su instalación total y que en muchas ocasiones se convierte en una estructura permanente, debido a lo dispendioso del desmontaje. Además pueden incrementar los gastos debido al uso de maquinaria adicional como grúas o plataformas de elevación, que requieren de un personal especializado (figura 1.1 y 1.2).

Las carpas plegables, comercialmente utilizadas a pequeña escala, como en puestos de feria, mercadillos, stands o puntos de información, son un claro ejemplo de la aplicación de estructuras desplegables para uso temporal, su diseño incorpora una cubierta en lona que se despliega simultáneamente con una estructura basada en el sistema tipo tijera, (barras de aluminio articuladas por medio de pasadores en el centro y extremo de las barras); con un diseño sencillo, modular, de rápido y fácil montaje, que genera una espacialidad ortogonal, sin mayor variabilidad espacial en su diseño (figura 1.3).

Son estructuras ligeras que no soportan grandes cargas ni condiciones meteorológicas adversas, y al ser sobrecargadas o realizar un proceso de despliegue inadecuado puede provocar que algunas barras se doblen e interfieran con el despliegue de la estructura.

Con espacialidades más interesantes, configurando superficies curvas como bóvedas de cañón o domos acoplables, se encuentran los refugios militares desplegables (figura 1.4, ver apartado 2.2.3), que implementan una alta tecnología en el uso de materiales de alta resistencia, mecanismos y soluciones de cubierta compatibles con la estructura.

Ambas tipologías ofrecen una gama de tamaños y opciones espaciales estandarizadas y definidas por el fabricante, donde el usuario debe ajustarse para elegir el diseño más conveniente a sus necesidades.

Los casos de éxito más conocidos como innovadoras propuestas de investigación y asombrosas aplicaciones de estructuras desplegables a gran escala realizadas por Piñero, Escrig o Hoberman contienen un complejo desarrollo geométrico para su concepción y definición de la forma (figura 1.5, 1.6 y 1.7), aunque la primera percepción de la composición geométrica de estas estructuras sea la repetición de elementos modulares, al momento de enfrentarse a la comprensión del proceso de diseño realizado por estos autores y demás investigadores que profundizaban sobre este tema, se debe realizar un arduo estudio para hallar y entender la geometría base que comprende cada diseño (figura 1.8) (Ver capítulo 4).

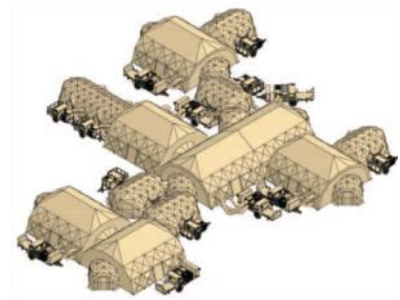


Figura 1.4 Refugios militares desplegables [108].

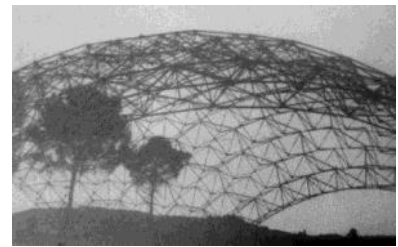


Figura 1.5 Cúpula Reticular desplegable para grandes luces. Emilio Pérez Piñero [13].

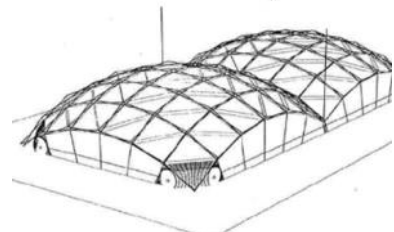


Figura 1.6 Cubierta desplegable de la piscina de San Pablo, Sevilla. [23].

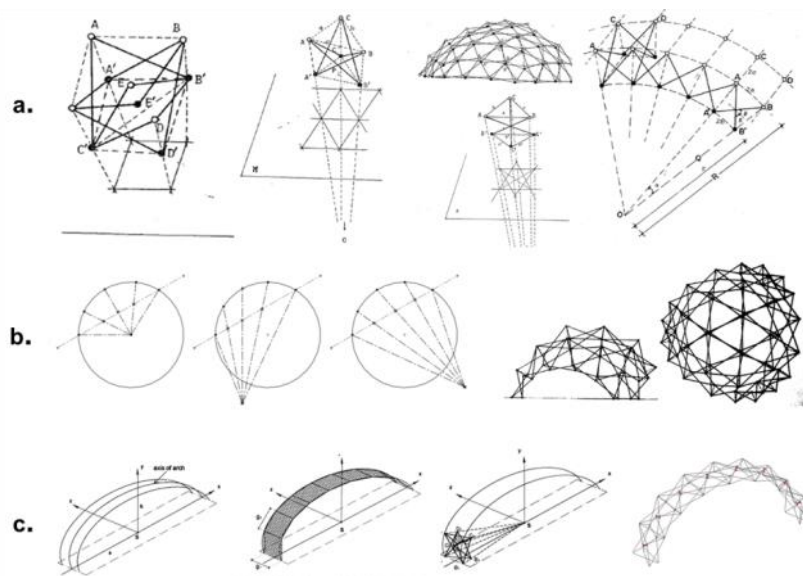


Figura 1.8 Métodos geométricos de diferentes autores para configurar estructuras desplegables con curvatura.

- Método E.P. Piñero [71].
- Método Félix Escrig [25].
- Método Charis J. Gantes [31]



Figura 1.7 Esfera expandible. Chuck Hoberman.

Fuente: <http://www.hoberman.com/>
Recuperado [10/10/2012].

Entre los principales cuestionamientos que presenta esta investigación es, cómo saber la longitud de la barra, la cantidad de barras necesarias y sobretodo, cómo determinar la posición de la articulación central entre barras, que define la curvatura de la estructura en su estado final de despliegue ante un diseño requerido.

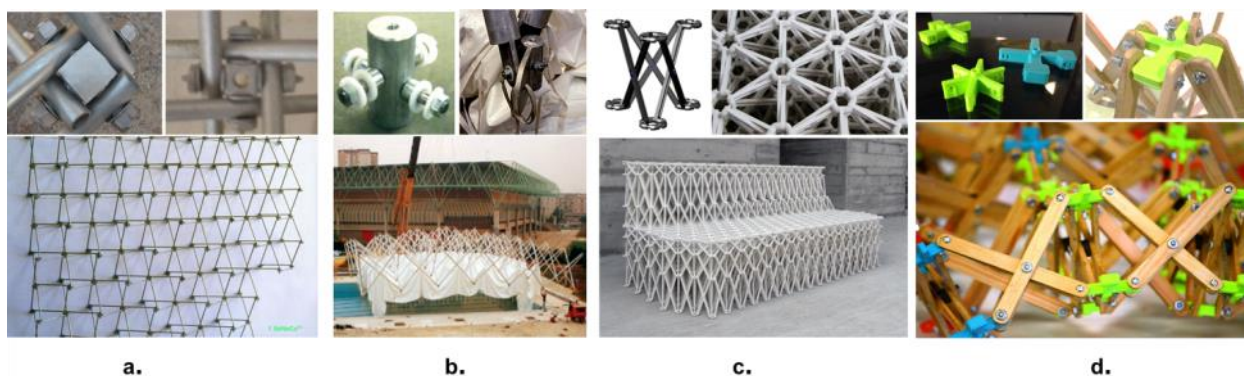
Si se toma en cuenta estos cuestionamientos como parámetros variables aplicados a una metodología de diseño, es posible lograr alternativas de estructuras desplegables que respondan a requerimientos específicos, como el área a cubrir, la altura máxima exigida o longitudes de barra determinadas.

Por otra parte, la mayoría de las propuestas desarrolladas con estructuras desplegables que forman superficies con curvatura, configuradas a partir del STT, son estructuras espaciales que requieren implementar soluciones técnicas especiales para evitar incompatibilidades en los procesos de despliegue (figura 1.9), lo que conlleva a proponer barras telescópicas, barras de diferente tamaños y nodos con un diseño específico que puedan responder a los diversos esfuerzos de compresión, tracción y torsión a los que son sometidos (figura 1.10)

Estos requerimientos técnicos, imprescindibles para el correcto funcionamiento de las estructuras desplegables con curvatura, dificulta su viabilidad, siendo de esta forma un proceso laborioso que requiere de mucha precisión. Si no existe un adecuado diseño milimétrico entre longitudes de barra, articulaciones, nodos y la geometría a desarrollar de la superficie desplegable, se pueden generar incompatibilidades en el proceso de despliegue, provocando que no se despliegue el conjunto, la rotura de barras o inestabilidad de la estructura.

Figura 1.10 Tipos de nodos desarrollados en estructuras desplegables. STT.

- a) Nodos estructuras E.P. Piñero.
<http://fseneca.es/secyt13/exposicion-virtual-de-d-emilio-perez-pinero/> Recuperado [15/02/2013].
- b) Nodos Félix Escrig [2].
- c) Nodo mobiliario desplegable Yuya Ushida.
Fuente: <http://www.designrefugee.org/> Recuperado [21/03/2013].
- d) Propuestas de nodos desarrolladas por el autor. SMiA. Structural Morphology in Architecture.
Fuente: Elaboración del autor



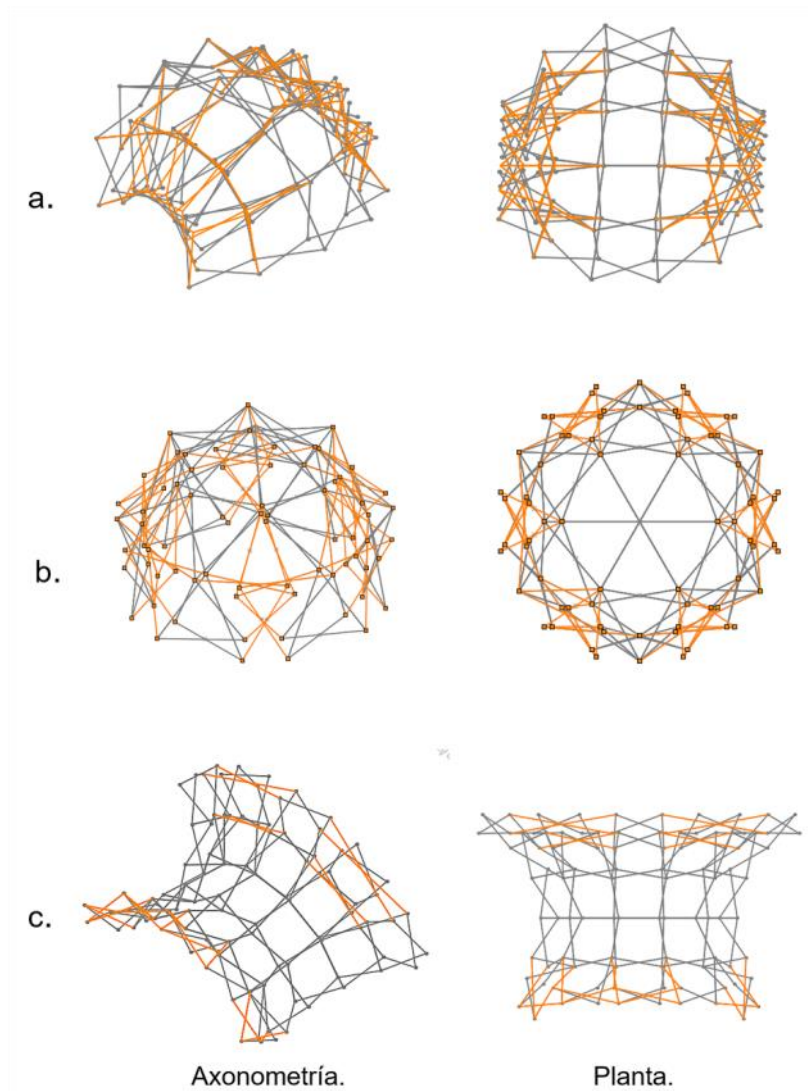


Figura 1.9 Posibles incompatibilidades durante el proceso de despliegue.
 a) Superficie sinclástica, red cuadrangular de tijeras. Cruce de barras en las etapas finales de despliegue.
 b) Superficie sinclástica, red triangular de tijeras, cruce de barras en las etapas finales de despliegue.
 c) Superficie anticlástica, extensión de las barras en etapas intermedias del despliegue.

Fuente: Elaboración del autor

Otro aspecto a tener en cuenta en el planteamiento de las estructuras desplegadas, es que al igual que en los procesos de construcciones tradicionales implica etapas como: el diseño, la fabricación, el ensamblaje, el montaje y en el caso de las estructuras desplegadas, es de gran importancia la etapa de desmontaje, transporte, almacenamiento y mantenimiento de las mismas. A diferencia de las estructuras tradicionales, al incorporar el proceso de pliegue y despliegue de la estructura, la etapa de montaje y de desmontaje es un punto clave para el desarrollo del proyecto, su correcta ejecución garantiza, la estabilidad y utilidad de la estructura así como la durabilidad de la misma, sin olvidar que una de las características principales de este tipo de estructuras, que promueve su aplicación, es lograr un sistema de montaje y desmontaje rápido, sencillo y con las garantías de seguridad necesarias.

Al analizar los procesos de despliegue de las estructuras espaciales conformadas con el STT y que configuran superficies con curvatura, centrando el estudio en aquellas que configuran geometrías tipo domo, bóvedas de cañón o similares; el proceso consiste en desplegar hacia el perímetro exterior la agrupación de tijeras y elevar la cúspide de la estructura hasta que se posicione la totalidad de la estructura en su estado final de despliegue. O colgar la estructura desde su centro y por la acción de la gravedad la estructura se despliega por peso propio (figura 1.11).

En casos cuando la estructura es muy grande y por efectos de transporte y manipulación, la estructura se divide en módulos, las dos opciones de montaje pueden ser: unir los módulos plegados y proceder al despliegue de la estructura total o desplegar los módulos independientemente y conectarlos entre ellos para configurar la estructura desplegada poco a poco.

Para finalizar el proceso de despliegue, en la mayoría de las aplicaciones desarrolladas, la estructura toma su forma definitiva de bóveda cuando las tijeras de los extremos se posicionan como dovelas basales en la geometría desplegada. La falta de un planteamiento de diseño sobre la relación de estas tijeras con el suelo puede afectar a la estabilidad de la estructura en su estado final de despliegue.

Durante el proceso de despliegue, es importante garantizar la seguridad en posiciones intermedias y lograr su estabilidad una vez llegue a su estado final de despliegue. Por lo que en las estructuras desplegables conformadas por elementos articulados, se deben implementar dispositivos tipo freno, tope o barras de bloqueo como mecanismos de restricción del movimiento, para que se mantenga en la posición deseada durante su utilización. Así mismo, disponer de anclajes al suelo para evitar el desplazamiento, desestabilización o el vuelco de la estructura una vez este en equilibrio.

Las consecuencias de no disponer de un sistema de bloqueo del movimiento o dispositivos de seguridad en el estado final de despliegue, puede generar el fallo de la estructura plegándose inesperadamente, provocando los empujes hacia afuera en la base y la caída de la estructura por completo.



Figura 1.11 Proceso de despliegue de dos estructuras que generan curvatura., configuradas con STT.

Estructura apoyada sobre el suelo.
Estructura colgada.

Fuente: Elaboración del autor

De esta forma, reiterando que la seguridad es un requisito indispensable para el planteamiento de todo tipo de estructuras, sobretodo cuando adicionalmente se debe restringir el movimiento de plegado. En las estructuras desplegadas, una vez sea válido el cálculo estructural, la seguridad radica principalmente en como esta apoyada, en la relación entre sus elementos y en el sistema de bloqueo para controlar el movimiento de despliegue. Sin olvidar contemplar elementos estructurales adicionales de soporte como cables, tensores o rigidizadores y la estructura de redundancia que garantice la seguridad de la estructura principal por si esta llega a fallar, todo esto sin afectar el diseño estético y funcional de la estructura (figura 1.12).

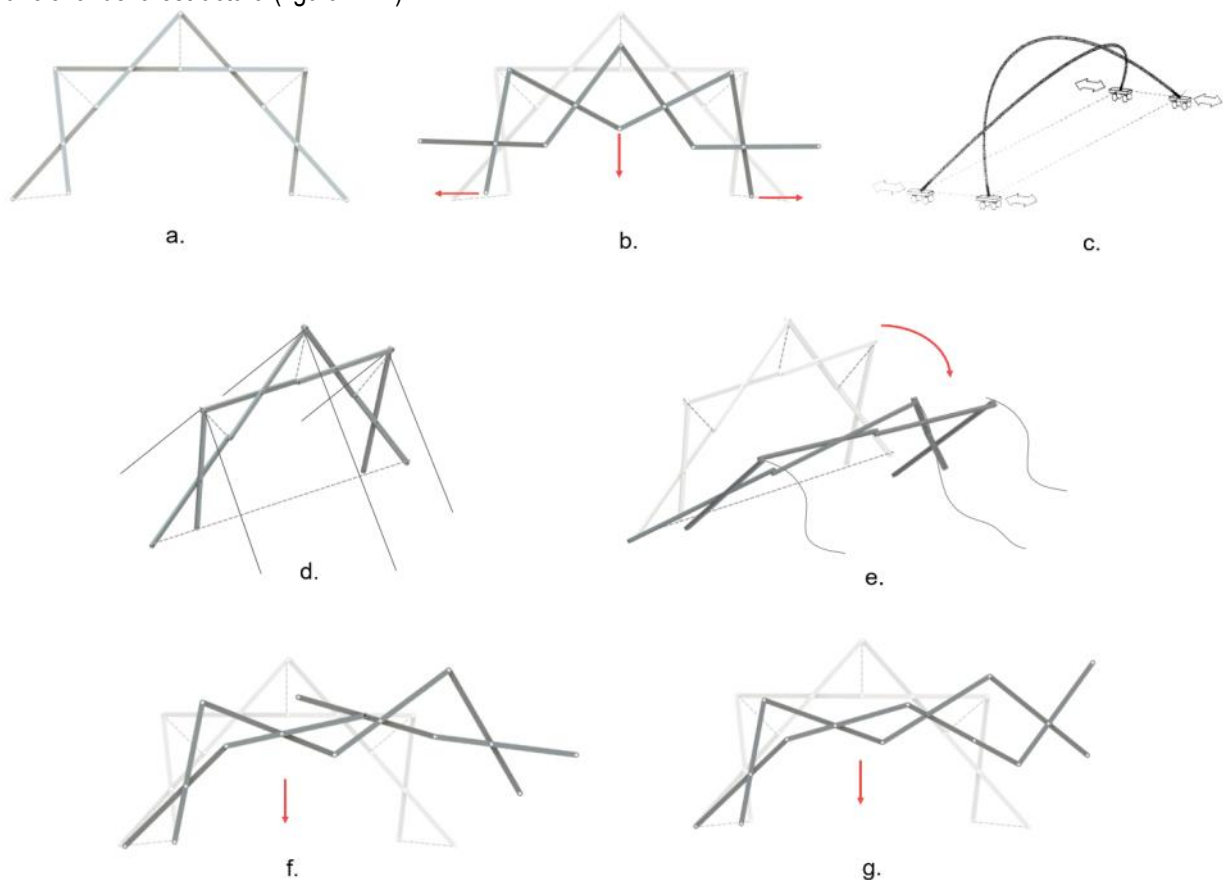


Figura 1.12 Arco desplegable conformado por el STT.

Posibles fallos en la estructura.

- Arco en posición final de despliegue con barras de bloqueo para frenar el movimiento de plegado.
 - Arco sin barras de bloqueo. El arco cae por peso propio y tiende a abrirse completamente.
 - Desplazamiento de las bases de arcos desplegados acoplados .
Propuesta para cubrir el Auditorio al aire libre en Jaén [25].
 - Elementos adicionales, cables, para estabilizar el arco en el otro sentido.
 - El fallo de los cables o elementos adicionales para soportar la estructura genera el vuelco del arco.
 - Colapso de la estructura por fallo de la conexión entre módulos de tijeras.
 - Colapso de la estructura por fallo entre la conexión entre las barras de la tijera.
- Fuente: Elaboración del autor

Las estructuras desplegables analizadas para este estudio son estructuras temporales, una vez ha terminado su tiempo de uso, se debe proceder al pliegue de forma ordenada y segura, tratando de buscar la mayor compactación para facilitar su transporte y almacenamiento.

Tomando como referente el esquema de la figura 1.11, el proceso de pliegue sería la secuencia reversible de las etapas de despliegue. Se desplazan hacia afuera las bases de la estructura y la cúspide empieza a caer (figura 1.13). Cuando toda la agrupación de tijeras esta en el suelo se procede al cierre de las tijeras para replegar la estructura completamente.

En los casos de grandes estructuras desplegables, es posible replegar la estructura por completo con el mismo proceso mencionado, pero el peso de la estructura puede generar fricción entre elementos, debido a la cantidad de los mismos y provocar que el sistema se bloquee o colapse, así que la opción de desconectar por secciones de módulos (subdividir la estructura) facilita el proceso de desmontaje para plegar individualmente cada módulo, generando una opción más viable y de menor riesgo.

Además se debe tener en cuenta que el área a utilizar durante estos procesos se aumenta por la extensión de las tijeras antes de posicionarse en su geometría final, un espacio limitado puede interferir en el proceso de despliegue y afectar la estructura.

La literatura existente y ejemplos construidos no enfatiza en el tema del desmontaje, el cual debe ser de importancia ya que la garantía de que la estructura desplegable pueda aprovecharse nuevamente radica tanto en el proceso de montaje como en un adecuado proceso de desmontaje.

En cuanto al uso de maquinaria adicional, según el tamaño y peso de la estructura se puede optar por un despliegue manual o mecánico apoyado por sistemas como polipastos, poleas, cables, motores, actuadores, cilindros hidráulicos y grúas. Es un factor importante a tener en cuenta en aplicaciones realizadas a mayor escala, las cuales implican una mayor complejidad mecánica en la etapa de montaje y desmontaje, debido al tamaño y peso de los elementos constructivos. Los sistemas mecánicos planteados que logran el proceso de plegado y despliegue de la estructura son de alto grado tecnológico que permiten su viabilidad pero incrementa su costo (figura 1.14).

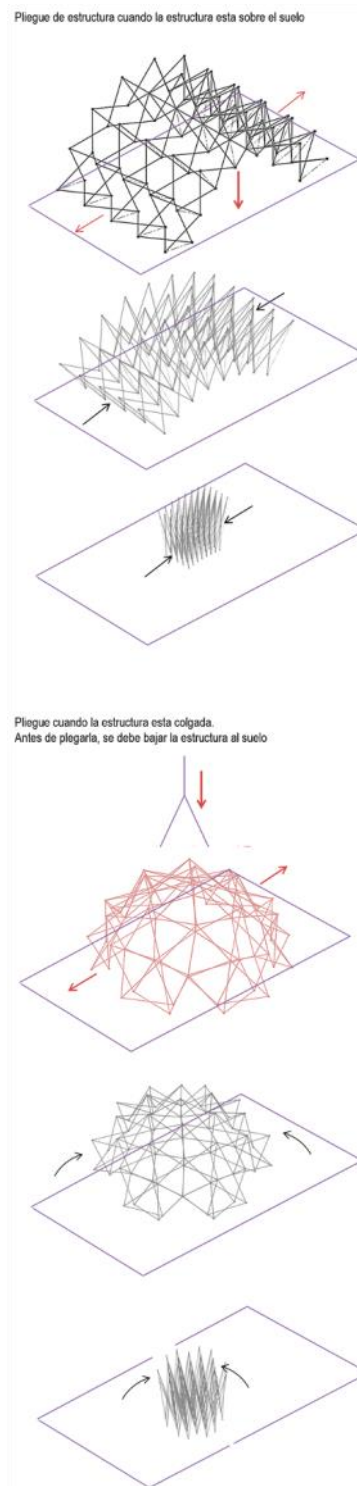


Figura 1.13 Proceso de pliegue superficie sinclástica . Red continua de módulos de tijeras.

Fuente: Elaboración del autor

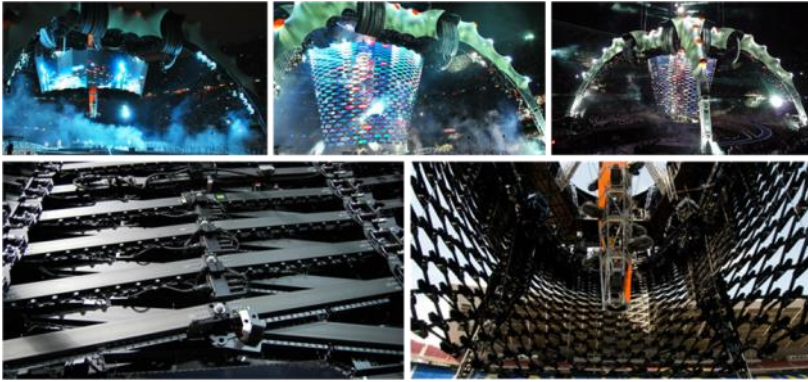


Figura 1.14 Pantalla de video desplegable. Escenario para U2. Gira 360°.

Fuente: <http://www.hoberman.com/>

El reto de desarrollar otras alternativas de montaje de estructuras, que faciliten los sistemas de despliegue y pliegue, es un segundo planteamiento que pretende estudiar esta investigación, retomando los principios de construcción de los arcos tradicionales combinados con las estructuras desplegables. Se puede aprovechar las estructuras desplegables para configurar semiarcos que se junten en la cúspide mediante un único nodo principal “la piedra angular o clave” y aprovechar la capacidad estructural de los arcos para su estabilidad durante su uso, garantizando de esta forma, que se presenten los empujes solo en las bases y así mismo beneficiarse de estos empujes en sentido contrario para el pliegue de la estructura (figura 1.15).

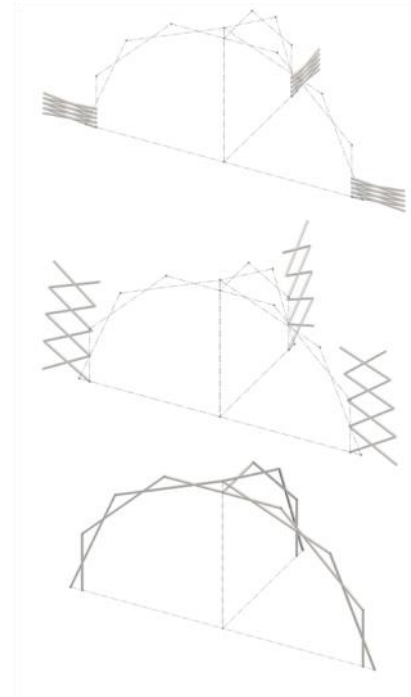


Figura 1.15 Montaje de un domo desplegable. Sistema de despliegue basado en la construcción tradicional de arcos.

Fuente: Elaboración del autor

Finalmente como tercera área de estudio, se analizan los cerramientos compatibles con las estructuras desplegables, comúnmente basados en cubiertas textiles desplegables, aunque aportan a la estabilidad de la estructura, son diseños que ante condiciones meteorológicas adversas, implementar un diseño inadecuado puede generar embolsamientos de agua, además la falta de un correcto pretensado en el estado final de despliegue, provoca arrugas en el textil afectando la capacidad estructural de la lona y la estética de la cubierta (figura 1.16).

Como aislamiento para el terreno, la mayoría de las aplicaciones suelen implantarse en terrenos planos, no inundables y en buen estado, pero en el caso de necesitar aislamiento, suele utilizarse como elemento adicional una cubierta textil impermeabilizada, separada de la estructura y que se instala previo el proceso de despliegue (figura 2.66); son pocas las aplicaciones que incorporan paneles rígidos como plataformas plegables para el suelo que se desplieguen simultáneamente con la estructura.



Figura 1.16 Cubierta con arrugas y posibles embolsamientos de agua

De esta forma, la investigación propone tres campos a analizar en el planteamiento de estructuras desplegables:

- Procesos de diseño a través de una metodología de diseño geométrico para optimizar el proceso de concepción de la forma y definición de las características de las barras que componen una estructura desplegable tipo domo.
- Sistema de pliegue y despliegue de la estructuras tipo domo basado en el proceso de montaje de arcos tradicionales. Semiarcos que se juntan en la cúspide.
- Implementación de cerramientos acordes al movimiento de la estructura: Cubiertas textiles desplegables y paneles rígidos

La figura 1.17 presenta un mapa conceptual que resume la intenciones de esta investigación.

Hipótesis

Es posible desarrollar una metodología de diseño geométrico para domos desplegables, que resuelva conjuntamente la estructura y el cerramiento, proponiendo nuevas alternativas espaciales para superficies desplegables con sistemas de rápido y fácil montaje.

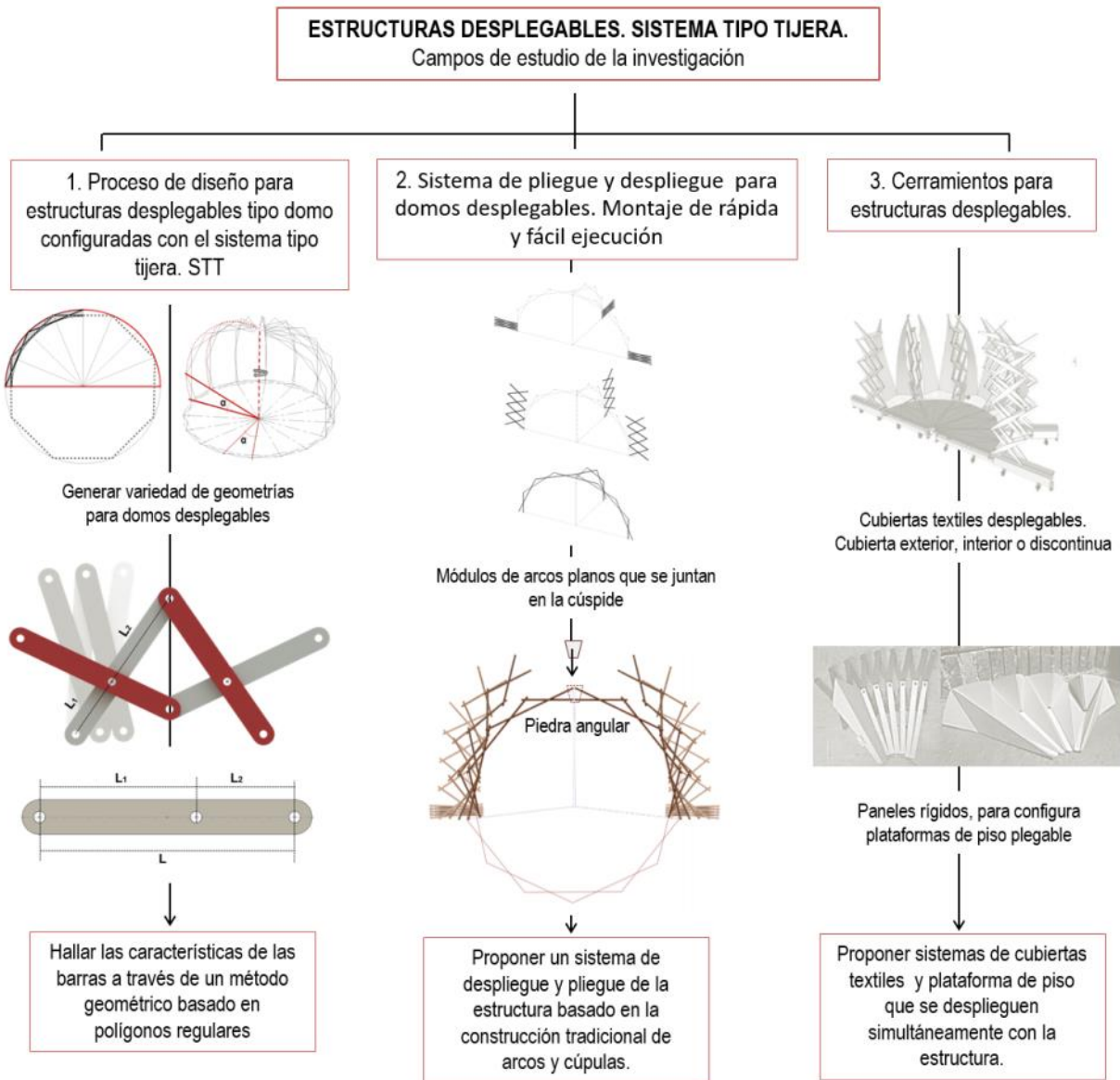


Figura 1.17 Mapa conceptual campos de estudio de la investigación. Fuente: Elaboración del autor

1.2 Delimitación

Al referirse a las estructuras desplegadas existe una amplia gama de aplicaciones y su clasificación puede ser muy variada según el tipo de movimiento, el sistema utilizado o comportamiento de los materiales [27]. Para delimitar el tema a tratar en esta investigación, se parte de la tabla de clasificación realizada por Stevenson [78], su clasificación describe los tipos de transformación que puede tener una estructura, según la tabla (figura 1.18), pueden ser del tipo giratorio, deslizante, retráctil, desplegable, plegable y deformable

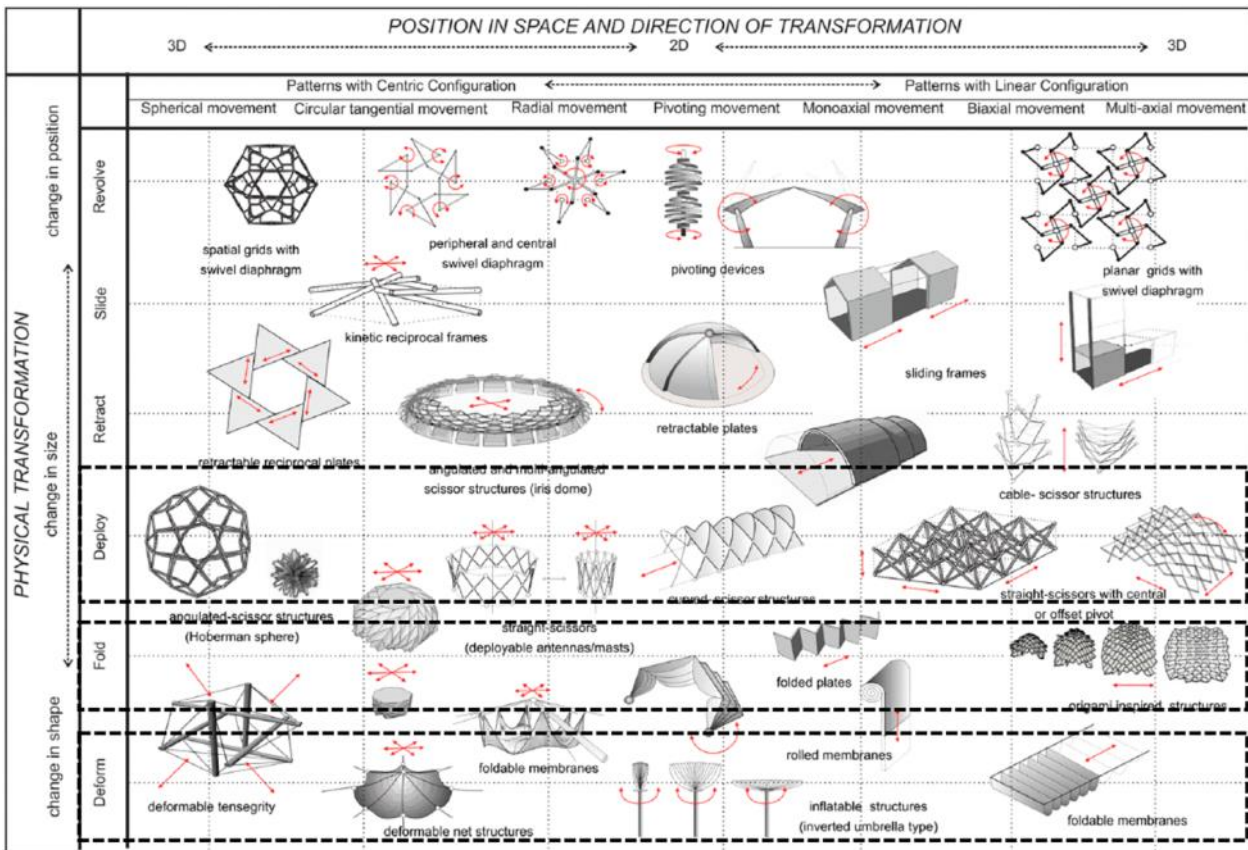


Figura 1.18 Clasificación según la transformación de las estructuras [78]. Los recuadros punteados corresponden al campo de estudio para esta investigación.

Stevenson [78] permite definir los temas específicos a exponer en esta publicación, ella lo titula como estructuras que se despliegan, pero que en este estudio se denomina como **Sistema Tipo Tijera, STT**, debido a los componentes, las barras articuladas que conforman este sistema. A continuación clasifica las estructuras que se pliegan que refiere a las plegaduras o sistema tipo origami y finalmente las estructuras que se deforman, referidas a membranas desplegadas [86].

De esta manera, la investigación se limita al estudio teórico y técnico de las estructuras desplegadas, orientado al tema de las barras articuladas que configuran el sistema tipo tijera. STT (figura 1.19) y los cerramientos compatibles como las plegaduras y las membranas desplegadas, para llevar a cabo el desarrollo de una metodología de diseño geométrico para configurar domos desplegadas.

Se plantea su aplicación en escenarios, stand o pabellones de exposición, ya que este tipo de infraestructuras refieren a actividades temporales, condicionados por la transportabilidad, rapidez en el montaje y fácil ensamblaje de sus piezas; características propias de las estructuras desplegadas.

La investigación pretende promover la aplicación de este tipo de estructuras, facilitando el proceso de diseño con un método propio del autor, el énfasis de la investigación es desarrollar una metodología de diseño basada en la geometría de los polígonos regulares que establece la forma final la superficie desplegada, con las posibilidad de variar la configuración geométrica, el diámetro, la altura o la dimensión de la barra según los requisitos del diseño a desarrollar.

La escala.

Para la aplicación de la metodología planteada, análisis estructural, estudio de los sistemas mecánicos y la fabricación de prototipos, se propone que el diseño de los domos sean ajustados a una pequeña y mediana escala urbana. Es decir que el área ocupada por un domo, sea similar a referentes arquitectónicos como los puestos de mercadillo, stand, pabellones o escenarios con áreas entre 20 m² y los 200 m².

De todas formas, la metodología de diseño planteada permite explorar diferentes posibilidades de dimensiones, pero para este estudio se limita el área referida anteriormente para lograr la viabilidad constructiva a través de la fabricación manual de prototipos a escala desarrollados en el capítulo diez.

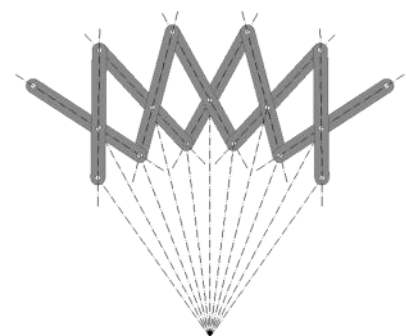
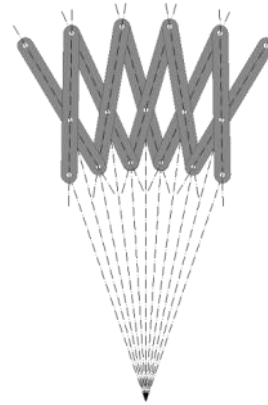
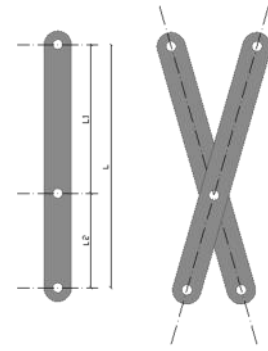


Figura 1.19 Agrupación de barras articuladas, sistema tipo tijera.

Fuente: Elaboración del autor

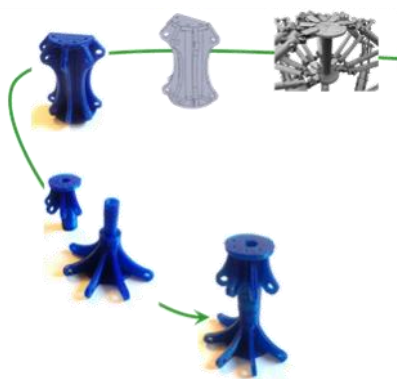


Figura 1.20 Nudo realizado con impresión 3D.

Fuente: Elaboración del autor

Recursos tecnológicos.

La investigación incorpora recursos tecnológicos ahora asequibles al diseño arquitectónico. En este caso la aplicación de la impresión 3D para pruebas de piezas mecánicas en los modelos a escala (figura 1.20); e incursión en programas paramétricos (Solidworks [135] y Grasshopper [131]) para simular los procesos de despliegue en el diseño de superficies desplegables y obtener diferentes configuraciones optimizando el tiempo de diseño y búsqueda de la forma.

Tablas de cálculo es Excel para la formulación de ecuaciones trigonométricas, que arrojan resultados numéricos para el dimensionamiento de los domos desplegables proyectados.

Referente a la tecnología de los sistemas mecánicos para el despliegue de los domos planteados a pequeña y mediana escala, se establece que el sistema de montaje sea manual, con elementos constructivos y conexiones tradicionales que se consiguen en el mercado industrial para el ensamble de estructuras modulares (tornillos, tuercas, arandelas, cables, pernos, anclajes, fijaciones, bisagras, etc.).

Materiales

Las alternativas de materiales utilizados en esta investigación para la configuración de domos desplegables, realización de los análisis estructurales y fabricación de prototipos corresponden a : Cartón, aluminio Madera y bambú. (Ver tabla 1.1)

Tabla 1.1 Propiedades Cartón, aluminio, madera y bambú

Propiedades de materiales utilizados.		
Datos requeridos para cargar en WinEva v.8 [136]. Programa de cálculo		
Material	Módulo de elasticidad T/m ²	Densidad T/m ³
Cartón*	254929	0,8
Aluminio**	6889445	2,7
Madera***	1180015	0,59
Bambu****	1790000	0,7

* Tomado de ABZAC Tubos y mandriles [99]. Y APYASA Electrical Insulations [102].

** Tomado de <http://www.elconstructorcivil.com>. Aluminio Empleado en la Construcción. [Recuperado 23/06/2013]

*** Tomado de http://www.ipt.br/informacoes_madeiras/8.htm IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas [Recuperado 23/06/2013]

****Tomado de Sustainable bamboo development [98].

1.3 Justificación

Esta investigación es la continuación del estudio preliminar que se realizó a nivel de master sobre estructuras desplegadas en una aplicación concreta de un escenario desplegable [88]. Aquí se introduce por primera vez la posibilidad de vincular la geometría de los polígonos regulares para el planteamiento de agrupaciones de barras rectas articuladas que conforman arcos desplegados.

El presente estudio busca desarrollar con mayor detalle el planteamiento de superficies desplegadas, optimizando el proceso de diseño, búsqueda de la forma, fabricación y montaje de dichas estructuras, con el objetivo de lograr una aportación investigativa basada en una metodología de diseño geométrico para estructuras desplegadas, con un sistema innovador de pliegue y despliegue simultáneo de la estructura, la cubierta y la plataforma de suelo.

Esta investigación pretende generar nuevos aportes en el campo de la arquitectura transformable a través de la exploración y aplicación de las estructuras desplegadas, proponiendo herramientas digitales e informáticas que generan nuevas alternativas de diseño útiles para aplicaciones temporales, con criterios de ligereza, reutilizables, facilidad en el montaje y transportables.

Se propone como materiales para la fabricación de prototipos, el cartón, el aluminio, la madera y el bambú, este último como un material idóneo, sostenible y económico que además de ser ligero es muy resistente a esfuerzos de compresión, tracción y flexión. La investigación se complementa con el estudio del comportamiento de los distintos materiales aplicados a las estructuras desarrolladas a nivel de prototipo a escala, priorizando en la aplicación del bambú, promoviendo de esta forma el uso de materiales sostenibles.

Para finalizar, esta investigación documenta y analiza las diferentes etapas de diseño planteadas: búsqueda de la forma, fabricación, ensamblajes, proceso de despliegue, comportamiento estructural, planteamiento de mecanismos y sistema de montaje - desmontaje de domos desplegadas, para registrar los diferentes aciertos y desaciertos logrados con esta experiencia investigativa en el diseño de estructuras plegables, motivando su aplicación a nivel industrial y a la proyección de nuevos estudios sobre esta línea de investigación.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos Generales

El objetivo principal de esta investigación es proponer una metodología de diseño para el planteamiento de domos desplegables configurados a partir de la agrupación de arcos planos, constituyendo sistemas tipo tijera a través del trazado geométrico de polígonos regulares.

Validar la metodología de diseño, con la realización de prototipos a escala, para comprobar su viabilidad estructural y constructiva, a través de nuevos procesos de montaje y desmontaje en estructuras espaciales que incorporen el despliegue simultáneo de la estructura, la cubierta y la plataforma de suelo, garantizando el correcto proceso de pliegue y despliegue de la estructura y la estabilidad de la misma.

1.4.2 Objetivos Específicos

Analizar los sistemas de estructuras desplegables aplicados e investigados en la arquitectura y la industria que aportan al presente estudio, referidos a los sistemas tipo de tijera, plegaduras y membranas desplegables; para entender su evolución tecnológica, en diseño, fabricación y montaje; generando la base teórica que precede a esta investigación.

Definir y analizar el sistema de barras articuladas tipo tijera, para entender su comportamiento, etapas y tipologías de despliegue con módulos individuales y módulos agrupados que generen superficies con curvatura.

Estudiar los métodos de diseño existentes para la configuración de arcos, domos o superficies con curvatura a partir de la agrupación tijeras rectas, para proponer una nueva metodología que permita generar nuevas alternativas espaciales de domos desplegables a través de la geometría de polígonos regulares.

Analizar las geometrías obtenidas con la metodología planteada mediante estudios de simulación con software específicos y realización de maquetas que permitan observar el comportamiento y proceso de despliegue, para definir las ventajas y desventajas de la metodología propuesta.

Proponer una tabla interactiva en Excel, como una herramienta académica para el diseño de diferentes configuraciones de superficies desplegadas a partir de la geometría de polígonos regulares, que permita facilitar y optimizar el proceso de búsqueda de la forma y diseño, y así mismo promover su estudio y aplicación.

Diseñar los principales componentes estructurales de los domos desplegadas: arcos, plegadura de suelo y cubierta, acorde con las geometrías obtenidas de la tabla interactiva, para fabricar prototipos demostrativos a escala que permitan analizar su viabilidad constructiva teniendo en cuenta los procesos de fabricación, ensamblaje, montaje - desmontaje, transporte y durabilidad de este tipo de estructuras.

1.5 Metodología

La metodología de esta investigación se compone de cuatro etapas fundamentales para el desarrollo de los objetivos principales:

Etapas conceptuales

Recopilación bibliográfica y análisis de los antecedentes en el tema específico de las estructuras desplegadas y aplicaciones significativas en el campo arquitectónico e industrial.

Utilización de recursos y fuentes bibliográficas como:

Páginas web, coloquios, congresos, exposiciones, revistas, investigaciones y bases de datos específicas del tema en bibliotecas técnicas de arquitectura. (Ver bibliografía)

Etapas experimentales y analíticas

Exploración de los sistemas tipo tijera y la conformación de superficies curvas a través de este sistema. Desarrollo de una metodología propia para la configuración de domos desplegadas.

Observación y análisis de las geometrías obtenidas, proceso de despliegue y comportamiento estructural a través de modelos digitales en 2D y 3D realizados en programas de simulación.

Realización de maquetas, con diferentes materiales para visualizar el comportamiento y proceso de despliegue de las estructuras desplegadas planteadas (figura 1.21).

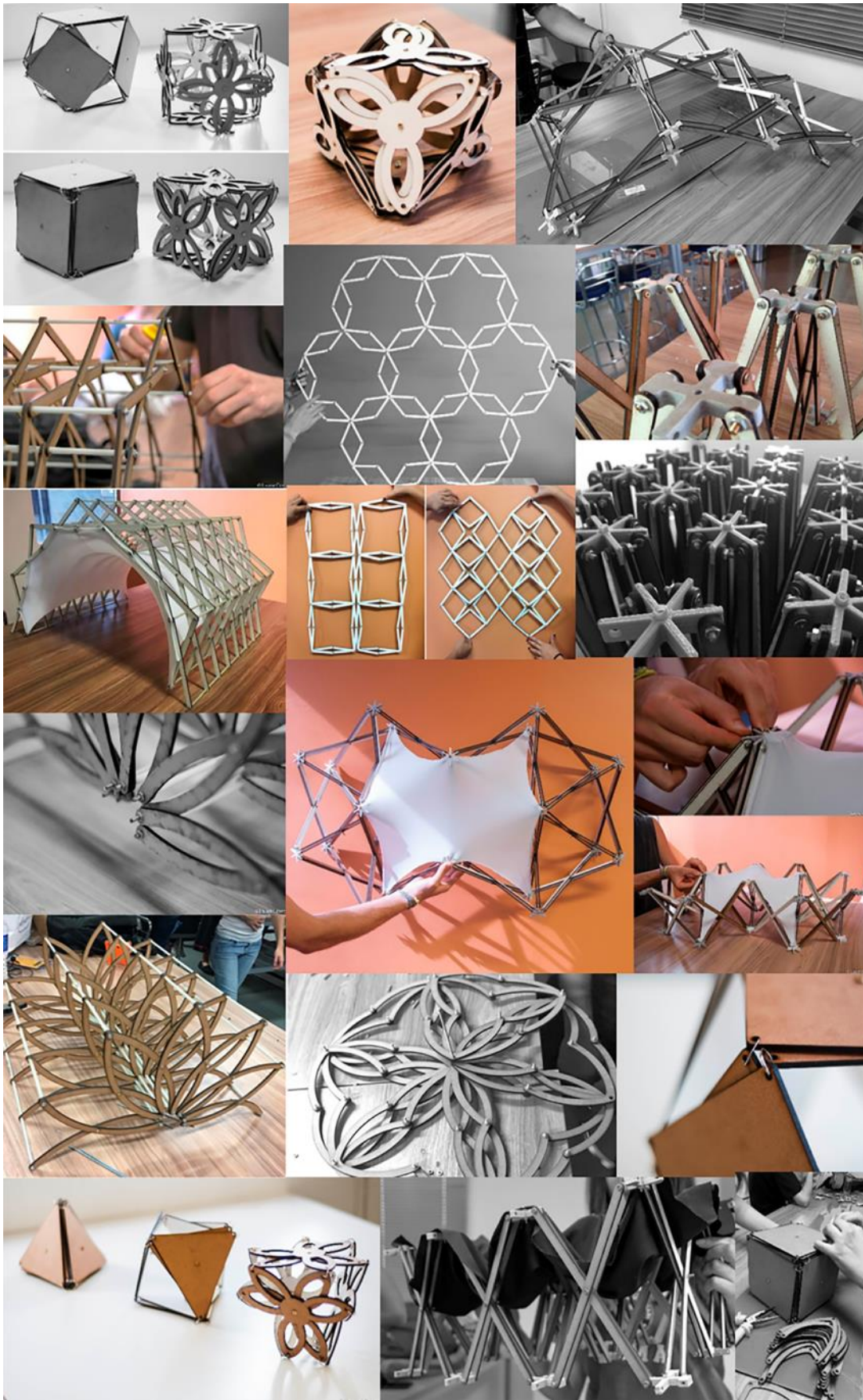
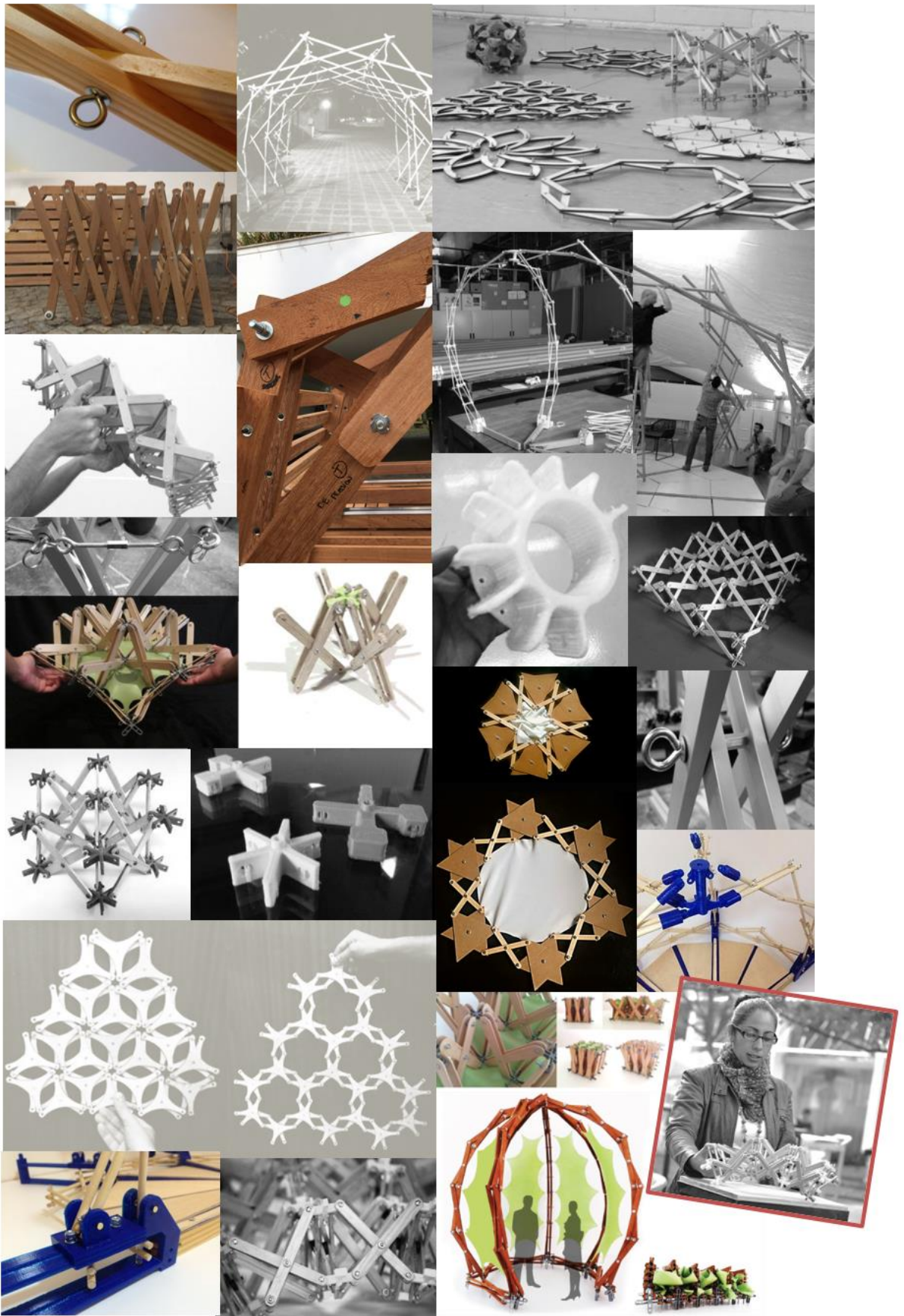


Figura 1.21 Modelos a escala realizados durante la investigación. Pagina izquierda fotografías realizadas por Laura Costa.

Fuente: Elaboración del autor



Utilización de herramientas digitales de software específicos:

Solidworks [135], SkechUp [131], programas de renderización como Rhinoceros [133] y Grasshopper [131] en el desarrollo de arquitectura paramétrica. Para el análisis de la estructura, software WinEva [136] y WinTess [137] que permiten la comprobación estructural, análisis de cargas durante el estado final de despliegue, verificando si la estructura se encuentra en equilibrio.

Diseño de tabla interactivas en Excel [132] para el cálculo de longitudes de barras en módulos de tijeras rectas, a través de ecuaciones trigonométricas basadas en la geometría de polígonos regulares estrellados.

Elaboración prototipos

Definición de la geometría, dimensiones y material. Planteamiento de los procesos de fabricación, ensamblaje y montaje de la estructura.

Diseño de detalles constructivos, sistemas de ensambles y conexiones.

Fabricación de elementos y piezas de los componentes estructurales: Arcos, estructura suelo y membrana. Utilización de la tecnología de impresión 3D.

Seguimiento fotográfico y en video para el posterior análisis del proceso de montaje, pliegue y despliegue de los prototipos.

Comprobación estructural y viabilidad constructiva (figura 1.22).

Etapa final de aportaciones y conclusiones

Desarrollo de una tabla interactiva para la configuración de superficies desplegadas con la posibilidad de introducir datos básicos y generar la información para proyectar una espacialidad de una estructura desplegable a partir del STT (figura 1.23). Esta herramienta permite la proyección y construcción de prototipos como aplicaciones reales en estructuras desplegadas.

Seguimiento fotográfico y redacción de conclusiones finales.



Figura 1.22 Prueba de carga prototipo realizado en aluminio. Stand Egg.

Fuente: Elaboración del autor

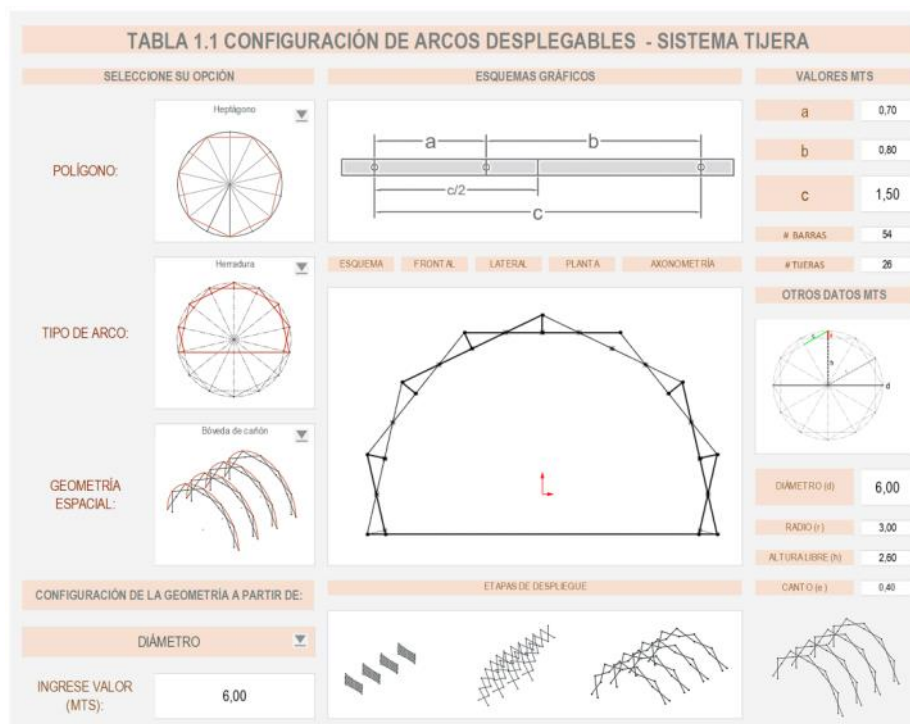
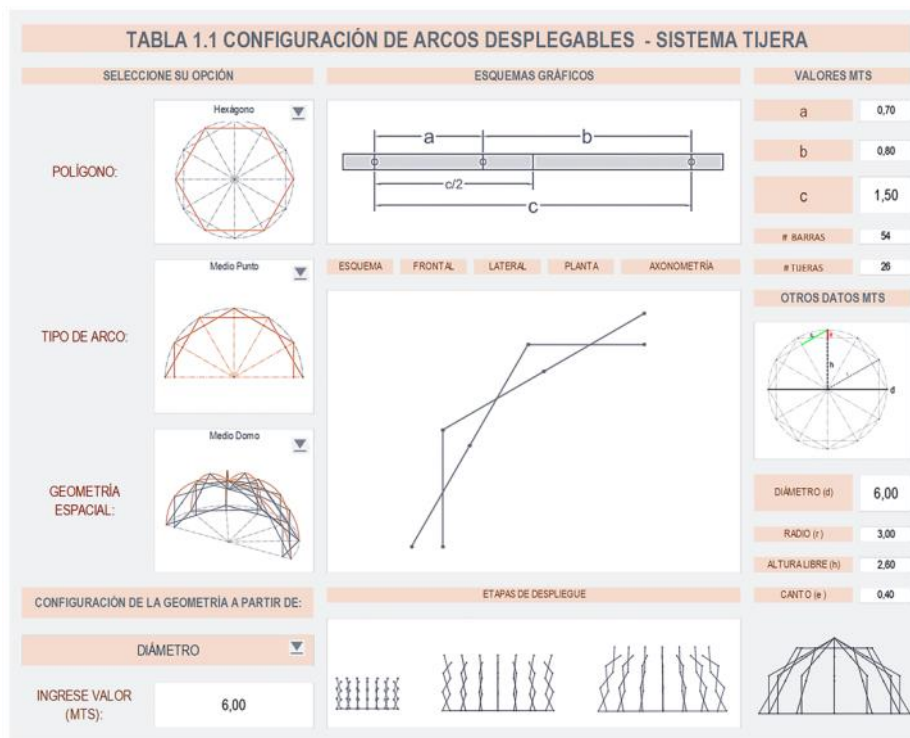


Figura 1.23 Tabla interactiva para la proyección de arcos desplegados con el sistema tipo tijera a partir de la geometría de polígonos regulares. Configuración de domo desplegable y bóveda de cañón desplegable.

Fuente: Elaboración del autor



Figura 1.24 Maquina teatral Leonardo Da Vinci [83].

1.6 Génesis de la investigación

La incursión en el diseño de estructuras desplegables surge como una exploración arquitectónica que incorpora la utilización de estructuras plegables, en respuesta a la necesidad de implementar nuevas infraestructuras portátiles de fácil y rápido montaje para El Festival Iberoamericano de Teatro de Bogotá (FITB). Esta propuesta fue desarrollada a nivel teórico en el programa de Maestría en Construcción de la Universidad Nacional de Colombia titulada: TDES. Teatro Desplegable. Propuesta de un escenario con estructuras dinámicas.

El concepto original de TDES surge de la maquina teatral de Leonardo Da Vinci para la obra de Orfeo en 1505 [83], que consistía en un domo que se abría por la mitad con una estructura en listones de madera que generaban la forma correspondiente y una cubierta en tela tensada sobre la estructura (figura 1.24). El resultado de esta investigación propone medio domo compuesto de una plataforma plegable en forma de media circunferencia, arcos plegables conformados por barras articuladas y lonas entre los arcos.

La estructura, es estable una vez se juntan los arcos en la cúspide. El proceso de pliegue y despliegue de la estructura consiste en dos etapas: El despliegue de la plataforma del entarimado del suelo y posteriormente la elevación de los arcos plegables que corresponden a los ejes que trazan los meridianos del domo (figura 1.25).

Su proceso de diseño incorpora un primer acercamiento a la metodología de polígonos regulares para establecer la geometría de los arcos y las dimensiones de las barras que componen el sistema tipo tijera utilizado, de esta forma surge como investigación a futuro proyectar esta metodología como un sistema de diseño para el planteamiento de diversas geometrías de domos desplegables, que incorporen durante su proceso de montaje, descrito en un única etapa, el despliegue simultáneo de la estructura, la plataforma del entarimado del suelo y la cubierta.

Esta investigación pretende analizar la viabilidad constructiva de domos desplegables, facilitar el proceso de diseño con estructuras desplegables para difundir su aplicación en usos arquitectónicos temporales como escenarios, stands, albergues o pabellones y de esta forma acercar a los arquitectos y diseñadores el concepto de este tipo de estructuras como una alternativa de diseño portátil, transformable, adaptable y sostenible.

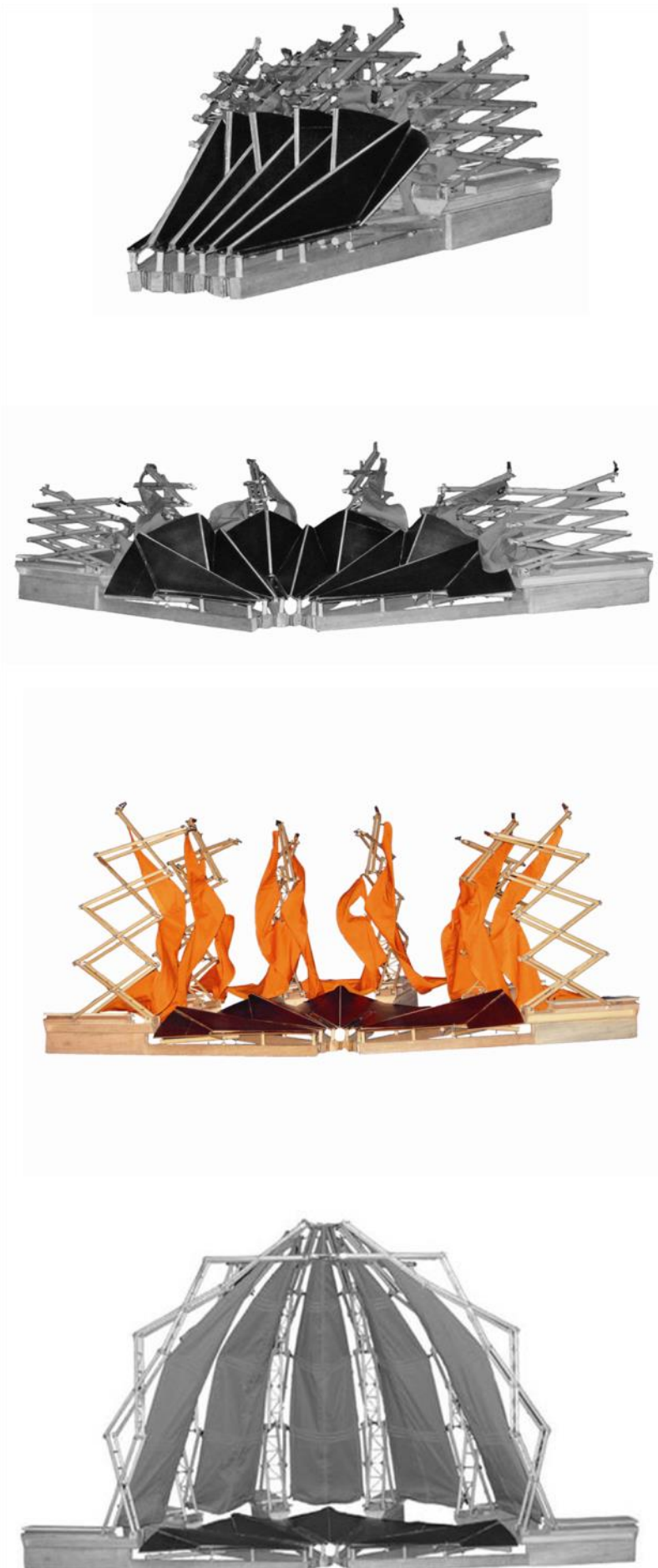


Figura 1.25 Modelo a escala.
Propuesta de un escenario desplegable [88].



CAPÍTULO 2

Estado del arte

Cada uno de los referentes considerados en el presente capítulo son relevantes para el desarrollo de la presente investigación, se toman en cuenta las principales aplicaciones desarrolladas cronológicamente que por sus características ofrecen algún tipo de aportación para el desarrollo de estructuras desplegables.

Como la investigación busca ser una herramienta metodológica para la proyección de nuevas espacialidades de domos desplegables que incorporen en su diseño cerramientos compatibles a la estructura móvil, se realiza una descripción y análisis de las principales aplicaciones en tres campos de estudio fundamentales: Sistema tipo tijera, plegaduras y cubiertas textiles desplegables.

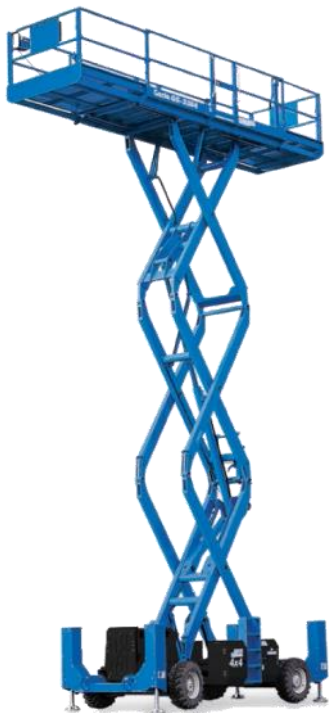


Figura 2.79 Plataforma de elevación tipo tijera.
Fuente: <http://vertical.ie/diesel-scissor-lift-hire/>
Recuperado [24/04/2015]

Contenido capítulo

2.1 Antecedentes	50
2.1.1 Primeras aplicaciones	50
2.1.2 La naturaleza como inspirador - Biomímesis	52
2.1.3 Definición de estructura desplegable	53
2.2 Sistema tipo tijera	55
2.2.1 Principales diseñadores	55
2.2.2 Grupos de investigación	65
2.2.3 Aplicaciones comerciales	68
2.2.3.1 Refugios militares y albergues	68
2.2.3.2 Stand Pop up	72
2.2.3.3 Plataformas de elevación tipo tijera	73
2.3 Cerramientos para las estructuras desplegables tipo tijera	75
2.3.1 Paneles rígidos-Origami	75
2.3.1.1 Principales investigadores técnica origami	75
2.3.1.2 Aplicaciones	82
2.3.2 Cubiertas textiles desplegables	89
2.3.2.1 Primeras aplicaciones	89
2.3.2.2 Principales diseñadores	91
2.3.2.3 Otras aplicaciones	100
2.4 Conclusiones	104

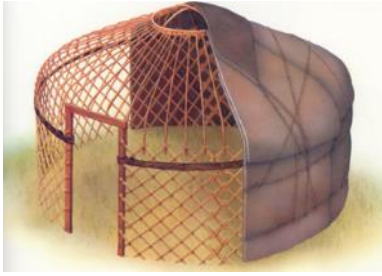


Figura 2.1 Vivienda tradicional de los nómadas de Mongolia.

Fuente: <https://mongolmom.blogspot.com/p/my-mongolian-traditional-home-ger.html>
Recuperado [07/05/2013]

2.1 Antecedentes

2.1.1 Primeras aplicaciones

Desde los inicios de la humanidad, el hombre ha tenido la necesidad de refugiarse, construyendo espacios cerrados y limitados con el propósito de protegerse de condiciones climáticas, ataques de animales salvajes, controlar el fuego y crear un refugio para su núcleo familiar. Las primeras viviendas portátiles y adaptables, hacen referencia a los diferentes pueblos nómadas que diseñaron refugios transportables basándose en estructuras ligeras y plegables.

Entre los ejemplos más representativos de las primeras moradas portátiles, encontramos la yurta, el tipi y la jaima. Refugios temporales basados en un armazón ligero de madera y cubiertos con una lona que obtenían de las pieles de los animales.

La yurta es la vivienda tradicional de los nómadas de Mongolia. Es una estructura circular autoportante, construida a partir de listones de madera y cerramiento en pieles de animales (figura 2.1).

Su principal característica es la plegabilidad del muro (Khana), que consisten en un entramado construido con varas de sauce y articuladas por medio de pasadores. El proceso constructivo consiste en desplegar un extremo del entramado, siguiendo un perímetro circular y fijarlo al extremo contrario, a través del sistema de pasadores que frena el proceso de despliegue y estabiliza la estructura.

Al referirse a una estructura temporal, el proceso de desmontaje se reduce al eliminar los pasadores de fijación y replegar la estructura, permitiendo que la estructura sea muy fácil de desmontar y pueda ser trasladada a un nuevo emplazamiento. Es importante mencionar que la forma circular se obtiene gracias a la flexibilidad de material, varas de sauce, que permiten conformar un muro curvo sobre el trazado del perímetro circular (figura 2.2).

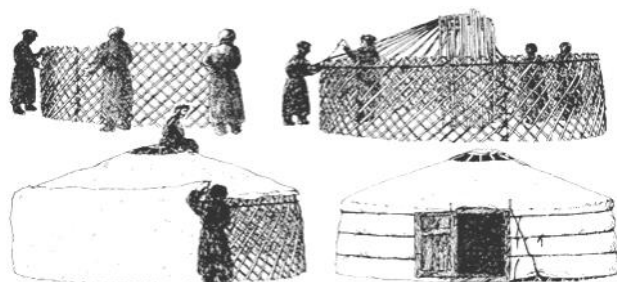


Figura 2.2 Proceso de montaje de una yurta. Fuente: <https://www.milkwood.net/2012/07/04/building-a-yurt-from-scratch-resources/> Recuperado [10/12/2012].

El Tipi es la vivienda nómada de las tribus indígenas de los EE.UU. Aunque su sistema constructivo no incorpora barras articuladas, si son estructuras caracterizadas por su rápido montaje y desmontaje.

Se componen de listones de madera que conforman una pirámide con base poligonal. Para la construcción de un tipi, se atan todos los extremos superiores de los listones de madera, luego se posicionan los extremos inferiores de cada listón generando la forma conoidal; una vez conformada la estructura, esta es fijada al terreno por medio de estacas y reforzada con listones transversales. Para el desmonte se realiza en mismo proceso pero en viceversa, configurando al final un paquete compacto que facilita el transporte y su almacenamiento (figura 2.3).

El cerramiento consistía en una membrana de piel de búfalo, hoy en día se utilizan fibras sintéticas, que envuelven toda la estructura, con aberturas en la parte superior para la salida del humo y dobleces en la parte inferior para aislarla del suelo en épocas de invierno (figura 2.4).

La jaima (jayma, haima o khayma) es la vivienda de los bereberes, tribus nómadas que habitan el norte de África hasta los países árabes.

Su estructura de forma piramidal se logra por la posición del toldo sobre mástiles de madera atirantados, ubicados en el medio del espacio. Esta configuración permite la protección contra los vientos del desierto (figura 2.5).

La cubierta de esta gran tienda de campaña se basa en el tejido de hilos tomados del pelo del camello o la cabra, conformando unidades de tejido (el flij) que hacen parte de la composición total del toldo (figura 2.6). Su sistema de montaje se basa en el posicionamiento de mástiles de diferente tamaño, atirantados para obtener puntos altos y bajos, sobre los cuales se posiciona la cubierta textil para generar un espacio habitable protegido.

Los ejemplos anteriormente vistos de las primeras construcciones portátiles, se caracterizan por las ventajas anteriormente nombradas: sencillez, ligereza, modulación y utilización de los recursos mínimos necesarios, estrategias que serán fundamentales para establecer la base constructiva y estructural de las estructuras desplegables a proyectar.

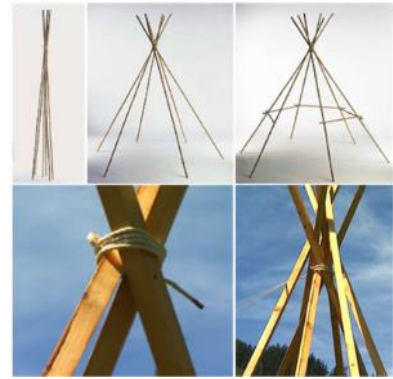


Figura 2.3 Estructura Tipi.

Fuente: <http://www.fun-stuff-to-do.com/tipi-tent.html> Recuperado [04/12/2012].



Figura 2.4 Cubierta del tipi en lona (piel de animales)

Fuente: https://elpais.com/sociedad/2008/11/28/actualidad/1227826803_740215.html Recuperado [04/12/2012].



Figura 2.5 Jaima, vivienda nómada de los bereberes.

Fuente: <https://www.fondationalmouggar.org/copie-de-al-khayma-1>. Recuperado [11/01/2013].



Figura 2.6 Tejido basado en hilos de pelo de camello.

Fuente: <https://www.fondationalmouggar.org/copie-de-al-khayma-1> Recuperado [11/01/2013]



Figura 2.7 Floración flor de loto y orquídea.
Fuente: <http://floresmanizales.blogspot.com.es/>
Recuperado [27/06/2014]



Figura 2.8 Fuchsia magellanica .
Fuente: <http://www.fotonatura.org/>
Recuperado [11/10/2013]



Figura 2.9 Flor de abanico, Scaevola aemula.
Fuente: <http://www.guiadejardineria.com>
Recuperado [12/06/2014]



Figura 2.10 Starlight Theatre de Bengt Sjostrom.
Fuente: <http://studiogang.com>
Recuperado [08/03/2013]



2.1.2 La naturaleza como inspirador - Biomímesis

La naturaleza como fuente de inspiración es una de las herramientas más utilizadas en el diseño y en la arquitectura. En el caso de las estructuras desplegables, los casos que refieren como ejemplos a imitar en el concepto de diseño de esta investigación, se concentran principalmente en las partes de las plantas.

Un primer referente donde el despliegue es algo propio de la naturaleza, es la apertura de la flores que genera un espectáculo de movimiento. Observar con detenimiento la posición que toma cada pétalo desde el momento previo a la floración hasta su máxima apertura (figuras 2.7, 2.8 y 2.9), demuestran según la especie floral, como se despliegan y se posicionan sus pétalos en diferentes geometrías concéntricas, configuraciones que han inspirado a esta investigación y a varios diseños arquitectónicos, un ejemplo aplicado es la cubierta del Teatro de las estrellas (figura 2.10).

También, se analiza la plegabilidad en las hojas de la mimosa púdica o bien conocida como dormilona, esta planta se caracteriza por el cierre de sus hojas al tacto, la particularidad de la hoja es que esta compuesta de varias sub-hojas que se unen en una vena central, que al momento de sentir alguna estimulación, reacciona y funciona como una bisagra que cierra la hoja en dos partes (figura 2.11).

Estos principios de movimiento naturales, entre otros, se verán reflejados o imitados en varias de las aplicaciones que a continuación se describen.



Figura 2.11 Mimosa púdica.
Fuente: <http://escuelangela.blogspot.com.es/> Recuperado [23/05/2014]

2.1.3 Definición de estructura desplegable

Una estructura desplegable es aquella que presenta movimiento total o de sus partes a partir de mecanismos para lograr un aumento o una nueva configuración del volumen, logrando estructuras adaptables que se pueden transformar según las necesidades de cada diseño, obteniendo ventajas como la liviandad, la modulación de los elementos, facilidad en el montaje, eficiencia estructural o la posibilidad de ser transportables para ser nuevamente desplegada y reutilizar la estructura en otro lugar [86].

La aplicación de los sistemas estructurales desplegables en la arquitectura ha sido desarrollada desde la antigüedad, con conceptos de diseño principalmente inspirados en formas de la naturaleza; la aplicación y viabilidad constructiva de este tipo de estructuras en la actualidad, ha concebido grandes avances gracias a los nuevos materiales, nuevos sistemas constructivos y a los adelantos tecnológicos en herramientas para la fabricación y el diseño arquitectónico. El interés por este tipo de estructuras y su aplicación han generado cada vez más interesados en la movilidad estructural permitiendo innovar en nuevas aplicaciones y líneas de investigación que se promueven en universidades de todo el mundo.

Para una mejor comprensión del estado del conocimiento, la investigación describe a continuación tres temas principales, que corresponden a tres tipologías de estructuras desplegables, tomando en cuenta los componentes estructurales que configuran los domos desplegables planteados en la investigación que antecede el presente estudio.

Sistema tipo tijera, plegaduras y cubiertas textiles desplegables.

Esta investigación no pretende describir exhaustivamente los temas anteriormente nombrados, se trata de conocer las principales aplicaciones construidas y proyectadas, que involucren sistemas plegables que por su interés aportan al presente documento.

De esta forma, para un mejor análisis y comprensión del estado del arte, se expone a continuación la descripción de los principales diseñadores e investigadores que han realizado estudios y aplicaciones sobre estructuras desplegables, en las temáticas anteriormente nombradas. Así mismo el estudio sobre productos que ya se encuentran a nivel comercial que por su desarrollo mecánico e industrial generan importantes contribuciones.



Figura 2.12 Taburete plegable.

Fuente: <http://veronemobili.com>
Recuperado [04/02/2013]

2.2 Sistema tipo tijera. STT

El sistema estructural desplegable tipo tijera, es utilizado como una estructura plegable para usos como sillas, mesas, plataformas para elevar pesos y en la arquitectura principalmente aplicadas en el diseño de cubiertas, pabellones y stands. Los primeros diseños refieren a sillas plegables que se remontan al año 2000 A.C, utilizados en el Antiguo Egipto (figura 2.12).

La definición, características y tipologías específicas del sistema tipo tijera, STT, son descritas con mayor detalle en el capítulo 3.

2.2.1 Principales diseñadores

Leonardo Da Vinci, el gran inventor del Renacimiento, realizó las primeras observaciones científicas de la morfología y movimiento del cuerpo humano y los animales, proyectando gran variedad de mecanismos. Durante 1480 y 1494 proyectó las alas mecánicas, basadas en la morfología de los pájaros, peces voladores y murciélagos (figura 2.13). Las estructuras de las alas constaban de varios segmentos de barras en madera articulados entre sí, para lograr el movimiento de pliegue. Este movimiento se obtiene a través la fuerza manual del giro de un tornillo sin fin, que tira de las cuerdas atadas a los extremos de las barras y que a través de poleas, traslada este movimiento para obtener el plegado de las alas [83].

Otro invento de Da Vinci que antecede esta investigación es un dispositivo mecánico para la elevación de pesos, el cual se encuentra documentado en el Códice Madrid I [104]. Este dispositivo configurado con el sistema tipo tijera, se compone de siete módulos de tijeras de diferente tamaño que disminuyen por cada nivel superior (figura 2.14). Se observa en la base del dispositivo el mecanismo que permite el movimiento de despliegue, una manivela que hace girar un tornillo sin fin y permite el desplazamiento horizontal de las articulaciones de la tijera inferior, obteniendo la apertura o cierre de todo el sistema, ya que la primera tijera transmite el movimiento de apertura al resto de la estructura. P. Valcárcel [65], refiere a que Leonardo no realizó un modelo experimental de este dispositivo, ya que no se expone dentro de sus apuntes la gran fuerza que hay que aplicar para desplegar el sistema ni cálculos referentes al sistema.

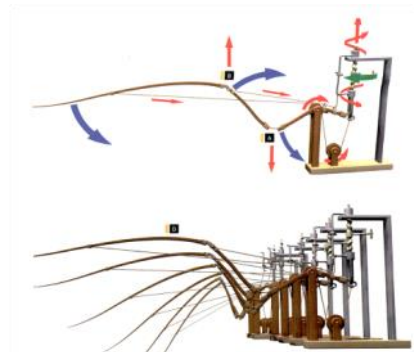


Figura 2.13 Alas mecánicas [83]

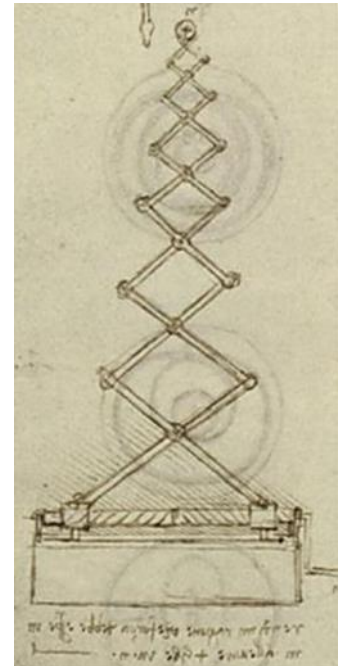


Figura 2.14 Dispositivo de elevación con tijeras [104].

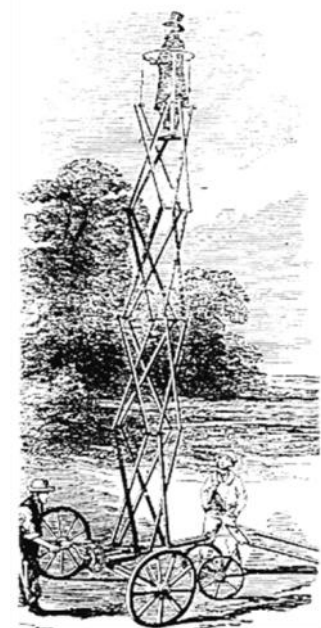


Figura 2.15 Dispositivo de elevación con tijeras [73].

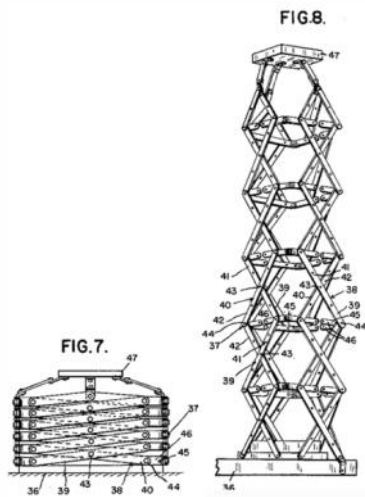


Figura 2.16 Patente torre desplegable [12].

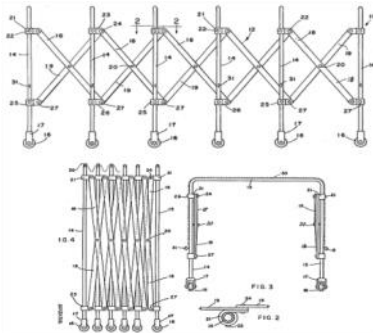


Figura 2.17 Mesa portátil para carga [54].



Figura 2.18 Plataforma de elevación con sistema tipo tijera [101]

Es hasta la época moderna que se encuentra registros sobre la utilización de este concepto estructural a nivel industrial. Las agrupación de tijeras se ve aplicado constructivamente en las primeras plataformas de elevación y en plataformas de carga (figuras 2.15, 2.16 y 2.17).

Es en 1972 que **Wallace Johnson**, un empresario en la industria de andamios, lanza al mercado “la alfombra voladora”, una plataforma de elevación para personas con el sistema tipo tijera (figura 2.18), un sistema innovador que mejora las condiciones de seguridad y montaje en trabajos en alturas [106].

En 1944 en Inglaterra se conoce la patente registrada como *Improvements in supports for tents, marquees, temporary bridges and other portable structure* de **Barde Salden Watkins**, él desarrollo una sucesión de arcos independientes desplegables con el STT, que configura una bóveda de cañón. Los arcos son desplegados manualmente en el suelo, posteriormente son erguidos y finalmente estabilizados con elementos adicionales como tensores y barras transversales que controlan la apertura de los elementos tijera (figura 2.19).

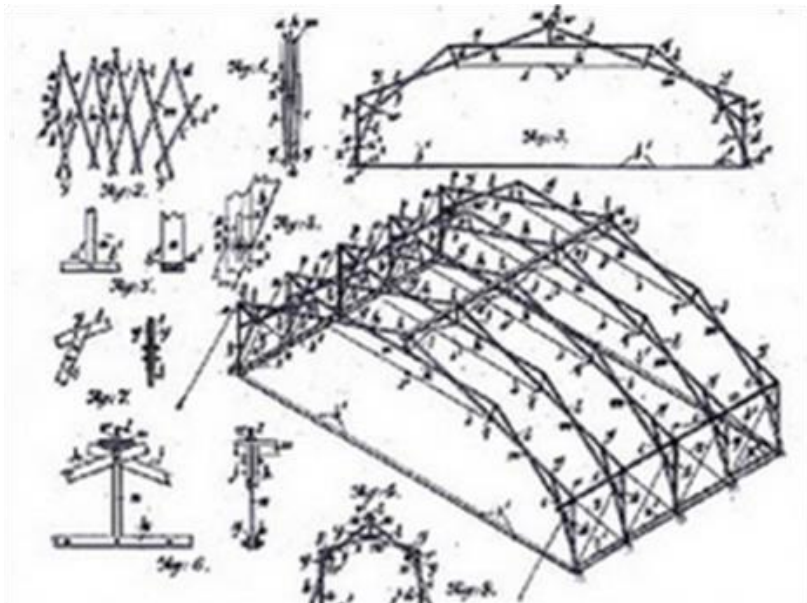


Figura 2.19 Patente Barde Salden Watkins. Estructura desplegable para tiendas, puentes temporales o estructuras portables [13].

Richard Buckminster Fuller en 1953 crea un sistema llamado *Flying Seedpod* compuesto por tubos de aluminio articulados por los extremos a través de nodos flexibles, que al desplegarse configura una estructura de domo a partir de cuadriláteros (figura 2.20). El sistema de despliegue, similar al de la apertura de un paraguas, se basa en cilindros neumáticos ubicados en los vértices de la geometría y una vez activados los cilindros, que han sido previamente rellenos con gas cuando la estructura esta plegada, la presión del gas ejerce la fuerza para el proceso de despliegue. De esta forma los tubos de aluminio se posicionan para configurar cuadriláteros. Adicionalmente se incorpora una red de cables que al tensionarse estabiliza la estructura [28].

Emilio Pérez Piñero, arquitecto español, “es considerado por grandes especialistas internacionales en estructuras transformables como un adelantado a su tiempo en este campo y un verdadero precursor de la plegabilidad de las estructuras reticulares.” [110]. Pérez Piñero desarrolló varias propuestas de cubiertas desplegables compuestas por barras articuladas con importantes aportes en el desarrollo de mecanismos, sistemas de control del movimiento y estabilización de la estructura.

Las redes desplegables desarrolladas por Piñero se componen de módulos de aspas, de tres y cuatro barras, que se articulan en puntos medios de la barras, a través de nodos específicos según la cantidad de barras (figura 2.21), la exploración de las agrupaciones de módulos aspa, generó varias propuestas de estructuras espaciales que se lograron construir y de especial interés en esta investigación, correspondientes a las que configuran superficies curvas (figuras 2.22 y 2.23). Los sistemas de montaje propuestos para el despliegue y pliegue, variaban según el tamaño de la estructura, proponiendo desde una ejecución manual y modular, o a través de cilindros hidráulicos y maquinaria adicional como grúas o helicópteros que sostuvieran la estructura y su despliegue se realizara por el peso propio de la misma.

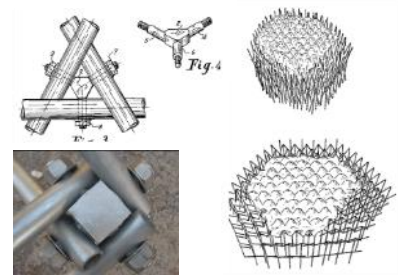


Figura 2. 21 Patente de E.P Piñero. Nodos para configuras aspas 3 y 4 barras. Estructura tridimensional reticular [67].



Figura 2. 22 Teatro Ambulante para 500 personas. Maqueta anteproyecto 1961 [71]

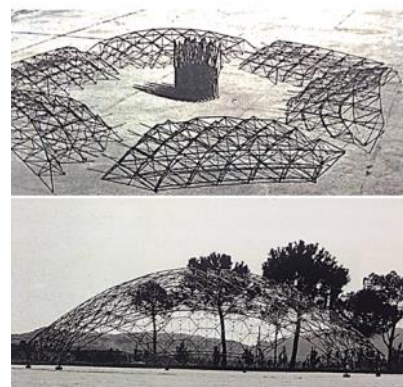


Figura 2. 23 Cúpula desplegable para grandes luces 1961 [13].



Figura 2.20 Domo desplegable. Richard Buckminster Fuller 1953 [28].

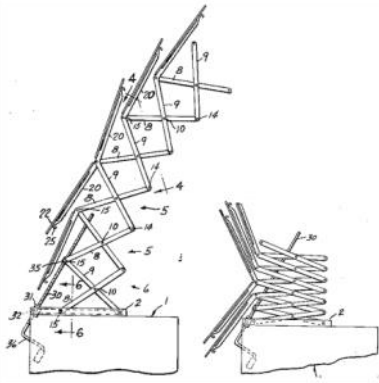


Figura 2.24 Arco desplegable con cerramiento en paneles rígidos. Mecanismo de despliegue con manivela y tornillo sin fin en la base [55].

Para esta investigación se retoma en el capítulo cuatro, los principios geométricos aplicados para analizar la metodología utilizada por E.P. Piñero en el planteamiento de estructuras espaciales desplegables que generan superficies curvas.

Los desarrollos posteriores en la aplicación de estructuras desplegables utilizando el STT, se centran en proponer nuevas configuraciones espaciales, analizando las diferentes posiciones de las articulaciones en las barras, geometría de la barra, la compatibilidad del proceso de despliegue con la estabilidad de la estructura, estudio de los sistemas de cerramiento rígidos y flexibles acordes a la estructura y al diseño e innovación de los nodos entre módulos de tijeras, generalmente aplicados al diseño de albergues y carpas plegables (figuras 2.24, 2.25, 2.26 y 2,27)

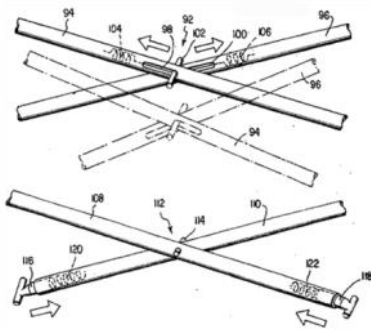


Figura 2.25 Sistema tipo tijera con articulación central deslizante y articulación de los extremos telescópica [97].

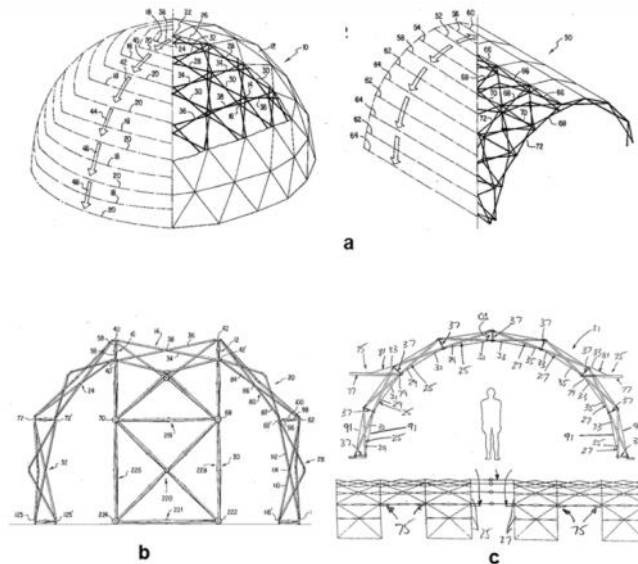


Figura 2.27 Estructuras desplegables desarrolladas por Theodore R. Zeigler. Tipo geodésicas, bóvedas de cañón y domos. Patentes: a) 1977. b) 1987. c) 2008.

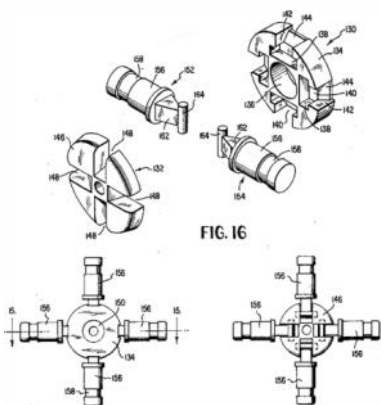


Figura 2.26 Nodo tipo para estructura desplegable [97].

Las propuestas realizadas por el equipo **Escrig, Sánchez y P. Valcárcel** hacen parte de los principales referentes en estructuras desplegables aplicadas en arquitectura. En 1984 formaron la empresa PERFORMANCE S.L donde desarrollaron varios proyectos de estructuras desplegables compuestas por módulos de tijeras que configuran redes triangulares y cuadrangulares, lamentablemente no todas las propuestas fueron construidas.

Para el equipo de Escrig siempre fue de gran importancia el rigor en la realización de maquetas y prototipos a escala, que permitían visualizar el proceso de despliegue de la estructura, plantear los mecanismos y uniones principales así como el proceso de ensamble y transporte de la estructura a su lugar de emplazamiento (figura 2.28 y 2.29).

En las propuestas desarrolladas como estructuras espaciales con malla triangular que generan una superficie con curvatura, al momento de analizar y calcular los procesos de despliegue de esta tipología de agrupaciones, las estructuras fallaban por problemas de compatibilidad geométrica y las barras se curvaban en el proceso de desplegado [25] (figura 2.30). Las barras de aluminio, podían soportar cierto grado de flexión, debido al límite de elasticidad del material, pero también se optaba por liberar algunas barras en los módulos de tijera.

Con las mallas cuadrangulares que generan una superficie con curvatura, la inestabilidad angular la resuelven en el estado final de despliegue a través de diagonales, pero durante las etapas del proceso del despliegue previas a su posición final, son estructuras muy inestables y difíciles de manipular [25]. Pero estas desventajas promovía en Escrig la búsqueda de nuevas soluciones y sistemas de rigidización que fueron aplicados en diferentes proyectos (figura 2.31).

Su principal construcción fue la cubierta para la piscina de San Pablo en Sevilla (figura 2.32), conformada por dos cúpulas esféricas de malla cuadrangular y siendo la primera gran estructura desplegable desde E.P. Piñero [2].



Figura 2.32 Exterior de la piscina en construcción. Nodo tipo para cuatro barras [2].

Figura 2.31 Sistemas de diagonalización progresiva en módulos cuadrados, aplicados en un tornavoz transportable para un escenario [25]

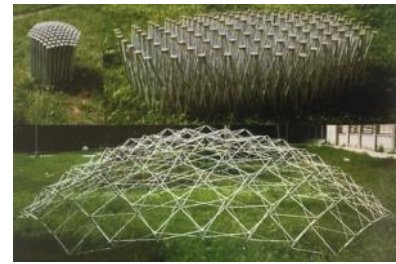


Figura 2.28 Modelo de malla proyectiva de base triangular con nudos de seis barras [25]



Figura 2.29 Modelo de cúpula geodésica [25].

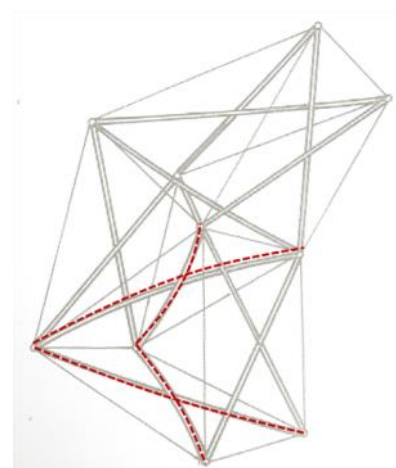


Figura 2.30 Curvado de barras en el proceso de desplegado [25].



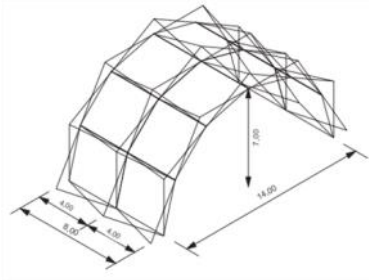


Figura 2.33 Geometría y dimensiones Estran 1 [36].



Figura 2.34 Tacos de refuerzo en los extremos de las barras [36].

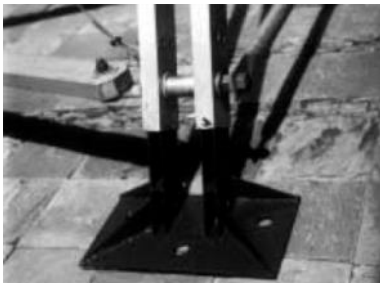


Figura 2.35 Bases Estran 1 [36].



Figura 2.36 Elemento de bloqueo del movimiento en las bases [36].



Figura 2.37 Anclaje para colgar la membrana [36].

Carlos Henrique Hernández a partir de la publicación de su tesis “Deployable Structures” en el Instituto de Tecnología de Massachusetts en 1987, crea el grupo ESTRAN con la colaboración del Dr. Ing .Waclaw Zalewski, para desarrollar estructuras desplegadas basadas en el STT, con el objetivo de analizar la viabilidad de las estructuras transformables, procesos de fabricación, ensamble y montaje. Así mismo el comportamiento y resistencia real de estas estructuras frente a factores ambientales y desgaste de los materiales [36].

Uno de los proyectos construidos denominado Estran 1, consiste en una bóveda cilíndrica configurada con una red cuadrangular de módulos de tijeras (figura 2.33). Se diferencian tres arcos paralelos principales unidos con tijeras perpendiculares que corresponde a los radios del arco proyectado. Esta aplicación presenta diferentes aportes en cuanto a mecanismos, soluciones constructivas y sistemas de anclajes para el correcto proceso de despliegue de la estructura y el cerramiento textil (figuras 2.34 a 2.37).

De especial interés es el sistema de montaje y desmontaje que propone para facilitar el proceso de despliegue de la estructura. Se incorpora un polipasto en el centro de los arcos extremos, que permite abrir o cerrar las tijeras sin necesidad de maquinaria adicional (figura 2.38).

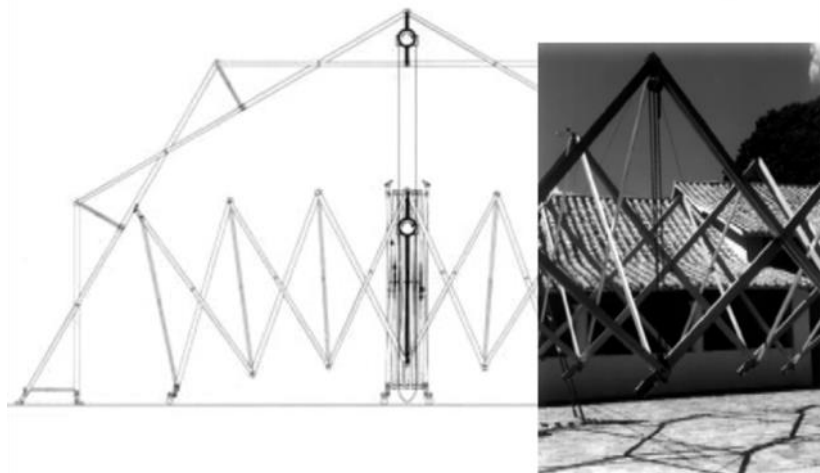


Figura 2.38 Despliegue manual usando polipastos en el eje central, arcos exteriores [36].

Posteriormente como evolución a la bóveda anteriormente descrita, Hernández desarrolla el ESTRAN 1.1 con una geométrica basada en una sección de la esfera generando una superficie sinclástica. La red de tijeras es configurada a partir de la proyección de paralelos y meridianos, se trata de cuatro arcos, compuestos por seis tijeras, que corresponden a los ejes paralelos de la esfera y los meridianos son las tijeras que se articulan perpendicularmente a las tijeras de los arcos (figura 2.39).

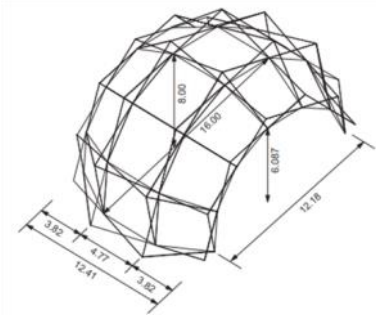


Figura 2.39 Geometría y dimensiones Estran 1.1 [36]

En el capítulo anterior se determina que este estudio aborda el tema de las estructuras desplegables a partir del sistema tipo tijera con barras rectas, no obstante se hace referencia a **Chuck Hoberman**, artista, ingeniero y arquitecto que ha desarrollado diversas aplicaciones de estructuras transformables en su mayoría con la utilización de barras anguladas.

La agrupación de este tipo de barras genera despliegues concéntricos o radiales, principalmente basados en la geometría de polígonos (figura 2.40) y poliedros que generan estructuras desplegables que describen superficies esféricas o con doble curvatura. Con esta tipología de despliegue Hoberman ha formulado diversas patentes para el diseño de domos, escenarios, esculturas y juguetes (figura 2.43).

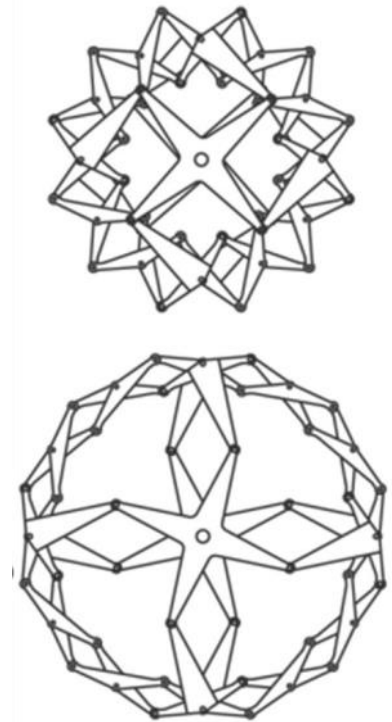


Figura 2.40 Anillo desplegable [39].

Su trabajo (1990-2012) destaca al involucrar un alto grado de tecnología en la fabricación de las piezas, diseño de nodos complejos e implementación de sistemas mecánicos automatizados pensados para permitir el pliegue y despliegue continuo de las estructuras (figura 2.41).

Como aporte a esta investigación, se estudia el diseño de los nudos propuestos en una esfera de expansión con engranajes [39]. Los nudos funcionan como piezas mecánicas que recibe y articula las barras permitiendo el movimiento coordinado de estos elementos para la expansión de la estructura (figura 2.42).

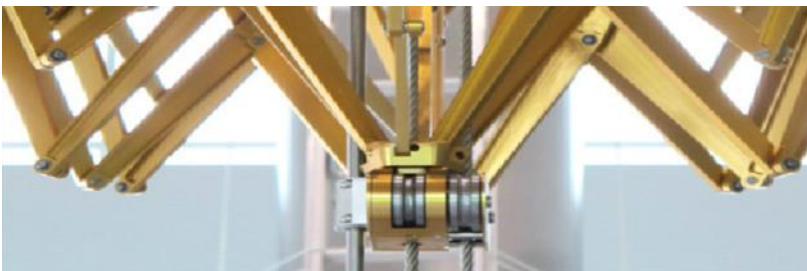


Figura 2.41 Esfera expandible. Mecanismo de cable y poleas automatizado [39].

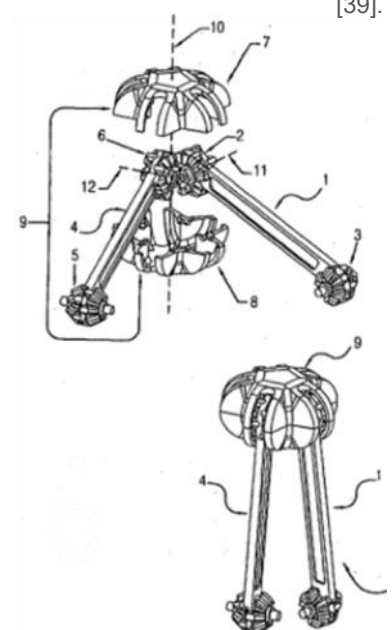


Figura 2.42 Nudo para esfera de expansión [40].

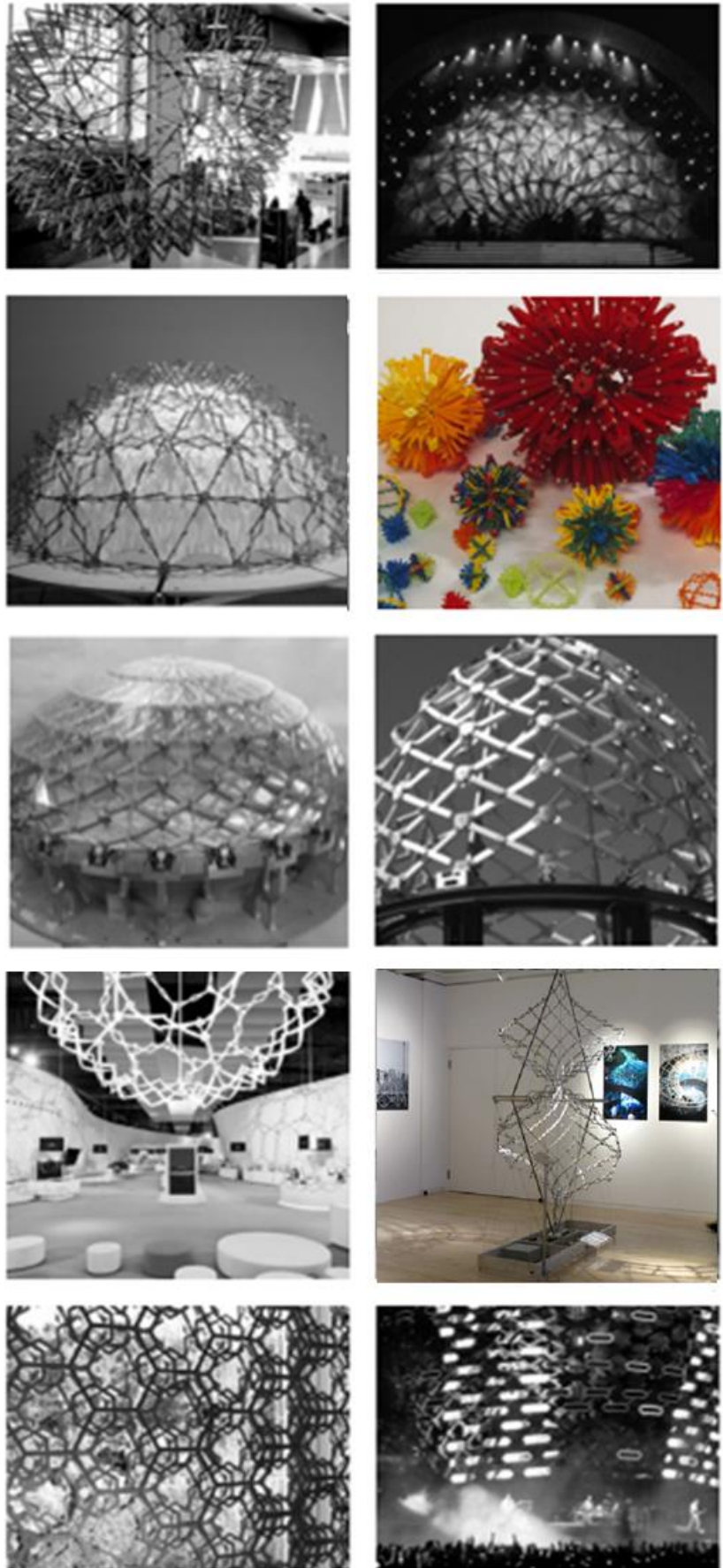


Figura 2.43 Proyectos desarrollados por Chuck Hoberman [41].

La tesis doctoral de **Jon Begiristain Mitxelena**, XXX, *Sistemas estructurales desplegados para infraestructuras de intervención urbana autoconstruidas* [6]. Propone sistemas de estructuras desplegadas que consisten en mallas cuadrangulares y triangulares basadas en el STT (figura 2.44) y el sistema que el autor denomina, nudos girados con barras individuales, donde busca obtener el mayor número de barras de igual longitud (figura 2.45).

Los prototipos de estas estructuras fueron realizados en madera microlaminada de abedul y nudos en chapa de acero cortados con láser. El proceso de despliegue se realiza manualmente apoyado con un sistema de cables para la estabilización de la estructura en su etapa final de despliegue.

El interés de esta investigación radica en el diseño y fabricación de los nudos, son piezas planas ensambladas mediante el mecanizado de pestañas insertadas dentro de aperturas específicas y fijación con tornillos, lo que permite facilitar el proceso de montaje y desmontaje. Además el diseño proporciona piezas adaptables a los componentes del nudo, para configurar diferentes tipos del mismo según la cantidad de barras que reciba, generando un innovador lego de estructuras desplegadas (figura 2.46).



Figura 2.44 Malla desplegable triangular. Sistema tipo tijera [6].

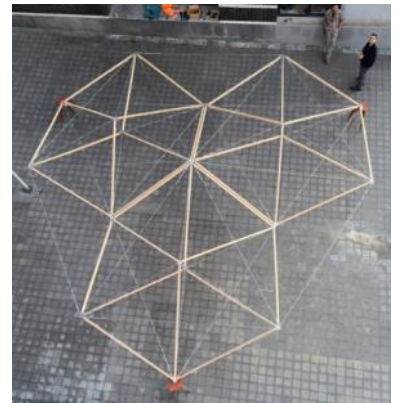


Figura 2.45 Estructura desplegable configurada a partir de nudos girados con barras individuales [6].

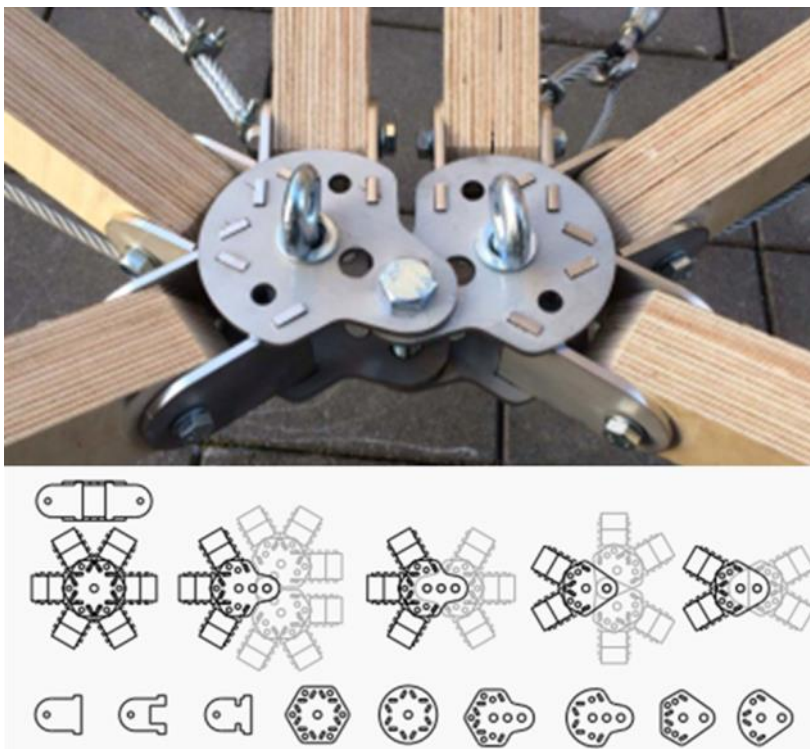


Figura 2.46 Componentes para la configuración de nudos para seis, tres y dos barras [6].

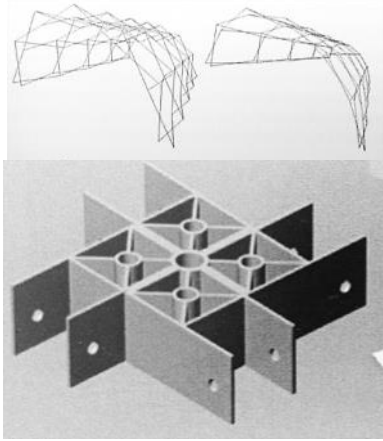


Figura 2.47 Geometría conoide para una estructura desplegable. Propuesta de nodo [69].



Figura 2.48 Prototipo de nodo para estructura desplegable [52].

En la actualidad los avances tecnológicos en los programas de diseño y cálculos de estructuras, la fabricación digital, la incorporación de la robótica en la arquitectura y la innovación en nuevos materiales han permitido que el desarrollo de las estructuras desplegables este presente en diversas universidades, explorando diferentes líneas de investigación en nuevas geometrías, mecanismos más eficientes, sistemas de fabricación, ensamble y montaje; en campos de aplicación como la ingeniería aeroespacial, las artes plásticas y el diseño industrial (figuras 2.47 a 2.51).

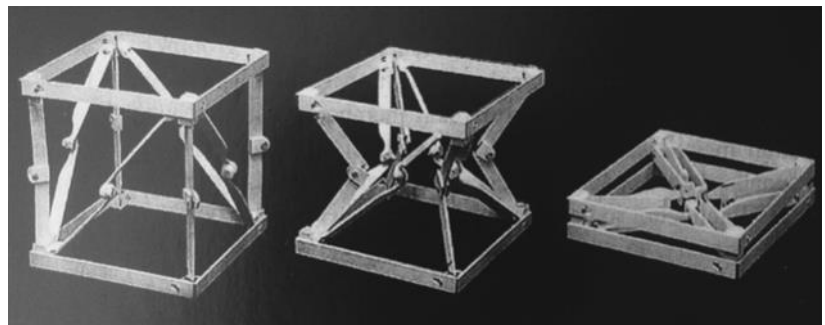


Figura 2.50 Secuencia de despliegue cubo STAC-BEAM de la NASA [11]



Figura 2.49 Silla desplegable. Diseño Yuya Ushida
Fuente: <http://www.designrefugee.org/>
Recuperado 08/09/2015

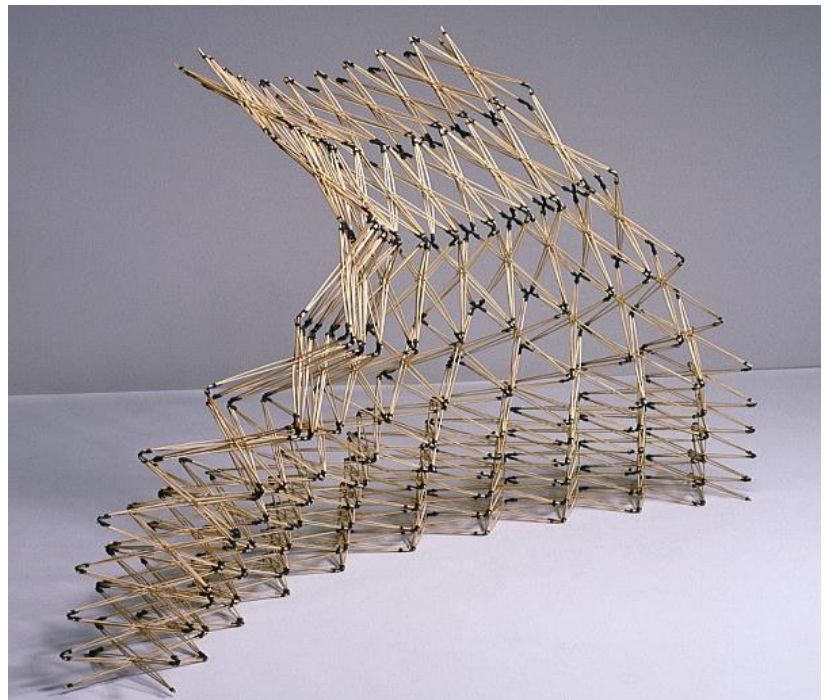


Figura 2.51 Estructura desplegable realizada con barras de bambú. Diseño Bradford Hansen-Smith [35].

2.2.2 Grupos de investigación

Los grupos de investigación científica y tecnológica contribuyen a la generación de nuevo conocimiento teórico y experimental. En el campo de las estructuras desplegables existen varios equipos de estudiantes y profesionales que han desarrollado nuevos conceptos y avances aplicados en temas específicos sobre sistemas tipo tijera que como soporte teórico aportan a la presente investigación y se hace referencia a continuación:

TRANSFORM. Es un grupo de investigación del æ-lab. Laboratorio de Investigación del Departamento de Ingeniería Arquitectónica de la Universidad Vrije, Bruselas. Es uno de los grupos de investigación más importantes con innovadores y recientes avances en su producción científica referente a estructuras ligeras y edificaciones transformables. El equipo liderado por Niels De Temmerman ha desarrollado prototipos a escala urbana tanto a nivel investigativo como a nivel comercial [119] (figura 2.52) generando además innovadores modelos geométricos a partir de la agrupación de módulos de tijera, incursionando en nuevas formas para lograr configuraciones de doble curvatura a través del diseño paramétrico (figura 2.53).

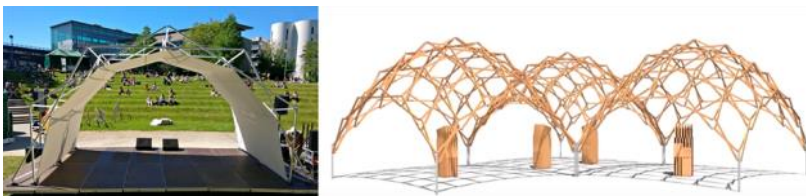


Figura 2.52 Prototipos estructuras desplegables [119].

STUDIOFLORIAN, grupo de investigación que nace en Universidad Técnica Checa. Integra las nuevas tecnologías del diseño computacional, que han surgido en la última década, como una herramienta indispensable para la modelación, la robótica, algoritmos y nuevos procesos computacionales en la etapa de diseño para estructuras no convencionales y simulación de las estructuras desplegables. Un ejemplo a destacar es la propuesta Pantograph Concept que plantea un teatro desplegable a partir del principio del pantógrafo, su desarrollo se lleva a cabo a través de sistemas de diseño paramétrico y generativos, que configuran la unidad de pantógrafo y se puede redefinir para crear diferentes posibilidades espaciales (figura 2.54).



Figura 2.53 Estructura desplegable. Geometría basada en un catenoide [72].

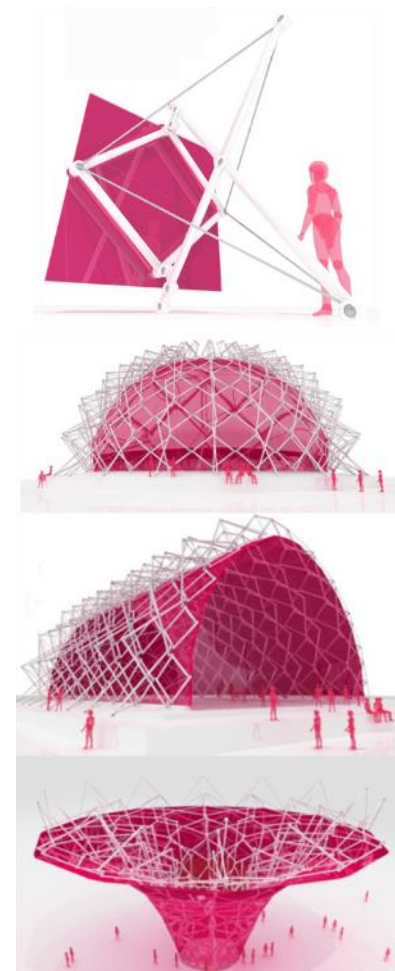


Figura 2.54 Módulo de tijera para arco - Pantógrafo. Composición de diferentes estructuras [94].



Figura 2.55 Arco desplegable para propuesta de refugios de rápido montaje, Detalle de nudo, articulación central [84].

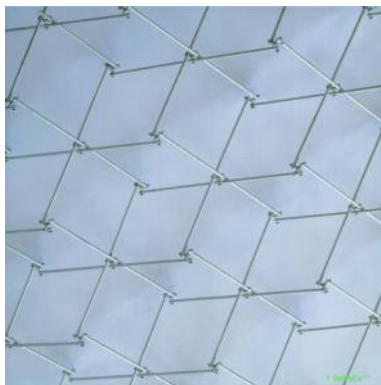


Figura 2.56 Red desplegable E.P Piñero.
Fuente: (<http://fseneca.es/secyt13/exposicion-virtual-de-d-emilio-perez-pinero/>) Recuperado [17/05/2017]

Figura 2.57 Análisis con diseño paramétrico de estructuras desplegables.

Fuente: <http://www.perezpinero.org/consultoria/> Recuperado [15/11/2018]



DEPLOYABLE STRUCTURES. Universidad de Oxford, Grupo de investigación dirigido por el profesor Zhong You que desarrolla varias investigaciones en el campo de la tecnología aeroespacial, medicina y arquitectura. Sus estudios y aplicaciones refieren a mecanismos de antenas espaciales desplegables, dispositivos médicos plegables para cirugías poco invasivas, techos retráctiles y refugios de rápido montaje a través del sistema tipo tijera.

En este último, se propone que la articulación central entre las dos barras, para conformar una tijera, sea un componente independiente que recibe los extremos de cada barra, configurando un nudo articulado que responde a los esfuerzos de flexión que se producen en este punto, correspondiente a la parte más débil de la tijera (figura 2.55).

FUNDACIÓN EMILIO PÉREZ PIÑERO junto con el Centro Superior de Estructuras Singulares promueve la investigación y aplicación de las estructuras modulares y transformables a partir de la obra del arquitecto E.P. Piñero, a través de tres pilares: La docencia, I+D+I (Investigación, Desarrollo e Innovación) y consultoría. Sus recientes avances involucra el diseño paramétrico en aplicaciones de geometrías complejas para estructuras desplegables y profundizar en el análisis del comportamiento de estas estructuras en sus diferentes etapas de despliegue (figuras 2,56 y 2,57).

SMIA. Structural Morphology in Architecture, cofundado y promovido por el autor, es un grupo de investigación perteneciente al LITA. Laboratorio de Innovación y Tecnología de la Arquitectura de la Universidad Politécnica de Cataluña, donde el presente estudio hace parte de sus líneas de investigación.

SMiA promueve la aplicación de las estructuras no convencionales: desplegables, tensegrity, recíprocas y arboriformes, a través de talleres académicos, publicaciones científicas, participación en talleres de construcción y desarrollo real del producto para el sector comercial.

En todas las áreas de estudio la elaboración de maquetas y el desarrollo del detalle constructivo son la principal herramienta para el análisis e investigación de este tipo de estructuras, donde la construcción de prototipos enfrenta al estudiante o investigador al reto del cambio de escala, al diseño de mecanismos, de detalles, al cálculo estructural, y al comportamiento real de los materiales proyectados.

En el área de las estructuras desplegables SMiA ha incorporado nuevas herramientas tecnológicas como el diseño paramétrico, la fabricación digital e impresión 3d que permiten generar procesos más eficientes en las etapas de diseño y el modelado de componentes estructurales que se materializan a nivel de prototipos (figuras 2.58 - 2.61)

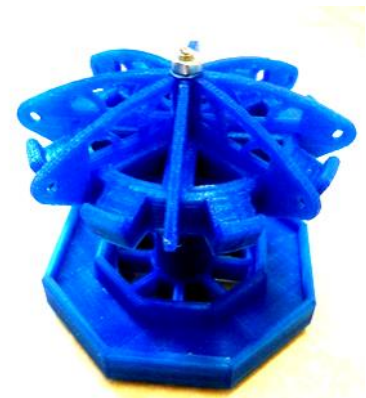


Figura 2.58 Modelo de pieza realizada con impresoras 3d. Nodo para maqueta de un domo desplegable.
Fuente: Elaboración del autor



Figura 2.59 Prototipo a escala de un escenario desplegable. Tubos de cartón, bases y suelo en madera (material reutilizado).
Fuente: Elaboración del autor

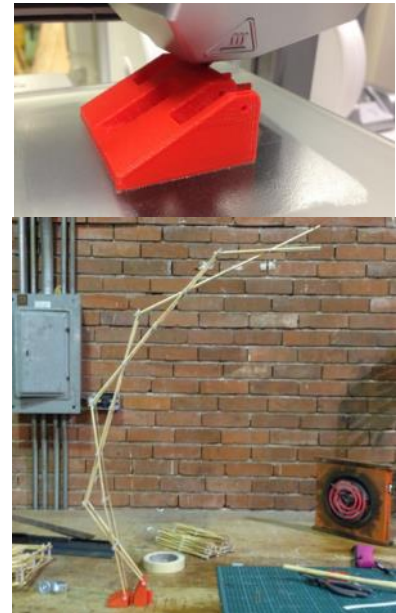


Figura 2.60 Modelo de pieza realizada con impresoras 3d. Base para maqueta de un domo desplegable.
Fuente: Elaboración del autor

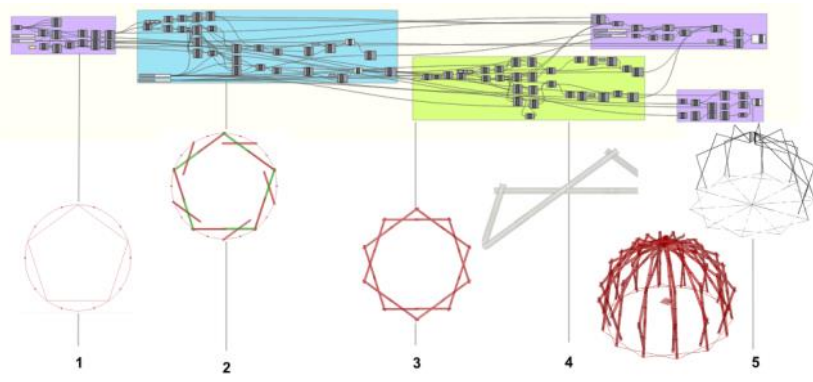


Figura 2.61 Definición paramétrica. Software Grasshopper y Rhinoceros. Geometría de domos desplegables.

1. Polígono regular inscrito en un círculo.
- 2 y 3. Segundo polígono para definir las tijeras planas.
4. Posicionamiento articulaciones.
- 5 y 6. Configuración de domos y medio domos con arcos desplegables STT.

Fuente: Elaboración del autor

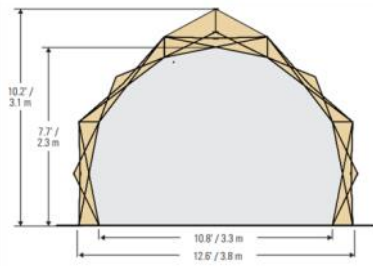


Figura 2.62 Refugios desplegados militares [108].

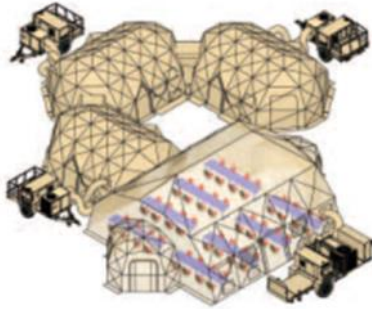


Figura 2.63 Esquema de agrupación de refugios desplegados militares [108].



Figura 2.64 Estructura refugio desplegable. Malla cuadrangular con diagonales. Sistema tipo tijera [108].



Figura 2.65 Agrupación de refugios desplegados militares [108].

2.2.3 Aplicaciones comerciales

2.2.3.1 Refugios militares y albergues

DRASH. Deployable Rapid Assembly Shelter. Son refugios desplegados de montaje rápido utilizados por las fuerzas militares estadounidenses en diferentes países. Su sistema consiste en estructuras desplegadas de diferentes tamaños configurados a partir del STT, conformando espacialidades del tipo geodésicas o bóvedas de cañón en su estado final de despliegue. Su configuración se logra en pocos minutos sin la necesidad de herramientas especiales, ni mano de obra especializada. Permite también el acoplamiento de varios refugios, logrando aldeas interconectadas para responder a necesidades de infraestructura como centros de operaciones tácticos, centros de comunicaciones, albergues o estaciones de apoyo hospitalario.

Los elementos principales de la estructura, las barras, están fabricadas con titanita, un material de alta tecnología (mineral silicato de titanio y calcio) más resistente que el aluminio que soporta las roturas en condiciones climáticas adversas. También cuenta con recubrimientos para la estructura, cubiertas y suelos en poliéster y nylon, según las normativas militares (figuras 2.62 - 2.65).

De gran interés es la información audiovisual que proporciona el fabricante, que documenta el adecuado proceso de montaje, despliegue y posteriormente la ejecución del desmontaje y empaquetamiento de la estructura. Los videos son realizados con demostraciones reales que aportan a la investigación los aspectos y condiciones a tener en cuenta en los procesos de montaje y además permiten visualizar el comportamiento de la estructura durante los procesos de pliegue y despliegue, junto con la importancia de los componentes adicionales que garantizan la estabilizan y habitabilidad de la estructura.



Figura 2.66 Proceso de despliegue, montaje y desmontaje refugio militar [108].

En la figura 2.66 se ilustra tres etapas del proceso del montaje y desmontaje, con cuatro personas que ejecutan todas las labores. Describiendo las imágenes de arriba hacia abajo, delimitada en tres paquetes de columnas, a, b y c, se observa:

(a) La estructura viene empaquetada en un bolsa textil y envuelta en una lona impermeable, que corresponde a un recubrimiento para el terreno y delimita la zona donde se sobrepone el refugio. Previamente se ha limpiado el terreno y la lona es posicionada y anclada al terreno por medio de estacas.

(b) Posicionada la estructura en el centro de recubrimiento del suelo, se procede al despliegue, tirando de cuatro puntos extremos. Cuando la estructura esta desplegada, se posicionan dos mástiles, que se acoplan a dos nudos específicos en el centro de la estructura y se levanta la estructura configurando la forma de domo. Se posiciona las bases al perímetro preestablecido y se estacan los vientos de la estructura.

(c) Para el proceso de pliegue y desmontaje, una vez se han liberado las estacas y los vientos, se procede a mover la base de la estructura hacia afuera, la cual se expande ampliando el perímetro de la misma y por peso propio la estructura cae, para ser plegada, envuelta en la lonas y finalmente empaquetada para su transporte.



Figura 2.67 Refugios desplegables [123].



Figura 2.68 Estructura principal del refugio [123].



Figura 2.69 Sistema de rigidización y bloqueo del movimiento. Arcos desplegables. [123].

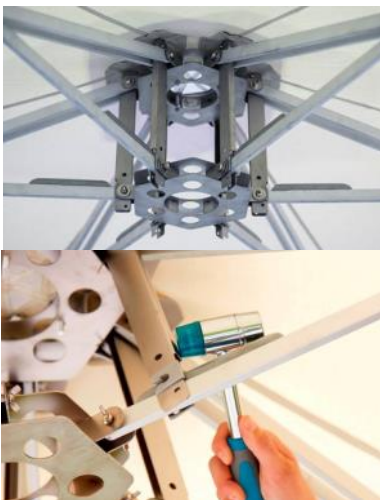


Figura 2.70 Nodo principal articulado a los arcos. Fijación y bloqueo del movimiento [123].

MTS. Morethanshelters. Daniel Kerber es el diseñador de una nueva alternativa de refugios desplegables en respuesta a crisis humanitaria en Siria. La iniciativa parte de generar refugios más resistentes y con mayor espacialidad que la carpas de camping tradicionales. Kerber proyecta un domo, similar a un iglú, a partir de la geometría de un hexágono y compuesto por seis brazos desplegables que configuran la espacialidad del domo [18] (Figuras 2.67).

Cada brazo desplegable es una estructura plana conformada por el STT. Para el proceso de despliegue, previamente se ha dispuesto una lona de recubrimiento del suelo y la estructura plegada es posicionada en el centro de la lona.

Los seis arcos posicionados radialmente según la geometría del hexágono, y articulados parcialmente al nudo central, se despliegan primero linealmente y posteriormente con poca fuerza hacia arriba y hacia el perímetro del domo. Finalmente, erguida la estructura, se aseguran los arcos al nudo en la cúspide del domo, tomando su posición definitiva y de esta forma la estructura ya es estable (figuras 2.71 y 2.72).

El sistema de montaje de la estructura, es muy similar al desarrollado en la investigación que antecede el presente estudio, donde también se plantea arcos planos desplegables que configuran domos según la geometría de polígonos regulares [88].

El sistema estructural MTS, es una aplicación de interés en sentido constructivo y social, tiene un gran avance tecnológico en el diseño de piezas y componentes estructurales para asegurar la estructura, recubrirla y acoplarla con más domos (figuras 2.69 - 2.70). Y al plantear estructuras desplegables planas que configuran una estructura espacial, a diferencia de los ejemplos vistos anteriormente, permite eliminar componentes como barras y conexiones complejas, logrando que la estructura sea más ligera.

El carácter de la aplicación y uso, dan a conocer las ventajas de las estructuras desplegables y las posibilidades espaciales que se pueden obtener para mejorar la calidad de la habitabilidad en propuestas de arquitectura temporal, y dar respuesta en forma acertada a la necesidad de implementar nuevos refugios con altas calidades de confort y espacialidad de rápido y fácil montaje.



Figura 2.71 Proceso de despliegue refugios desplegables [123].



Figura 2.72 Proceso de despliegue. Etapa de elevación de la cúspide con fuerza manual. [123].



Figura 2.74 Nudo tipo para muros desplegables. Barras sección circular.
Fuente: <http://www.expandmedia.com>
Recuperado [15/05/2014]



Figura 2.75 Bloque tipo magnético. Fuente: <http://www.expandmedia.com>
Recuperado [15/05/2014]



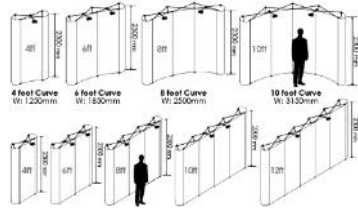
Figura 2.76 Bloque tipo click y sujeción de lona con velcro.
Fuente: <http://www.expandmedia.com>
Recuperado [15/05/2014]



Figura 2.77 Sujeción de lona. Riel Magnético.
Fuente: <http://www.expandmedia.com>
Recuperado [15/05/2014]

Figura 2.78 Proceso de despliegue muro Pop up.
Fuente: <http://www.expandmedia.com>
Recuperado [15/05/2014]

2.2.3.2 Stand Pop up



Stand Pop Up es el nombre comercial que refiere al STT que configura muros rectos o curvos desplegables principalmente para uso publicitario.

Consisten en una agrupación cuadrangular de tijeras que forma estructuras espaciales. El sistema esta ampliamente desarrollado a nivel comercial, con la posibilidad de variar sus dimensiones a tamaños estándar que se especifican según catálogo y el requisito del cliente, ajustando el número de módulos de tijeras, pero siempre manejando una escala menor referente a tamaños de pabellones o mercadillos; básicamente son sistemas estructurales ligeros de fácil montaje, con poca altura que se despliegan manualmente sin la necesidad de escaleras o andamios (figura 2.73 y 2.78).

Una estructura de muro Pop-up, esta conformada por barras en aluminio, nudos de plástico, tornillería de acero para los mecanismos de articulación y accesorios que permite estabilizar la estructura, una vez la estructura sea desplegada en su totalidad se procede a posicionar la valla publicitaria (figura 2.77). Toda la estructura se pliega y se empaqueta en una maleta transportable con ruedas (figura 2.78).

La soluciones que presentan los nudos, son piezas cuadradas diseñadas para recibir tres o cuatro barras de aluminio generalmente de sección circular que incluye un componente para rigidizar y bloquear la estructura, y de esta forma frenar el proceso de despliegue. El sistema de bloqueo, generalmente consiste en dos secciones de barra que se unen mediante sistemas del tipo magnéticos, click o anclaje por gancho. Además el nudo incorpora el sistema de anclaje para la lona publicitaria, con complementos para recibir rieles magnéticos o piezas de velcro para adherir la tela publicitaria (figuras 2.74 -2.77).

Figura 2.73 Superior. Dimensiones y variedades de muros desplegables Pop up.



2.2.3.3 Plataformas de elevación tipo tijera

Son maquinas móviles destinada a la elevación de personal operativo a zonas de trabajo en alturas. Su campo de aplicación refiere al mantenimiento de fachadas, cubiertas, poda de arboles, control de redes eléctricas aéreas y actividades varias que requieran trabajos en altura. Pueden utilizarse tanto en interior como al aire libre según se requiera (figura 2.79). Una plataforma de elevación tipo tijera se compone de tres elementos: la plataforma de trabajo, la estructura extensible (estructura tipo tijera) y el chasis [60].

De interés para esta investigación, se identifica los mecanismos necesarios para el correcto funcionamiento y despliegue de la agrupación de tijeras. El chasis es la base donde se apoya la estructura y su longitud corresponde al paquete plegado de las tijeras, contiene los rieles para el desplazamiento lineal de las ruedas o patines del primer módulo tijera, que permite la apertura de esta y trasladar el movimiento a las demás tijeras superiores que se articulan mediante pasadores y así obtener el despliegue del conjunto. Las barras de las tijeras son perfiles rectangulares huecos con dimensiones que se ajustan según la capacidad y modelo de la plataforma. La fuerza necesaria para elevar la estructura la ejerce un cilindro hidráulico articulado a la primera tijera y a la siguiente tijera no consecutiva, cuando se trata de más de dos módulos de tijera.

Para una mayor estabilidad a la hora del despliegue, la estructura es planteada con una doble capa de tijeras y conectadas entre ellas por medio de pasadores o travesaños estructurales. El ancho de la estructura oscila entre 1.15 m y 1.75 entre los modelos de mayor tamaño (figura 2.80). Este sistema estructural permite reducir el riesgo de vuelco cuando la estructura esta desplegada. También, algunos modelos de plataformas incorporan sistemas de nivelación en caso de encontrar situaciones de terrenos desfavorables, estos permiten garantizar la seguridad del operario y de la estructura durante el proceso de despliegue y uso.

Existen también modelos de plataformas industriales que incorpora solo uno o dos módulos de tijera con diseño de geometrías diferentes en las barras. En la figura 2.81 la barra tipo que compone el STT, corresponde a una lamina de acero de algún espesor calculado, pero la geometría longitudinal se amplía en el área de la articulación central, respondiendo a los esfuerzos que allí se producen.

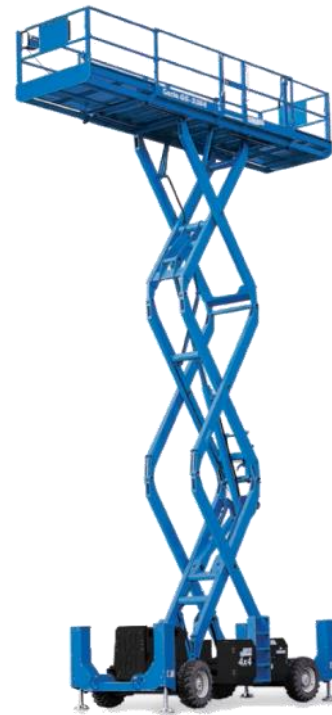


Figura 2.79 Plataforma de elevación tipo tijera.

Fuente: <http://vertical.ie/diesel-scissor-lift-hire/>
Recuperado [24/04/2015]

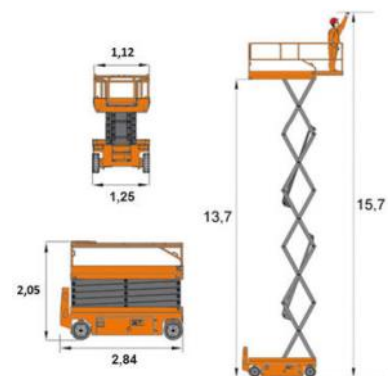


Figura 2.80 Dimensiones plataforma modelo Dingli JCPT1612DC

Fuente: <http://instant.as/Products/Lifts/Scissor-lifts/Self-drive/Dingli-JCPT1612DC-scissor-lift>
Recuperado [25/04/2015]



Figura 2.81 Plataforma industrial con dos módulos de tijera.

Fuente: http://www.metalsystem.es/wp-content/uploads/catalogo_plataformas_en.pdf
Recuperado [24/04/2015]

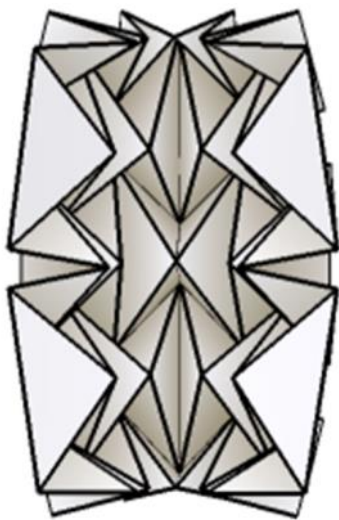


Figura 2.105 Modelo digital obtenido en plataforma Software Rigid Origami.
Fuente: <http://www.tsg.ne.jp/TT/software/>
Recuperado [12/03/2017].

2.3 Cerramientos para las estructuras desplegadas tipo tijera

En este apartado se describen las investigaciones y propuestas que desarrollan soluciones para cubrir estructuras desplegadas tipo tijera a través de elementos rígidos o deformables, concretamente sistemas basados en la técnica del origami en paneles rígidos y cubiertas textiles. Ambos sistemas estudiados previamente por el autor para aplicarlos como plataformas plegables y membranas en un escenario desplegable, continúan siendo una alternativa para extender su estudio y analizar la compatibilidad de estos sistemas con nuevas geometrías de estructuras desplegadas tipo tijera [90] (figuras 2.82 y 2.83).

2.3.1 Paneles rígidos-Origami

La técnica del origami, conocida también como papiroflexia es el arte de plegar el papel sin tijeras ni pegamento, para configurar nuevas formas geométricas en dos y tres dimensiones [63]. Esta técnica ha tomado popularidad en diferentes áreas de aplicación gracias a los avances de la computación, permitiendo retomar los principios del plegado para obtener estructuras con ventajas como la portabilidad y la transformación, generando nuevos diseños aplicables en la ingeniería espacial, las artes plásticas, el diseño industrial y arquitectónico.

A continuación se especifican los principales investigadores que han estudiado y aplicado el arte del origami al diseño en diferentes áreas especializadas y que por su interés aportan al presente estudio.

2.3.1.1 Principales investigadores técnica origami

Koryo Miura en 1970 desarrollo el método de plegado Miura-ori (ori = plegado) que consiste en plegar una superficie plana en un paquete más pequeño. La superficie es geometrizada a partir de una teselación de paralelogramos, configurando valles y crestas, que con un solo movimiento tirando de las esquinas opuestas de la superficie, se obtiene el despliegue total de la superficie y de la misma forma con el movimiento contrario, al acercar los extremos, se logra plegar nuevamente la superficie (figura 2.84).

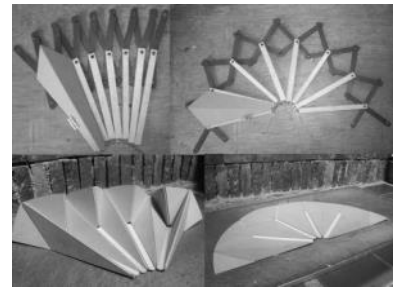


Figura 2.82 Maqueta propuesta plegadura de piso [90].
Fuente: Elaboración del autor

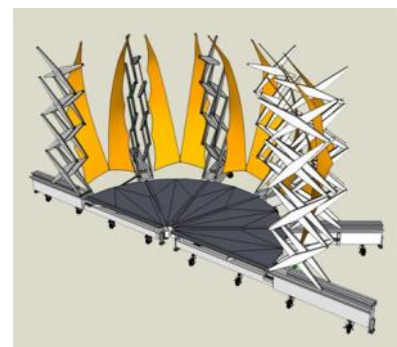


Figura 2.83 Modelo 3D, propuesta de membrana para arcos desplegable [90].
Fuente: Elaboración del autor

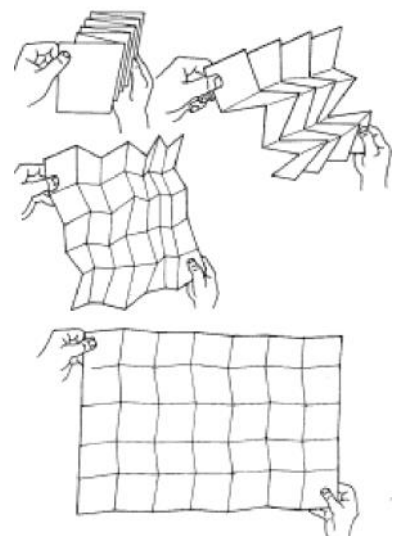


Figura 2.84 Método de plegado Miura-ori [4].

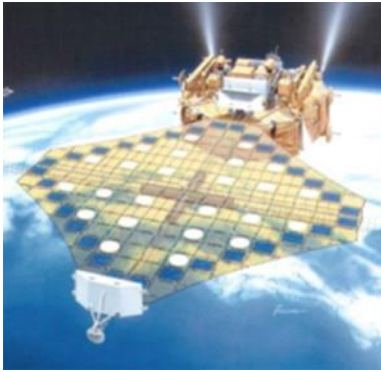


Figura 2.85 Panel solar plegable. Miura ori [8].

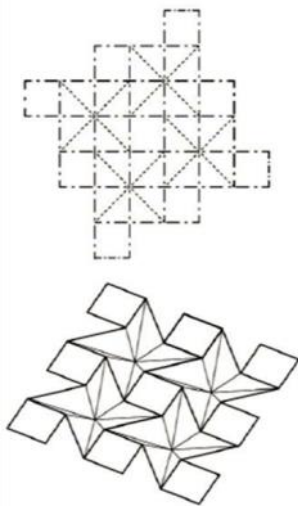


Figura 2.86 Patrón plegable cuadrangular en estado plano y plegado. Ron Resch [14] y [130].



Figura 2.88 Maqueta combinada de origami y sistema tipo tijera. Daniel MacGibbon.
Fuente <https://hiveminer.com/Tags/hoberman.origamiFigura>
Recuperado [15/05/2018]

En 1995 este concepto fue utilizado por científicos japoneses para el diseño de una antena espacial, compuesta por paneles solares (figura 2.85). El sistema permite compactar en un paquete la totalidad de la antena para facilitar el transporte dentro del cohete y desplegarse en un solo movimiento en el espacio mediante la activación de un solo motor. La misión espacial llamada Space Flight Unit (SFU) tuvo gran éxito y sigue siendo un precedente para posteriores desarrollos en tecnología aeroespacial.

Ron Resch, artista y científico desarrolló una variedad de innovadoras estructuras en papel con el arte del origami. Su método consiste en configurar geometrías a partir de un patrón de polígonos adyacentes a un polígono base y pliegues que generan valles y crestas para transformar la estructura (figuras 2.86 y 2.87). Su objetivo no era lograr una superficie plana en la etapa final de despliegue, sino explorar y analizar los diferentes tipos de teselaciones y transformaciones que obtenía con este método. Sus propuestas permiten generar una proyección a nivel estructural para aplicarlas en espacios arquitectónicos y relacionarlas con el sistema tipo tijera como una estructura ideal de soporte, que se acopla a la transformación de las estructuras plegables tipo origami (figura 2.88).

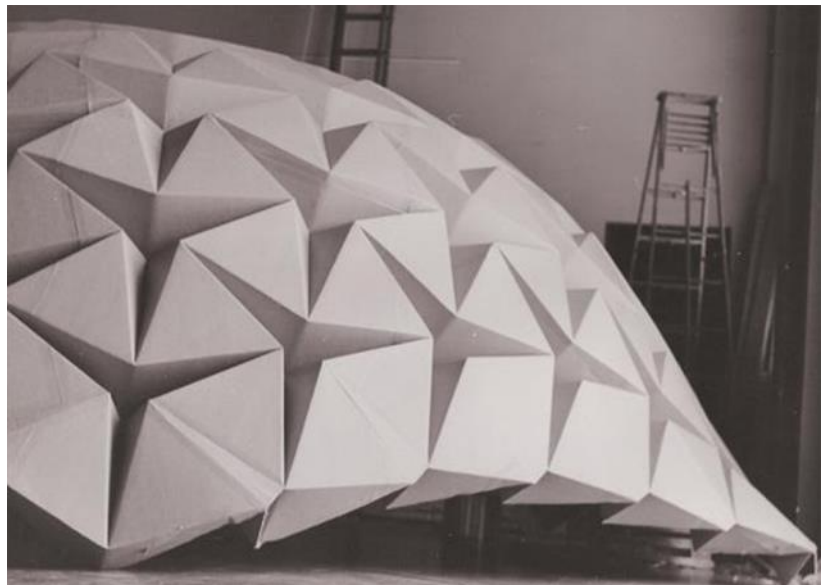


Figura 2.87 Patrón plegable triangular. Ron Resch.
Fuente: <http://www.ronresch.org/ronresch/gallery/paper-folding-origami/>
Recuperado [24/05/2018]

Emilio Pérez Piñero por en cargo de Dalí, en 1971 diseña una estructura plegable para cerrar la boca del escenario Teatro-Museo del artista, con dimensiones de 18 x 10 metros (figura 2.89). Para ello propone una estructura vertical compuesta por su sistema de barras articuladas, que conforman los módulos de aspas (figura 2.21), lo innovador de esta propuesta, es la implementación de paneles de vidrio que se despliegan conjuntamente con la estructura (figura 2.90). Puertas del Rio [71] describe que:

Durante el movimiento de plegado, cada dos paneles adyacentes unidos por sus bisagras forman un diedro saliendo hacia afuera del plano que forman, recorriendo de la posición 180° a la 0°. Al mismo tiempo el borde unido al brazo de sujeción va siendo girado desde su posición vertical a la horizontal por el movimiento de estos brazos sujetos a los nudos de la estructura, en un movimiento simultáneo. Durante el movimiento los paneles describen planos en zigzag y en la posición de plegado cuelgan hacia el suelo como banderolas, solapándose uno de otro. (p. 322)

La estructura se soporta con un elemento tipo cruz construido por perfiles metálicos [71], sobre estos perfiles metálicos se posicionan los mecanismos de motor, el tornillo sin fin y engranajes que permiten el despliegue de la estructura (figura 2.91).

En cuanto a los mecanismos específicos para el plegado de los paneles, la figura 2.92, señala los brazos articulados que sujetan los paneles con los módulos de aspas, las pletinas y las bisagras como accesorios mecánicos de conexión entre elementos, que permiten el plegado de los paneles en concordancia con el movimiento de los módulos haces.



Figura 2.89 Dalí y Pérez Piñero fotografiados por Marc Lacroix en París. Maqueta vidriera hipercúbica desplegable. Fuente <http://blogs.laverdad.es/microhistorias/2014/02/05/el-amigo-calasparreno-de-dali/> Recuperado [15/04/2018]

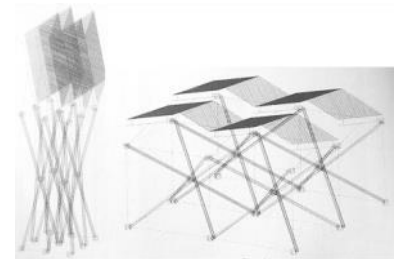


Figura 2.90 Modelo 3D vidriera hipercúbica desplegable. Posición plegada y desplegada [13]

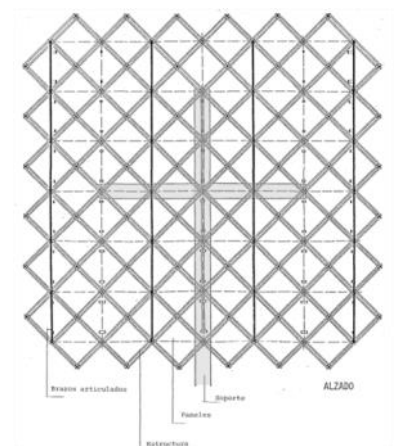


Figura 2.91 Soporte estructura en cruz [71]

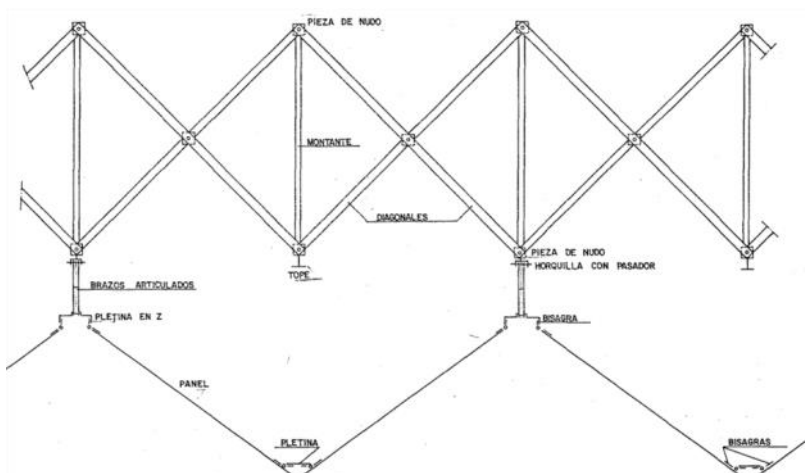


Figura 2.92 Detalle mecanismo de anclaje de estructura desplegable con paneles plegables [71]

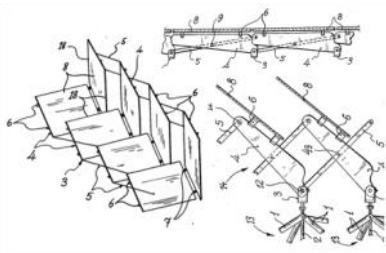


Figura 2.93 Patente sistema de paneles articulados [68].

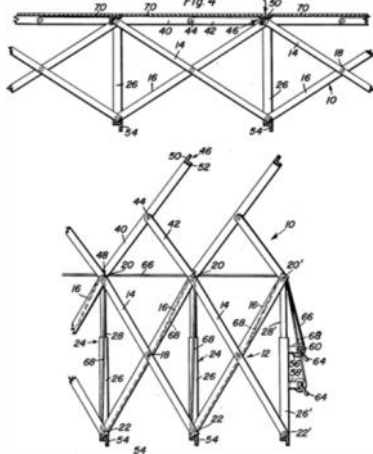


Figura 2.94 Patente viga plegable [17].

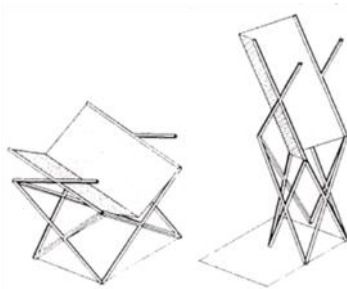
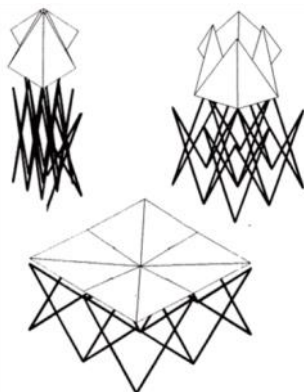


Figura 2.95 Módulo de panel plegable agrupación cuadrangular. Basado en el sistema de Piñero [66].

Figuras 2.96 y 2.97 Cubiertas desplegables a partir de paneles triangulados [25] y [66].

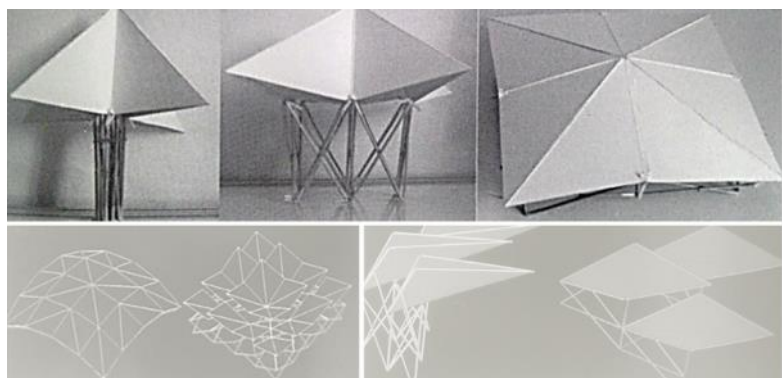


A partir de esta propuesta Piñero presenta la Patente US 3975872 A registrada como “System of articulated planes” desarrollando con mayor detalle el sistema de plegado entre paneles (figura 2.93). Seguramente basado en una anterior patente de Williams Dale R [17], la cual cita, donde se propone estructuras desplegables tipo tijera con el sistema de paneles y mecanismos de barras telescópicas, cables y poleas (figura 2.94).

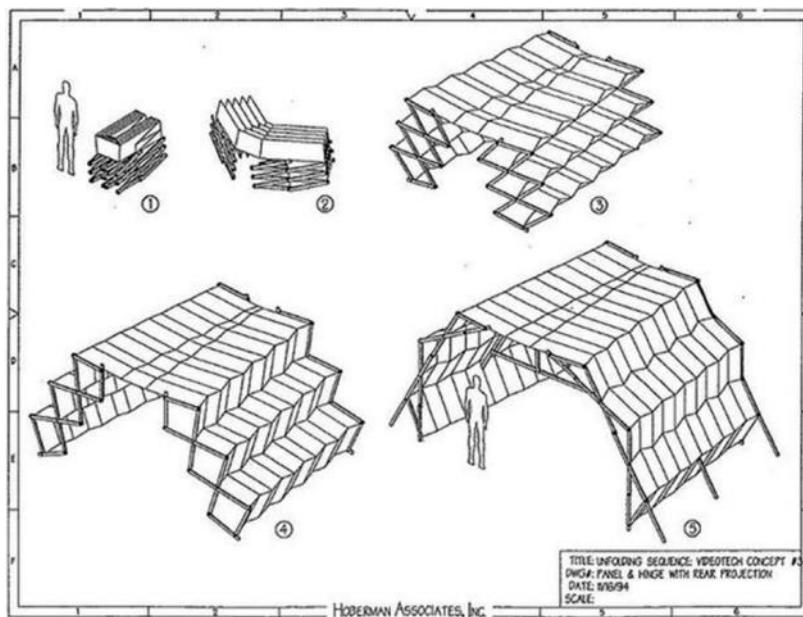
Félix Escrig junto con el arquitecto **Juan Pérez Valcárcel** exploraron la combinación de estructuras desplegables STT con paneles articulados, buscando obtener un despliegue simultáneo entre barras y paneles, para generar nuevas posibilidades de cubiertas desplegables y analizar las incompatibilidades durante los procesos de pliegue y despliegue.

Escrig y P. Valcárcel proponen completar el sistema presentado por Piñero, adaptando los paneles para superficies cilíndricas y esféricas [25]. El proceso de despliegue para redes desplegables cuadrangulares funciona mediante un sistema de travesaño auxiliar sobre los módulos tijeras, el cual soporta cada panel y permite que el panel se posicione de forma inclinada en estado plegado y horizontal en estado desplegado [66]. Para lograr que el panel se despliegue en el otro sentido se utiliza el mecanismo tipo bisagra (figura 2.95)

También desarrollaron otras geometrías de plegado basadas en la triangulación de los paneles de cubierta, proponiendo como línea de pliegue, la diagonal de una agrupación de tijeras que forman una red cuadrangular. También propusieron sistemas de solape de planos para aplicarlos en superficies de doble curvatura y cubiertas en voladizo, implementados en agrupaciones de tijeras que forman módulos triangulares, los cuales soportan los paneles independientes que se pliegan por la mitad (figuras 2.96 y 2.97).



Chuck Hoberman con su amplio desarrollo en estructuras desplegables tipo tijera, proyecta un sistema de cerramiento con paneles rígidos a una estructura desplegable que configura una bóveda de cañón, el objetivo es lograr un despliegue simultáneo entre la estructura y el cerramiento. Aunque no fue construida y no existe documentación sobre los mecanismos o detalles constructivos sobre esta propuesta, existe una lámina con esquemas que describen el proceso de despliegue de la estructura (figura 2.98). Se observa que la totalidad de plegadura está compuesta por cuadriláteros que se articulan al segmento exterior de las barras de la tijera. Las líneas de las crestas en la plegadura, corresponden al pliegue donde se unen los módulos de tijera y los valles corresponden a la articulación central entre barras. Para obtener un paquete más compacto a la momento de plegar la estructura, plantea que la bóveda de cañón este dividida en dos secciones longitudinales, para poder doblar la estructura total por la mitad junto con la plegadura de cubierta.



Niels De Temmerman propone un mecanismo para una estructura desplegable compuesta con barras articuladas, que configuran planos de triángulos y cuadriláteros, estos forman la estructura espacial plegable para aplicaciones de refugios. El mecanismo principal consiste en un nudo abisagrado compuesto de seis partes que articula los marcos que contiene los planos [19]. De esta forma logra un movimiento de plegado compatible con los componentes que la conforman (figura 2.99).

Figura 2.98 Estructura plegable.
Hoberman Associates, Inc 1994.
Foto de Daniel Kwan en Flickr .

Fuente: <https://www.flickr.com/photos/8303956@N08/3797087560/>
Recuperado [15/06/2018]

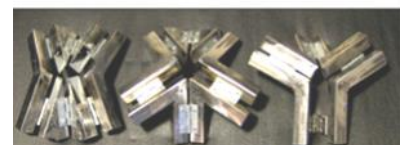
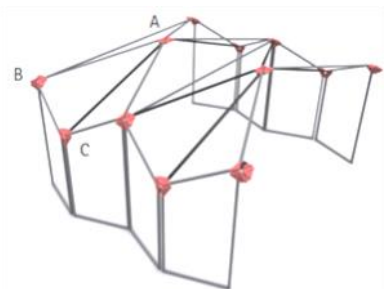


Figura 2.99 Nudo. Mecanismo de bisagras para la de articulación entre planos [19]

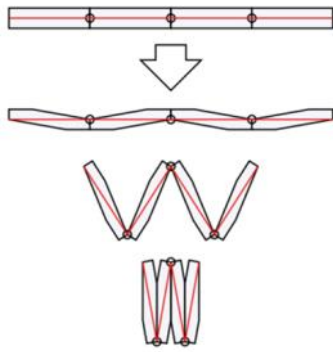


Figura 2.101 Modificación de la geometría del espesor del panel para el plegado [82].

Para analizar su viabilidad constructiva, el nodo es fabricado con perfiles de aluminio y articulados por medio de bisagras tipo libro. Aunque el prototipo realizado de la estructura funciona y se obtiene un correcto proceso de despliegue (figura 2.100), la fabricación y ensamble del nodo describe cierto grado de complejidad.



Figura 2.100 Proceso de despliegue estructura barras articuladas [19].



Figura 2.102 Panel de origami rígido. 2.5m x 2.5m.
Foto de Tomohiro Tachi en Flickr.
Fuente: <https://www.flickr.com/photos/tactom/>
Recuperado [17/03/2018].

Tomohiro Tachi investiga y diseña estructuras plegables tipo origami implementando componentes rígidos, en sus propuestas analiza el espesor de los paneles variando la geometría de los mismos, buscando la manera más eficaz de obtener un plegado óptimo (figura 2.101).

Entre las soluciones desarrolladas por Tachi, en vez de incorporar mecanismos tipo bisagra entre los paneles, añade un material textil entre una doble capa de paneles, los paneles se disponen uno al lado de otro con la geometría definida, pero con la separación suficiente para que el textil funcione como bisagra flexible y se pueda plegar la estructura (figura 2.102).

Existe una variación de esta propuesta, donde se emplea la tecnología de vacío Vacuumatics; el material textil que funciona como bisagra, es remplazado por una membrana inflable y mediante el proceso de extracción de aire se puede volver más rígido o más flexible la articulación entre paneles [82], lo que permite generar el movimiento de pliegue o despliegue de la estructura (figura 2.103).

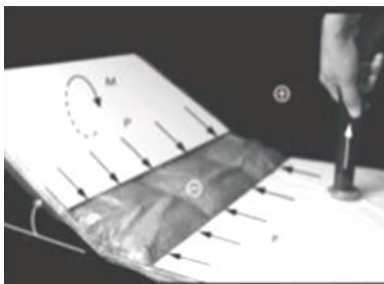


Figura 2.103 Prototipo de paneles plegables con bisagra tipo Vacuumatics [82].

En otros estudios Tachi explora la geometría de estructuras laminares prismáticas con cartón, un material no tan rígido, para configurar con nuevas teselaciones de pliegues estructuras espaciales, similar a una viga Vierendeel pero con geometría irregular. En esta tipología de estructuras, se opta por eliminar material de las juntas entre paneles en puntos específicos para facilitar el proceso de pliegue (figura 2.104).

Entre los principales aportes de Tomohiro Tachi está el desarrollo de programas de simulación para interactuar con las formas del origami, con diferentes tipologías de teselaciones y visualizar los procesos de plegado.

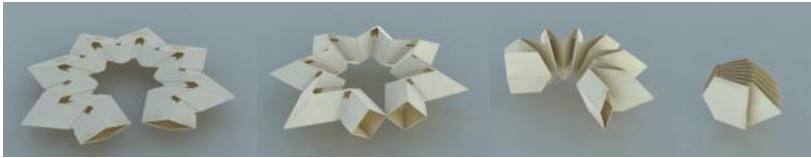


Figura 2.104 Arco tipo tubo con paneles rígidos. Foto de Tomohiro Tachi en Flickr.

Fuente: <https://www.flickr.com/photos/tactom/>
Recuperado [23/06/2018]

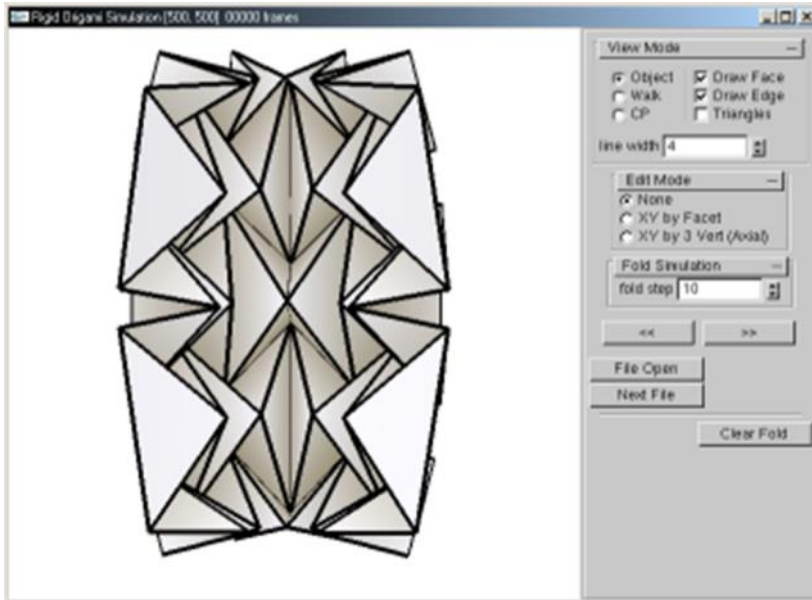


Figura 2.105 Plataforma Software Rigid Origami.

Fuente: <http://www.tsg.ne.jp/TT/software/>
Recuperado [23/06/2018]

El software Rigid Origami, permite definir la líneas de crestas y valles en una superficie plana, simulando e interactuando con las diferentes fases de plegado. El programa calcula la trayectoria del doblado proyectando ángulos de movimiento al espacio restringido [82], lo que ayuda al usuario a entender mejor el modelo y ejecutar el correcto doblado (figura 2.105).

Entre los maquetas realizadas por Tachi, se considera de interés la figura 2.106, aquí utiliza paneles en aluminio articulados por bisagras mecánicas tipo libro, continuas en algunas aristas o seccionadas en dos tramos en las demás aristas; los tornillos, que son el mecanismo de unión entre el panel y la bisagra, permiten una sujeción resistente y el correcto plegado de la estructura, aunque al sobresalir los tornillos en la superficie del panel, pueden generar interferencia entre otros componentes al momento de plegarse la estructura.

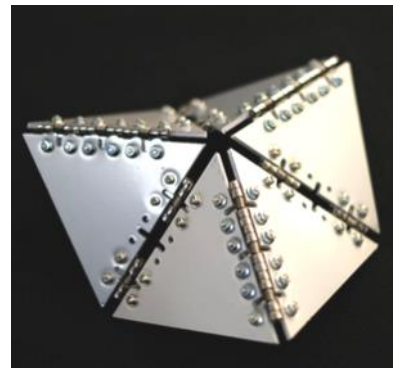


Figura 2.106 Estructura plegable. Paneles de aluminio articulados con bisagras.

Foto de Tomohiro Tachi en Flickr.
Fuente: <https://www.flickr.com/photos/tactom/>
Recuperado [25/06/2018]

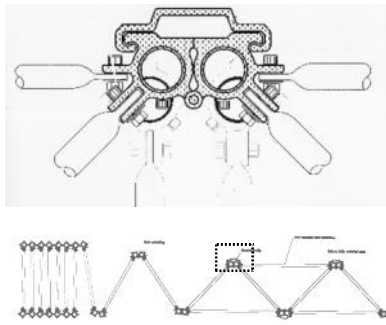


Figura 2.108 Detalle nudo de celosía plegable [15].

2.3.1.2 Aplicaciones

Los siguientes ejemplos ofrecen una visión general de sistemas con plegaduras móviles integrados al diseño arquitectónico e industrial, son aplicaciones construidas que incorporan conceptos inspirados en el origami, empleados en el diseño de fachadas dinámicas, mobiliario transformable y pabellones plegables entre otros.

El pabellón de Venezuela en la Expo'92 de Carlos Hernández junto con Waclaw Zalewski proyectan una gran estructura abisagrada. La estructura consiste en dos partes, cada una de ellas conforma una celosía espacial compuesta por vigas reticuladas y paralelas entre ellas. Las vigas se articulan longitudinalmente entre sí, para permitir que el paquete completo de cada celosía se pliegue como un acordeón (figura 2.107).

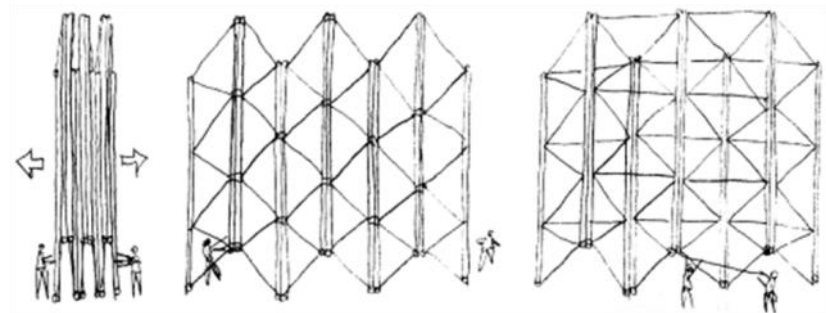


Figura 2.107 Proceso de despliegue de celosía [38].

Para obtener el plegado de la estructura, se diseña un nudo articulado que enlaza las parejas de vigas por medio de un pasador longitudinal, técnicamente igual que el mecanismo de una bisagra tipo libro. El diseño del nudo incorpora en su geometría el tope máximo de apertura, que sucede cuando se encuentran horizontalmente las dos vigas reticuladas y de esta forma no pueden abrirse más. El sistema es asegurado con un accesorio adicional, que consiste en un riel protector que se ajusta al nudo y restringe el movimiento de giro entre vigas e incorpora la conexión de otros perfiles (figura 2.108).

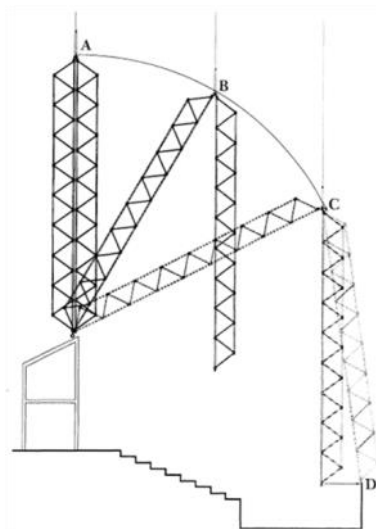


Figura 2.109 Proceso de montaje de la estructura [38].

Para el montaje de la estructura, previamente se izan y despliegan las dos celosías, se fijan una de ellas a la base, se procede a conectar la segunda celosía a la primera de tal forma que sea abatible y finalmente se posiciona la segunda celosía en el ángulo previsto. La estructura es asegurada y rigidizada con elementos transversales (figura 2.109).

Kiefer Technic Showroom con el slogan “Más que solo una fachada” es una propuesta arquitectónica que proyecta el equipo de arquitectos Ernst Giselbrecht + Partner ZT GmbH en 2007. Consiste en un edificio de oficinas tradicional, que incorpora el uso de la tecnología para el diseño de una fachada plegable automatizada [116].

La fachada se compone de 14 hileras de paneles longitudinales sucesivos, compuestas cada una por ocho módulos rectangulares (figura 2.110). Para obtener el movimiento de plegado, los módulos se articulan en pares, a través de sus lados más largos y por medio de un pasador, el cual enlaza a ambos módulos por medio de un mecanismo abisagrado integrado en el marco de la estructura de cada módulo (figura 2.111).

Articulados los módulos, estos pueden plegarse gracias a los soportes de la estructura de fachada, que cumple la función de rieles para permitir el desplazamiento lineal de los módulos durante los procesos de pliegue y despliegue. Los rieles reciben los rodamientos posicionados a cada lado del módulo hacia el extremo opuesto a la articulación abisagrada (figura 2.112).

El sistema activado por motores eléctricos genera múltiples posibilidades de transformación de la fachada ya que el movimiento de plegado de cada par de módulos es independiente al conjunto .

Las Torres Al-bahr en Abu Dhabi, resaltan por su diseño de fachada dinámica. Consiste en paneles triangulares plegables, específicamente triángulos equiláteros, posicionados para configurar la geometría de un hexágono, reinterpretando la geometría de los diseños islámicos utilizados en los patrones de celosías tradicionales árabes (figura 2.113).

El movimiento de plegado inspirado en un paraguas de papel y la técnica del origami (figura 2.114), define cada panel triangular en seis secciones triangulares, cada par de secciones triangulares se pliegan como bisagras, para permitir la entrada de luz.

El movimiento se logra gracias a la fuerza ejercida por un actuador que impulsa un pistón, posicionado en el centro del panel, el actuador se extiende para plegar cada panel triangular y se contrae para desplegar el panel [46].



Figura 2.110 Fachada plegable edificio Kiefer Technic Showroom.
Fuente: <http://www.plataformaarquitectura.cl/02-35147/fachada-kiefer-technic-showroom>
Recuperado [17/07/2018]

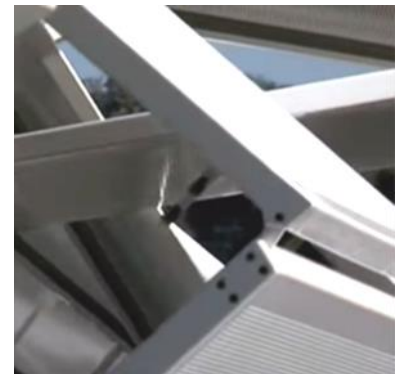


Figura 2.111 Mecanismo de bisagra, paneles articulados. Kiefer Technic Showroom [33].

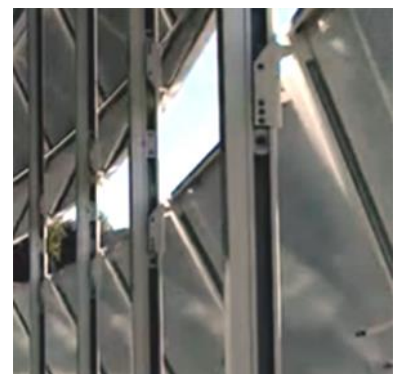


Figura 2.112 Rieles para desplazamiento de paneles articulados. Kiefer Technic Showroom [33].



Figura 2.113 Torres Al-bahr en Abu Dhabi [46].

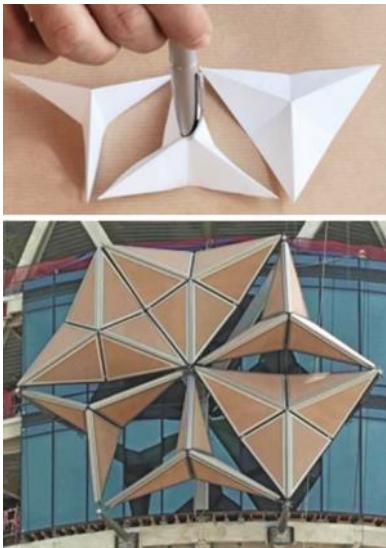


Figura 2.114 Principio de origami para el diseño del panel. Ensamble de paneles en la estructura fachada [46].

Figura 2.116 Detalle de articulación entre paneles. Riel y junta flexible. Foto de Taflin Laylin.

Fuente <http://inhabitat.com/exclusive-photos-worlds-largest-computerized-facade-cools-aedas-al-bahr-towers/al-bahar-towers-2> Recuperado [21/07/2019].

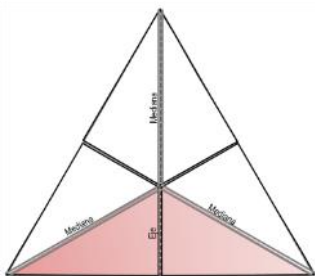


Figura 2.117 Triángulo equilátero. Fuente: Elaboración del autor

Se observa en la figura 2.115 todos los componentes y mecanismos que integra el sistema de panel.

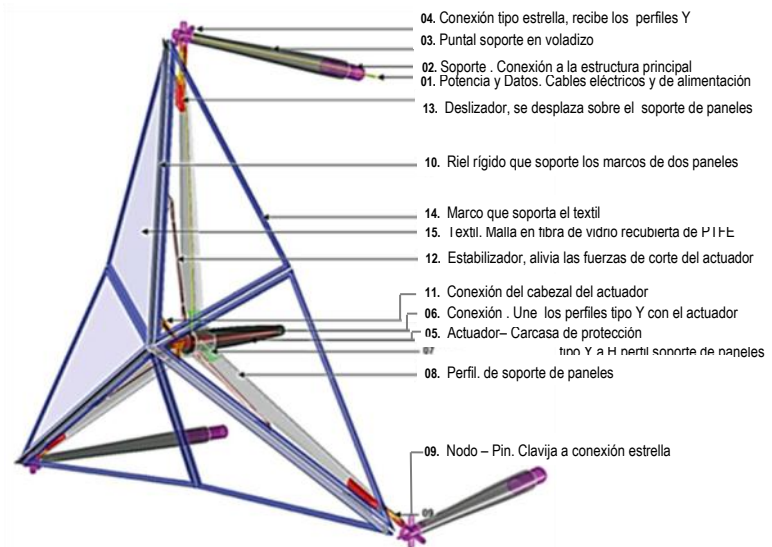


Figura 2.115 Componentes panel plegable [46].

En un panel triangular, se distinguen dos tipos de articulaciones entre las subdivisiones de paneles. Para señalarlas, se toma como referencia las medianas del triángulo equilátero y el eje simétrico de los triángulos isósceles formados a partir del trazado de las medianas, que generan dos mitades de triángulos rectángulos (figura 2.117).

Las medianas son un riel rígido que sujeta el lado más largo de los triángulos rectángulos y permite el plegado total entre paneles, es decir, se posicionan uno al lado del otro como un sistema de bisagra cerrada. Y el eje, corresponde a una junta flexible, que no permite que se separen las dos mitades del triángulo isósceles y puedan generar el movimiento de plegado sin incompatibilidades con el resto del sistema (figura 2.116).



Finalmente para lograr un diseño optimizado, la correcta ejecución y automatización de la fachada, el equipo de diseño AEDAS, conto con desarrolladores de software, programadores, administradores de BIM y especialistas computacionales en diseño paramétrico para introducir parámetros variables como la luz, el viento y temperatura, y de esta forma diseñar una fachada transformable que es capaz de reaccionar mediante sensores a las condiciones climáticas del lugar en tiempo real.

El **Resonant Chamber**, es un panel acústico que se modifica para reflejar o absorber el sonido generando las condiciones acústicas ideales en un espacio interior [16]. Su geometría y proceso de plegado similar al ejemplo anterior de la fachada de las torres Al-Bahr, es una aplicación a menor escala sobre sistemas de plegabilidad móviles (figura 2.118).

En este caso, el patrón geométrico para el conjunto de paneles consiste en la agrupación de dos tipos de triángulos, triángulos que se pliegan y triángulos planos, la composición geométrica esta basada en el método de Ron Resch (figura 2.87).

Retomando de nuevo los ejes de referencia del triángulo equilátero, que dividen en dos partes a los triángulos isósceles, generados por la medianas (figura 2.117). El mecanismo para que los paneles se plieguen consiste en dos pistones que articula estas dos partes de triángulos rectángulos, los cuales se activan según los parámetros acústicos cargados al sistema automático, que controla el movimiento del panel (figura 2.119).

La junta para el movimiento de bisagra es un material flexible que se encuentra en una capa intermedia entre las capas que componen el panel y el espesor de los paneles es diseñado como un borde biselado para garantizar el correcto plegado, generando un proceso sin obstrucciones durante el movimiento (figura 2.120 y 2.121).



Figura 2.118 Panel acústico plegable [16]



Figura 2.119 Mecanismo de pistones para el plegado del panel [16]



Figura 2.120 Componentes y ensamble Resonant Chamber. [16]



Figura 2.121 Etapas de despliegue [16]



Figura 2.123 Bisagra plana tipo libro. Fuente: <https://www.facebook.com/pg/robertvanembricqs/photos/> Recuperado [15/07/2018]



Figura 2.124 Bisagra flexible. Caucho entre las laminas de bambú. Fuente: www.facebook.com/pg/robertvanembricqs/photos/ Recuperado [15/07/2018]



Figura 2.125 Pempén: Módulo transformable. Pontificia Universidad Católica del Perú. Fuente: <http://www.archdaily.pe/pe/797538/pempen-modulo-transformable-para-la-selva-por-estudiantes-peruanos> Recuperado [17/07/2018]



Figura 2.126 Solar Power. Etapa final e inicial de plegado [50].

Rising es la gama de mobiliario y productos en bambú laminado diseñada por el holandés Robert van Embricqs, sus propuestas aplican el concepto de plegabilidad a través de listones de bambú de diferente longitud abisagrados en su lado más corto. La sucesión paralela de estos listones configura una superficie plana que cuando se manipula se quiebra en los diferentes puntos de bisagra, formando una estructura espacial tejida y estable por si misma (figura 2.122).

Para el sistema de bisagra, utiliza los mecanismos mencionados en los anteriores ejemplos, pero adaptados a las dimensiones de los listones. Consisten en bisagras mecánicas tipo libro (figura 2.123) y goma como material flexible laminado entre las capas del bambú (figura 2.124). En este último caso, se debe contemplar la dilatación suficiente entre listones articulados para que la goma se doble sin interferencias y pueda obtener el efecto de bisagra adecuado.

Este concepto ha dejado gran relevancia en el diseño transformable por su estética, sencillez, lo práctico del sistema y el efecto de transformación que genera en su etapa final de despliegue, siendo ahora un referente que se ha extrapolado en la aplicación arquitectónica (figura 2.225).



Figura 2.122 Gama Rising. Diseño Robert van Embricqs [109].

Solar Power, Origami-Style, inspirado en el método De Miura-ori, Shannon Zirbel, de la Universidad Brigham Young, Brian Trease de la NASA y junto con el experto en origami Robert Lang, desarrollan un nuevo diseño de panel solar para el espacio. El movimiento que describe es similar al proceso de floración, la estructura se despliega para formar una superficie plana circular y gracias a la combinación de pliegues radiales y concéntricos, la estructura puede volver a cerrarse de tal manera que los paneles se acoplan para volver a reconfigurar en paquete compactado concéntrico [50] (figura 2.126). El reto está, en el planteamiento de la geometría adecuada de los paneles, el material idóneo, en el espesor de los paneles y la geometría de los pliegues para que finalmente se puedan acoplar todos los componentes, tanto en la etapa final de despliegue como durante el proceso de pliegue.

Revistero plegable. Se ha mencionado anteriormente que las estructuras tipo tijeras son muy comunes en la aplicación a pequeña escala en accesorios para marketing y publicidad, como los ya mencionados muros plegables Pop-up, para la instalación de lonas publicitarias. Los revisteros plegables son generalmente un accesorio de complemento independiente a esta instalación.

Aunque es una estructura muy sencilla, su mención en este apartado corresponde a que su sistema incorpora paneles que se pliegan simultáneamente con la estructura (figura 2.127).

La estructura se compone de una doble capa de tijeras, separadas por el ancho correspondiente al marco que soportara los folletos. Cada módulo de tijera se configura a través de dos elementos, el perfil de aluminio y el marco, este último son cuatro perfiles soldados para formar un rectángulo. El lado más largo del marco, se articula en el centro de un perfil para configurar un módulo de tijera, el sistema se completa al conectar verticalmente seis módulos de tijeras.

Para el ensamblaje, se posicionan los perfiles individuales a cada lado del marco, de tal forma que coincidan las mismas longitudes y se asegura el mecanismo por medio de pernos, que permita el movimiento de giro entre barras y el plano.

Ahora, para unir módulos de tijera, uno encima del otro, la articulación en entre barras consiste en un simple perno y entre marcos, el perfil más corto incorpora el sistema de bisagra para articular el marco siguiente a través de un pasador continuo (figura 2.128).

La base de la estructura contiene topes de seguridad para frenar la estructura en su etapa final de despliegue, el mecanismo de bloqueo funciona a través del enganche. Las primeras barras en la base de la estructura están diseñadas con un sistema de gancho que se acoplan al tope y permite restringir el movimiento, garantizando que la estructura no se pliegue durante su utilización. Además incluye dos posibilidades de posición final, dependiendo en que tope se posiciona la barra de bloqueo (figura 2.129).

Figura 2.129 Sistema de bloqueo de movimiento para la etapa final de despliegue.

Fuente http://assets.nomadicdisplay.com/designs/setup/Setup_AB0011N.pdf
Recuperado [20/07/2018]



Figura 2.127 Revistero plegable.

Fuente http://assets.nomadicdisplay.com/designs/setup/Setup_AB0011N.pdf
Recuperado [20/07/2018]

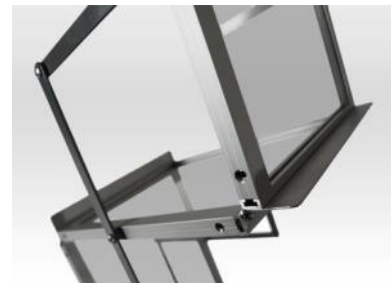


Figura 2.128 Articulación tipo bisagra entre marcos del revistero plegable.

Fuente http://assets.nomadicdisplay.com/designs/setup/Setup_AB0011N.pdf
Recuperado [20/07/2018]



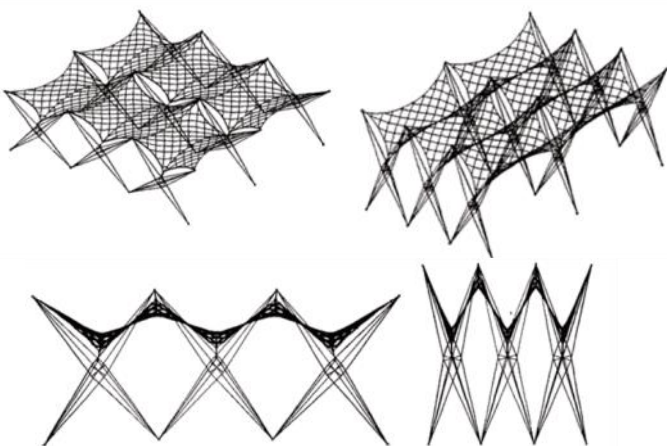


Figura 2.150 Agrupación de tijeras lineales. Puntos de sujeción de membrana [56].

2.3.2 Cubiertas textiles desplegadas

Esta investigación propone como principal alternativa de cubierta para el desarrollo de domos desplegables, una solución de tensoestructura que permita mantener las cualidades de ligereza de las estructuras desplegables, a través de un diseño que pueda adaptarse a los procesos de pliegue, despliegue, montaje, desmontaje y almacenamiento de la estructura. Se define que las tensoestructuras o estructuras tensadas, “son membranas de espesor constante que, en virtud de su forma superficial y de gran deformabilidad, son capaces de soportar las cargas que requieren los Códigos de la Edificación” [10].

Se debe tener en cuenta, además que en este tipo de estructuras “la mayor parte de los elementos estructurales están sometidos a esfuerzos de tracción” [77] de tal forma que al implementar una tensoestructura, acoplada a los elementos tipo tijera, el pretensado de la membrana puede ayudar al comportamiento favorable de la estructura.

Ya se han visto algunos casos de ejemplos, descritos anteriormente en el apartado 2.3 de sistemas tipo tijera, donde se proponen cubiertas textiles, compatibles con la estructura. A continuación se describen los referentes de mayor interés, que proponen cerramientos en membranas desplegables, móviles o retráctiles, que se adaptan a estructuras móviles.

2.3.2.1 Primeras aplicaciones

El **paraguas** es un primer artefacto de protección contra la lluvia, que incorpora una estructura desplegable con una cubierta textil, su invención data en el siglo XI a. C, en China. El principio del movimiento, consiste en barras articuladas posicionadas radialmente sobre un eje vertical, el movimiento de despliegue, se genera gracias al nudo que articula todas las barras y puede deslizarse linealmente sobre el eje o mástil central, de arriba hacia abajo (figura 2.130). La tela, con una geometría circular, se fija a los extremos de las barras y de esta forma acompaña simultáneamente el movimiento de apertura. Al cerrarse la estructura, la tela se pliega entre las barras radiadas envolviendo el eje vertical. Este principio mecánico, con algunas modificaciones, nuevas tecnologías y otros materiales se sigue utilizando en la actualidad y ha inspirado a aplicaciones arquitectónicas y estructuras desplegables (figuras 2.131).

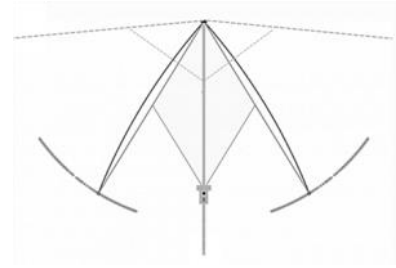


Figura 2.130 Funcionamiento de paraguas estándar



Figura 2.131 Parasol desplegable de 17 m x 18 m para las áreas de rezo en la Meca. Mezquita del Profeta de Medina. Arabia Saudita, 1991. Fuente <http://www.sl-rasch.com> Recuperado [12/11/2018]

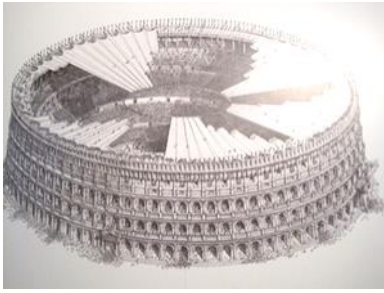


Figura 2.132 Velarium, propuesta de cubierta del coliseo romano. Fuente: <http://www.the-colosseum.net/ita/architecturenovavelarium.htm> Recuperado [13/11/2018]

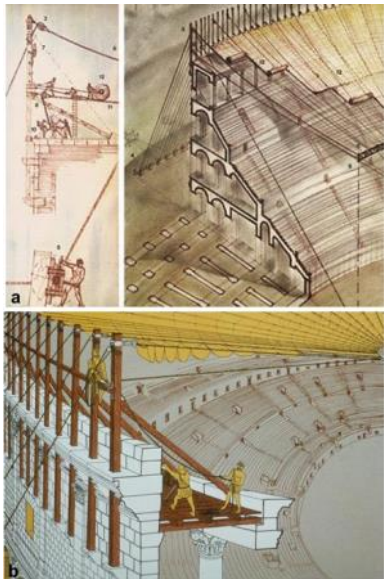


Figura 2.133 Posibilidades de plegado del Velarium. a) Membrana enrollada. b) Membrana replegada. Fuente: <http://antique.mrugala.net/Rome/Italie,%20Rome,%20Colisee/> Recuperado [13/11/2018]

El **Velarium**, fue la gran lona desplegable que cubría las gradas del coliseo romano (año 80 d.C). Los estudios históricos revelan propuestas hipotéticas donde la membrana se extiende y se repliega sobre cuerdas apoyadas desde un anillo central hasta el muro perimetral del coliseo (figura 2.132).

El sistema mecánico basado en el izado de velas de los barcos de la época, contaba con poleas, mástiles y cuerdas que mediante la fuerza manual recogían la membrana. Los esquemas que representan el Velarium describen lonas independientes con una geometría de patrón correspondiente a dividir la circunferencia en forma radial en partes iguales, con dos posibilidades de plegado, enrollada o replegada (figura 2.133).

El desarrollo de este tipo de movimiento en las membranas, más conocidas como cubiertas retráctiles ha sido aplicado y altamente tecnificado en construcciones arquitectónicas modernas para cubrir escenarios deportivos y espacios al aire libre.

Leonardo Da Vinci entre los años de 1480 y 1489 desarrolla varios modelos de alas mecánicas para simular el vuelo de los pájaros y lograr su objetivo de que el hombre pueda volar. En una de sus propuestas plantea barras articuladas, que semejan el cálamo¹ y el raquis² de la plumas de un ave. El sistema se mueve en conjunto por medio de un mecanismo de palanca que articula un extremo de las barras y la lona, como una única pieza, se fija a todas las barras para lograr el movimiento simultáneo del sistema articulado (figura 2.134).



Figura 2.134 Mecanismo de ala Leonardo Da Vinci [81].

^{1,2} Una pluma de ave consta de un eje constituido por el cálamo y el raquis. La porción más ancha del eje de la pluma que se fija al animal denomina cálamo y el resto del eje de la pluma es el raquis [127].

2.3.2.2 Principales diseñadores

Frei Otto pionero en la aplicación de estructuras ligeras y tensoestructuras, generó nuevas perspectivas en la arquitectura en cuanto a la optimización de recursos y aplicación de nuevas geometrías basadas en las formas de la naturaleza. Sus propuestas de membranas tensadas, redes de cables y listones de madera o combinación de láminas livianas, mantenían su principal objetivo de economizar recursos al utilizar el mínimo de materiales para cubrir grandes luces.

Aunque no implementó en sus propuestas arquitectónicas las estructuras desplegables tipo tijera, sus aportes en el desarrollo de membranas retráctiles y otros sistemas estructurales que involucran la movilidad, son precedentes para esta investigación por la importancia en el desarrollo de mecanismos, sistemas de fijación, patronaje, procesos de despliegue y de montaje.

Uno de sus ejemplos más conocidos de cubiertas retráctiles, es el diseño desarrollado en 1968 de la cubierta de teatro al aire libre de la iglesia colegiata de Bard Hersfeld [10]. La membrana se despliega desde un único mástil de 32 m de altura que soporta 14 cables radiados, tensados desde anclajes exteriores al muro perimetral del patio hasta el mástil (figura 2.135). La geometría rectangular de la membrana, corresponde al área a cubrir, se pliega y despliega a través de los cables, gracias al mecanismo de carretes que se deslizan sobre los cables y que al mismo tiempo sujeta los extremos de la membrana para lograr el movimiento de despliegue (figura 2.136).

El concepto de paraguas fue llevado a la arquitectura en 1971 en su proyecto de Grandes paraguas para Exposición Federal de Jardinería en Colonia, Alemania [61] (figura 2.137). Mollaert [56] refiere al proceso de despliegue de estos paraguas, describiendo que a medida que se eleva el mástil, las puntas de los brazos se proyectan hacia arriba hasta tomar su posición final determinada por la geometría de la membrana. Y en la etapa de plegado de la estructura, se retiran los brazos en voladizo para lograr compactar lo más posible la estructura cuando no está en uso (figura 2.138). El sistema de paraguas es nuevamente utilizado en la propuesta de escenografía para Pink Floyd en 1977, adaptando sistemas de elevadores en cada paraguas que se despliegan en el escenario durante el espectáculo (figura 2.139).



Figura 2.135 Cubierta textil retráctil. Teatro al aire libre Bad Hersfeld. 1968 © Foto: Bad Hersfeld Festival.

Fuente: <http://www.simskultur.net/stiftsrueine-bad-hersfeld/programm/die-lustigen-weiber-von-windsor>
Recuperado [15/11/2018]

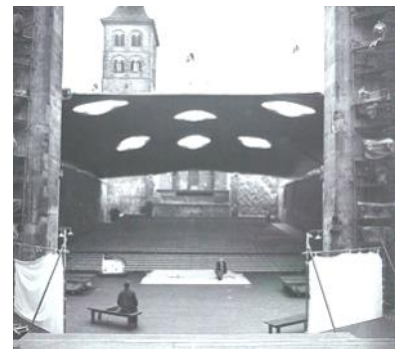


Figura 2.136 Cubierta textil retráctil. Teatro al aire libre Bad Hersfeld. Estado desplegado.

Fuente: <https://es.pinterest.com/pin/412501647098693937/>
Recuperado [15/11/2018]

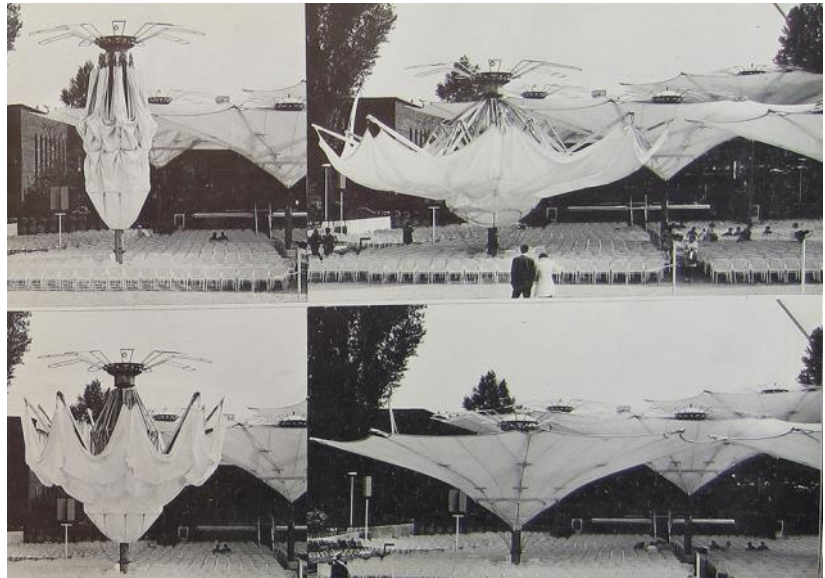


Figura 2.137 Grandes sombrillas en la Exposición Federal de Jardinería. Colonia, Alemania 1971 [61]

Figura 2.138 Proceso de despliegue grandes sombrillas en la Exposición Federal de Jardinería. Colonia, Alemania [62].



Figura 2.139 Sombrillas de 4,5 m a 7 m para el escenario de Pink Floyd. Diseñadas por Ted Happold y Frei Otto. Fuente: <http://concertstagedesign.blogspot.com.es/2011/01/pink-floyd-in-flesh-tour-1977.html> Recuperado [15/11/2018]



Un nuevo planteamiento de Frei Otto para plegar estructuras utilizando membranas tensadas, es el propuesto para un refugio transportable y proyectado a mayor escala (figura 2.140). Su estructura se compone de arcos abatibles conectados por las membranas, el movimiento como acordeón finaliza su etapa de despliegue cuando los arcos de los extremos se posicionan en un ángulo determinado y la membrana logra su máxima tensión.



Figura 2.140 Refugio con arcos abatibles [62].

En el Pabellón de Venezuela en la Expo 2000 de Hannover, una estructura desplegable en forma de flor, Otto propone que cada pétalo es una estructura de membrana tensada sobre un marco metálico con la geometría específica (figura 2.141). Cada uno de estos pétalos se articula al mástil principal y mediante cilindros hidráulicos, calculados previamente para mover la estructura, extienden o retraen sus brazos para que de esta forma, los pétalos giren sobre la articulación y se muevan sincronizadamente para generar el movimiento de apertura y cierre.

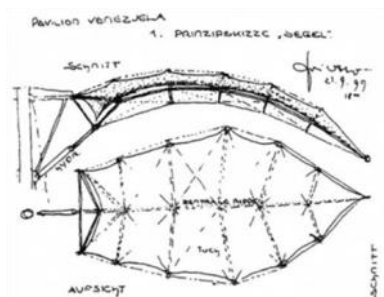


Figura 2.141 Geometría pétalo. Croquis Frei Otto 1999 [32].

Acerca del diseño, fabricación y montaje de la cubierta, cada pétalo se diseña como una estructura de doble curvatura con superficie anticlástica, esta geometría permite mejorar el comportamiento estructural y generar un sistema de desagüe adecuado para la cubierta. La confección de la membrana se realiza a partir de ocho patrones transversales, con dimensiones específicas sin exceder el ancho permitido por el fabricante. Soldada cada pieza del patronaje, la membrana completa se instala en el marco estructural en tierra y es tensada, para finalmente elevarla y posicionarla en la articulación del mástil (figura 2.142) [32].

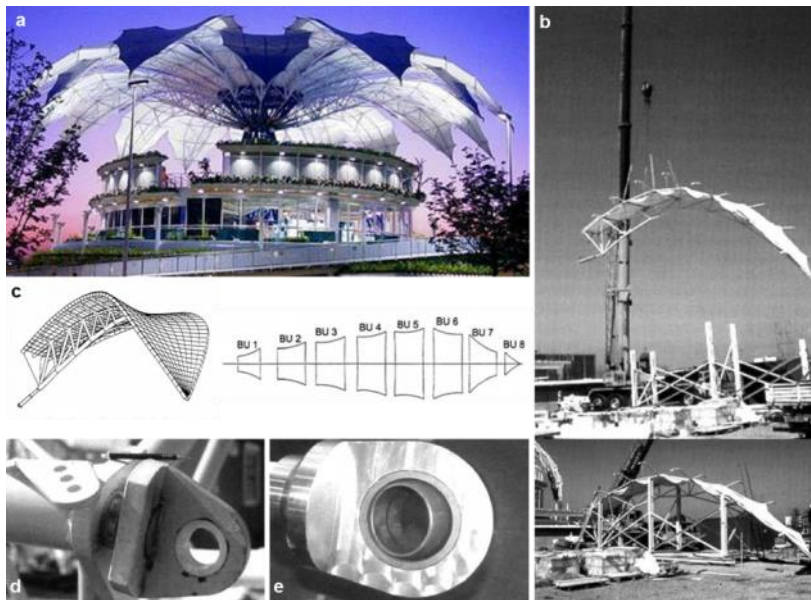


Figura 2.142 a) Pabellón de Venezuela. Estructura de cubierta desplegada. b) Montaje e izado de cada pieza de cada pétalo. c) Modelo 3D estructura pétalo y patronaje. d) Articulación entre pétalo y mástil. e) Articulación de los extremos cilindro hidráulico cubierta textil retráctil [32]

Félix Escrig, desarrolló en sus propuestas conceptuales y construidas, cubiertas desplegables con tensoestructuras. En el encargo para cubrir temporalmente una procesión religiosa en la Plaza de San Francisco, Sevilla, España, Escrig proyecta unas estructuras de paraguas de gran tamaño resueltas con el sistema tipo tijera. Para la cubierta de estos paraguas propone una capa superior que colabora con el comportamiento estructural del conjunto y una capa inferior para lograr un mayor aislamiento térmico [25].

La geometría del paraguas desplegado conforma en planta un hexágono, que corresponde a la forma de ambas capas de membrana, pero en la capa superior se contempla un radio mayor para cubrir los laterales de la estructura.

Los puntos de fijación entre tijeras y lona, según la figura 2.143, describen que en la lona superior corresponden a las articulaciones externas de las barras y en la lona inferior, se sujeta tanto en las articulaciones extremas como en las del medio, según se observa en la forma que toma la tela. Y entre lonas se distinguen unos pocos puntos de sujeción que mantienen las lonas unidas durante el proceso de despliegue. Lo que permite analizar a nivel de maqueta las diferentes posibilidades de posicionamiento de la lona y anclajes para este tipo de estructuras.

En estructuras espaciales construidas, que configuran curvatura con el STT, referente a la cubierta cilíndrica para una piscina unifamiliar, Escrig posiciona la membrana solo en la parte exterior, en la figura 2.144 se observa el proceso de despliegue, donde la membrana se sujeta a las articulaciones externas de las barras y al punto de la articulación central.



Figura 2.143 Maqueta para proyecto de sombrillas de la Plaza de San Francisco [25]



Figura 2.144 Proceso de despliegue cubierta piscina unifamiliar [25]



Figura 2.145 Cubierta del Auditorio de la Alameda en Jaén, España. Fuente <https://www.venuesplace.com/es/4753-auditorio-municipal-de-la-alameda> Recuperado [02/12/2018]



Figura 2.146 Modelo a escala cubierta para auditorio [25].



Figura 2.147 Modelo a escala cubierta para auditorio [25].



Figura 2.148 Estado plegado y desplegado cubierta auditorio. Fuente: <http://www.arquitectil.net/portfolio/auditorium-jaen/> Recuperado [02/12/2018]

Para el proyecto de la cubierta del Auditorio al aire libre de la Alameda en Jaén, España, con dimensiones de 42 m de ancho y más de 100 m de longitud. Se construye una cubierta desplegable compuesta de elementos curvos, arcos verticales que se entrecruzan y se articulan en dos puntos, para generar el mecanismo de pivote y configurar así el STT. La agrupación de estos arcos genera una bóveda que se despliega linealmente sobre un rieles paralelos, posicionados sobre las cornisas de los muros que limitan el espacio a cubrir.

Para el estudio de la cubierta y analizar el comportamiento de la membrana durante el proceso de despliegue, el equipo de Escrig realiza un modelo a escala 1:10, con el cual permite visualizar los cambios de forma que se producen sobre el textil, en los rombos configurados al conectar los módulos de tijeras de arcos (figura 2.146). Esto permitió prever los desagües, junto con los posibles fallos, para así diseñar el patronaje adecuado para la tensoestructura.

Para la sujeción de la membrana a la estructura de los arcos, que consisten en perfiles tubulares con sección circular, se opta por el acordeonado. Cada perfil tubular tiene paralelo a su curvatura un perfil de menor diámetro, el cual esta soldado al perfil principal por medio de pequeñas cartelas sucesivas y posicionado al costado correspondiente para sujetar la lona.

En la membrana se fijan armellas cerradas, repartidas a distancias iguales y que cubran la longitud total de cada arco y de esta forma el cordón enlaza ambos elementos, membrana y perfil tubular, con un tejido simple en zigzag. El sistema es reforzado con pletinas sobre la tela para fijar las armellas y no afectar el textil (figura 2.147).

En la figura 2.148 se observa el patronaje desarrollado y las uniones soldadas con una buena uniformidad, en estado plegado y desplegado, resaltando la importancia durante proceso de confección de la tensoestructura y determinación de la geometría de los patrones según los requisitos del fabricante, los esfuerzos solicitados y la condición de ser una estructura plegable.

En la cubierta de la piscina de San Pablo (figura 2.32). Como información referente al diseño y sujeción de la cubierta, los estudios previos a esta propuesta, describen la posibilidad de posicionar el envolvente textil en la cara exterior de un módulo cuadrangular de tijeras, pero esta alternativa generaba que el sistema se cerrara automáticamente por gravedad, debido al peso de la lona. De esta forma se optó por posicionar la membrana en la cara inferior de la estructura y garantizar un plegado ordenado, para ello se introdujo unos tensores adicionales para lograr el correcto plegado de la membrana (figura 2.149).

Otro ejemplo bien logrado, con la membrana posicionada en la cara exterior de una estructura desplegable, es la realizada por **Masao Saito** para la EXPO 2005 (figura 2.150). La tensión de la tela estabiliza la totalidad de la estructura y los puntos de fijación corresponden solo a las articulaciones exteriores de las barras.

Marijke Mollaert propone una agrupación de tijeras lineales paralelas que se despliegan en un solo sentido. La configuración de la tensoestructura para esta propuesta, consiste en piezas rectangulares, la longitud del textil, junto con la máxima tensión de la tela, condiciona la apertura de las tijeras, en el sentido lineal en que se despliega la agrupación. Y el ancho corresponde a la distancia, ya tensada, entre filas de tijeras paralelas. El modelo realizado genera un mínimo de arrugas en el estado plegado como desplegado.

La membrana se posiciona en la cara superior de la agrupación de tijeras y la sujeción se realiza en las articulaciones exteriores superiores y en las articulaciones centrales, generando puntos altos y bajos en la membrana. En los puntos bajos se marca una relinga transversal, en forma de arco que refuerza la tensión de la tela en estado plegado [56]. El estudio se complementa con el análisis del comportamiento y cambio de forma de la membrana en las distintas posiciones de plegado (figura 2.151).

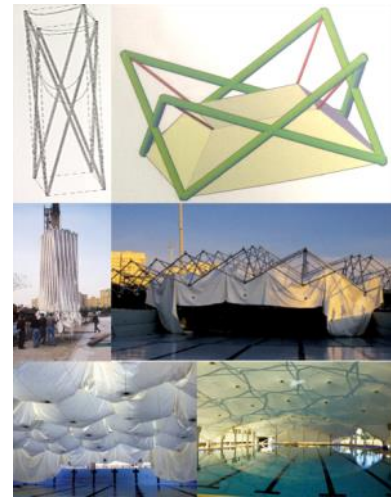
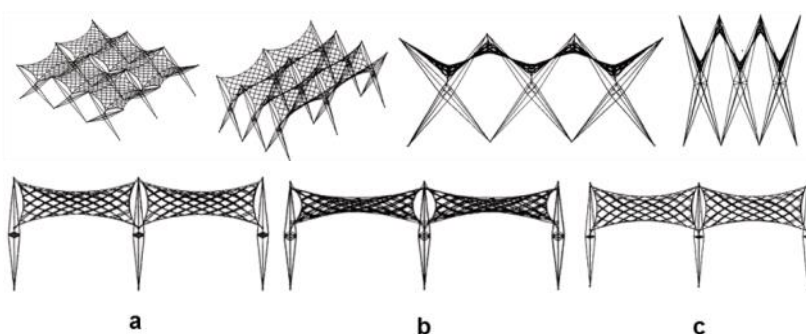


Figura 2.149 Piscina de San Pablo, sujeción de la lona en las articulaciones inferiores de las barras. Proceso de despliegue [2] y [25]



Figura 2.150 Cubierta desplegable cilíndrica, sistema tipo tijera. Masao Saito [25]

Figura 2.151 Arriba. Agrupación de tijeras lineales. Puntos de sujeción de membrana. Abajo. Vista lateral comportamiento de la membrana en diferentes posiciones de despliegue.
a) Cuando las tijeras están abiertas a 45°.
b) Posición un poco más abierta, la membrana se tensa.
c) Tijeras en posición cerrada [56]

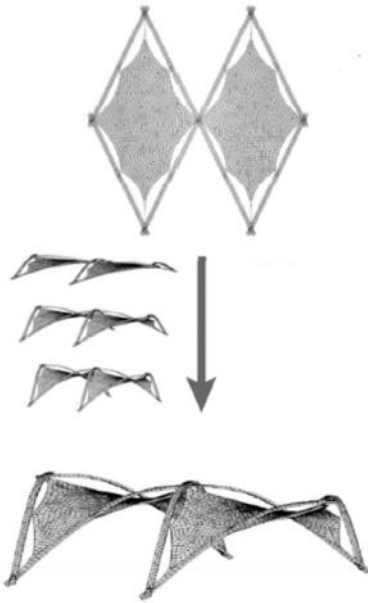


Figura 2.152 Propuesta de estructura textil híbrida desplegable [9].

Un nuevo estudio sobre estructuras textiles híbridas desplegadas [9] analiza el comportamiento de una estructura desplegable formada por elementos planos que conforman un módulo tipo tijera e incorpora la flexión activa para curvar la estructura. La forma y posición de la membrana corresponde a cubrir los dos cuadriláteros que se forman a cada lado de la tijera. (figura 2.152).

El resultado de la curvatura en la superficie textil depende de la flexión sometida a las barras de las tijeras. Este tipo de estructuras genera ventajas en el montaje y ensamble de elementos ya que al utilizar elementos planos se simplifica las uniones y los puntos de sujeción de la lona.

El artículo describe la proyección de una única pieza, eliminando la generación de distintos patrones, pero garantizando un pretensado mínimo y distribuido uniformemente en el estado final de despliegue. Se enfatiza que la membrana no frena el proceso de despliegue y es necesario contar con el sistema de bloqueo, en este caso se cuenta con barras transversales con una longitud relacionada a la tensión máxima de la membrana en el estado final de despliegue. Finalmente el análisis del comportamiento estructural (figura 2.153) señala una buena distribución de la pretensión de la membrana de 0,25 a 3,37 MPa y algo más baja en las conexiones intermedias.

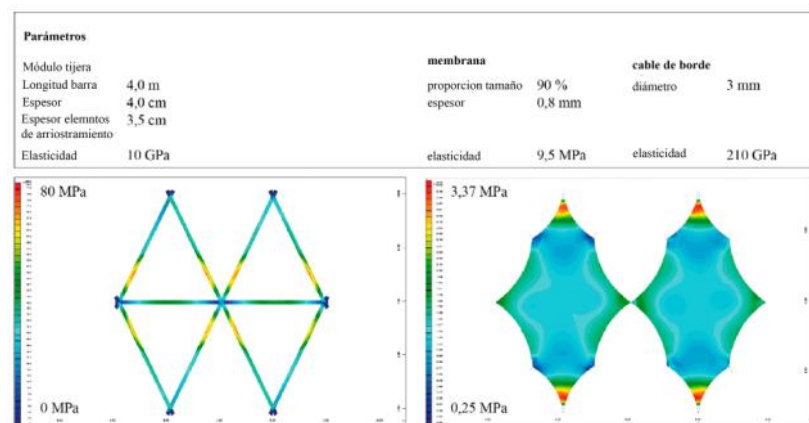


Figura 2.153 Análisis resultados comportamiento estructural de la membrana [9].

Jat-Yuen Richard Liew y **T.C Tran** [53] desarrollan dos tipologías de estructuras, implementando barras articuladas y membranas desplegadas, combinando ambos sistemas para proponer cubiertas ligeras de rápido montaje.

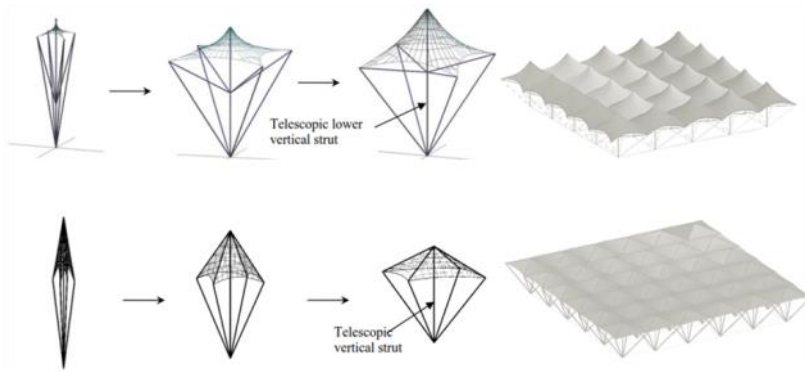


Figura 2.154 Sistemas de barras articuladas, geometría de bipirámides con membranas desplegables. Dos propuestas de sujeción de la membrana y agrupación de módulos [53].

El sistema consiste en bipirámides a partir del cuadrado, donde las aristas son barras y los vértices son los nudos que reciben y articulan las barras. Existe una barra vertical telescópica adicional, que ejerce la función de mástil, controlando el movimiento de pliegue y despliegue del módulo bipirámide.

El sistema similar al funcionamiento de un paraguas, propone dos variaciones para el despliegue combinado, la primera opción la membrana se sujeta a los vértices que unen las dos pirámides y la segunda opción, la membrana esta sujeta a las aristas de la pirámide superior (figura 2.154). El estudio se complementa con el análisis del comportamiento de estos módulos agrupados, validando la colaboración estructural que ejerce la tensión de la membrana sobre la estructura, junto con la realización de un prototipo a escala, que demuestra la viabilidad y el desarrollo de sistemas de nudos y anclajes para la tela (figuras 2.155 y 2.156).

La anterior propuesta descrita, es nuevamente aplicada en el planteamiento de una Estructura Mariposa para recintos espaciales [93]. En este caso desarrollan con el mismo concepto de barras articuladas, módulos cuadrangulares tipo tijera complementados con el sistema de bipirámides, agrupados linealmente que forman una viga desplegable (figura 2.157).

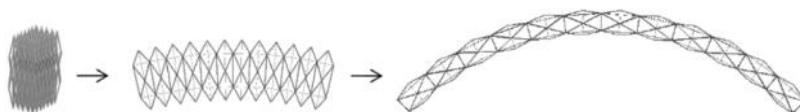


Figura 2.157 Viga tipo arco desplegable. Agrupación de 12 módulos tijera [93].



Figura 2.155 Prototipo a escala. Estado plegado y desplegado [53]



Figura 2.156 Detalles nudos. Articulación de barras. Sujeción de cable para rigidizar la estructura en estado desplegado. Sujeción del textil [53]

Figura 2.158 Configuración de estructura de mariposa dos arcos desplegables con 14 módulos y una longitud de 30 m. (Tran y Liew, 2007).

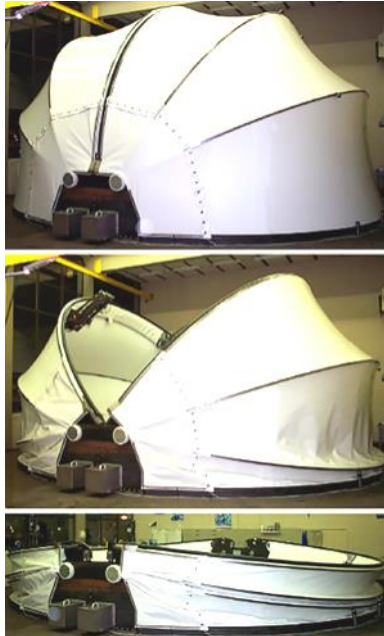


Figura 2.159 Domo plegable para el telescopio GRECOR de 5 metros de altura. Universidad Tecnológica de Delft y Poly Países Bajos. (Hammerschlag, Kommers, Visser, Bettonvil, Van Schie, Van Leverink, Slieden, J'agers, Schmidt y Volkmer, 2012). Recuperado [15/15/2018]

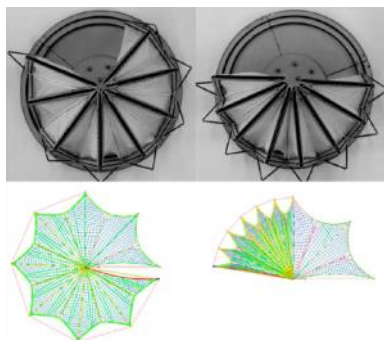
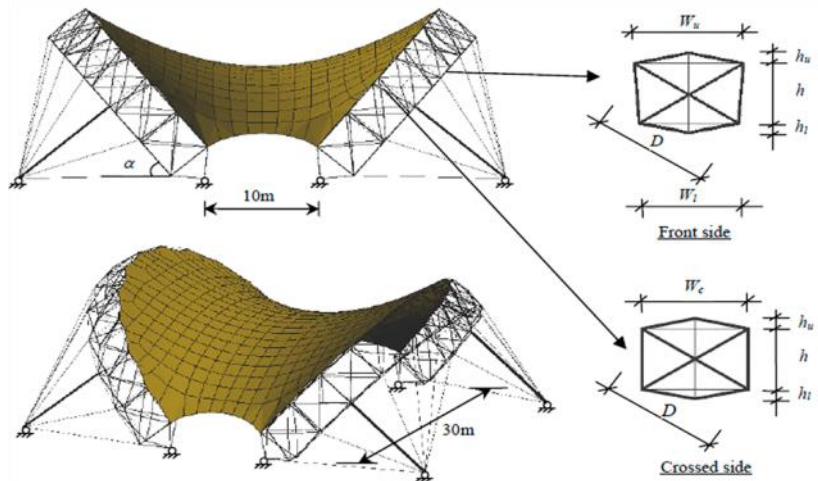


Figura 2.160 Análisis de un marco plegable. El estudio propone una estructura que sea estable en todas las etapas de despliegue, proponiendo enlaces adaptables en la membrana para lograr la tensión ideal en diferentes posiciones del despliegue [57].



La aplicación consiste en dos vigas desplegables independientes, que giran sobre un pivote en cada extremo y se posicionan en planos inclinados. Cuando la estructura llega a su etapa final de despliegue, en el ángulo de inclinación determinado, cada arco es soportado por puntales de seguridad, cables y la tensión de la tela entre vigas.

El análisis y resultados obtenidos radica en hallar el ángulo de inclinación ideal en relación al peso de la estructura, tensión de la tela y la cantidad de módulos de tijera a agrupar, determinados por los parámetros de dimensiones a cubrir, material y cargas de viento. El estudio concluye que el ángulo óptimo es de 45° y de 12 a 14 módulos de tijeras para una longitud de arco de 30 metros (figura 2.158).

Otras aplicaciones que desarrollan el mismo concepto de estructuras abatibles y la combinación con tensoestructuras se observan en las figuras 2.159 y 2.160, dando a conocer la viabilidad constructiva y diferentes posibilidades arquitectónicas que se pueden lograr con esta tipología de sistemas, demostrando la versatilidad y capacidad estructural de las membranas para acoplarse a sistemas estructurales móviles.

El equipo de la Universidad de Vrije en Bruselas, conformado por **Tom Van Mele, Niels De Temmerman, Lars De Laet y Marijke Mollaert** [95], presentan un estudio sobre cubiertas retráctiles y estructuras tipo tijeras. La estructura se diseña para cubrir el área de un campo de tenis junto con el área de las graderías. Para ello proponen una cubierta en forma de bóveda de cañón, conformada por elementos tipo tijera, que se despliega en dos partes longitudinales y se unen en la cúspide, cerrando el sistema y configurando el arco que dará la estabilidad a la estructura total de la cubierta (figura 2.161).

Cada tramo desplegable se apoya en un extremo en los muros perimetrales y para evitar el vuelco de los arcos durante el proceso de despliegue, se propone un mástil abatible desde el suelo hasta el punto medio del tramo, que acompaña y soporta la estructura hasta la etapa final de despliegue.

El artículo estudia varios puntos de interés sobre la geometría del arco, tipo de barras, agrupación de módulos de tijera y sistemas de pliegue y despliegue mediante cables continuos y sistemas de poleas, para optimizar el comportamiento de la cubierta. Pero para este apartado se analiza específicamente el sistema de membrana propuesto.

Se determinan que los puntos de anclaje para la membrana ubicada en el espacio entre arcos desplegables paralelos, suceden en todas las articulaciones extremas de los módulos de tijera, de tal forma que para configurar el trazado de zigzag, valles y crestas en la superficie de la membrana, esta queda posicionada tanto en la cara exterior, puntos altos, como en la cara interior, puntos bajos, de la agrupación de tijeras. El interés de este estudio radica en el análisis de los elementos que componen los valles y las crestas (figura 2.162).

En un primer análisis, los valles y crestas se proyectan como relingas rectas donde el principal inconveniente es el estancamiento de agua y un segundo análisis como relingas arqueadas. La segunda solución presenta un mejor comportamiento estructural en la membrana y favorece las pendientes de agua para evitar su acumulación (figura 2.163).

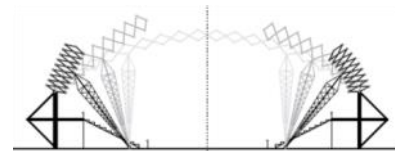


Figura 2.161 Cubierta desplegable para un campo de tenis. Proceso de despliegue [95]

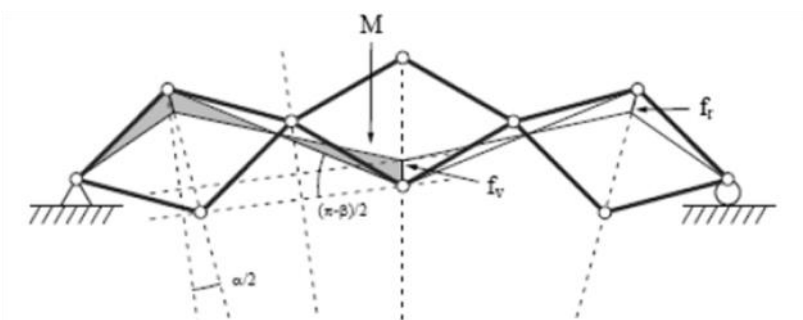


Figura 2.162 Puntos de sujeción de la membrana, configurando valles y crestas [95]

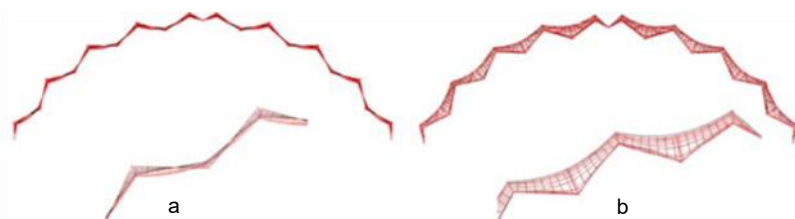


Figura 2.163 Modelo de cubierta simulado de la membranas. a) con cables rectos en valles y crestas. b) con cables curvos en valles y crestas [95]

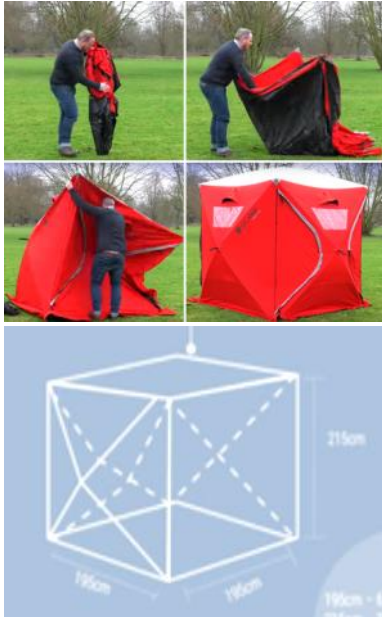


Figura 2.164 Proceso de despliegue Tienda Qube.

Fuente <https://www.youtube.com/watch?v=SZ9DHS1ZVQs>
Recuperado [17/12/2018].

Otro punto a tener en cuenta refiere al cálculo del patronaje, si se debe realizar con la estructura en posición plegada o desplegada, el estudio aclara que “si la superficie original se determina en la configuración desplegada, la membrana quedará suelta en configuraciones más dobladas, y viceversa” [95].

Lo que lleva a pensar si esto puede afectar al comportamiento de la estructura o solo afecta la estética visual de la membrana al generarse arrugas, que para el caso son habituales al tratarse de una lona que se dobla para plegarse con la estructura.

Esto conlleva a ampliar el estudio sobre el patronaje adecuado para un ordenado proceso de pliegue de la membrana en combinación con estructuras desplegables tipo tijera.

2.3.2.3 Otras aplicaciones

Las características de las membranas permiten ser utilizadas como recubrimiento en estructuras móviles de todo tipo, sus tejidos permiten adaptarse bien a los procesos de pliegue y despliegue de la estructura. Este apartado complementa la aplicación de membranas desplegables con algunos ejemplos de artefactos comerciales, que incorporan la membrana como elemento principal para estabilizar la estructura.

Qube es una modalidad de tienda de acampar modular que se despliega en menos de dos minutos y su sistema de plegado, inspirado en el origami, permite compactar la estructura para embalarla rápidamente en su bolsa de transporte [124]. Como su nombre lo indica consiste en una tienda que toma la forma de cubo en su etapa final de despliegue, su estructura consiste en barras de plásticas con fibras de vidrio que configuran las diagonales de las caras del cubo, las barras forman dos arcos, igual que una x, que se articulan en un nodo en el centro del cuadrado y se sujetan a la tela por la cara interior del cubo.

Para obtener el despliegue se tira hacia afuera cada nodo y las barras toman la forma de arco y tensan la lona, cada cara del cuadrado, excepto la base, toman la forma de una pirámide que incluyen accesorios adicionales para sujetar los vientos, que estabilizan la tienda por cada lado (figura 2.164).



Figura 2.165 Sistema de acople entre módulos. Fuente <https://www.youtube.com/watch?v=SZ9DHS1ZVQs>

Recuperado [17/12/2018].

El diseño de la tela incluye aberturas para la ventilación, ganchos interiores para colgar implementos pequeños de camping como lámparas y una abertura con cremalleras que permite acoplar más módulos e interconectar varias tiendas (figura 2.165).

El Túnel desplegable, es una instalación de cubierta textil plegable con una estructura en aluminio compuesta por perfiles individuales y elementos tipo tijera, con posibilidad de fijarla a un muro o al suelo. Son utilizadas en instalaciones deportivas, albergues militares o salidas de emergencia, configurando aéreas de cubierta temporal para corredores, almacenes y garajes.

La estructura consiste en una serie de arcos consecutivos, uno detrás del otro, que se articulan por medio de tijeras, que permiten modificar la distancia de separación entre arcos, obteniendo longitudes variables de extensión según la necesidad de uso.

Para facilitar el proceso de despliegue manual, la estructura se despliega y repliega sobre un riel horizontal (opcional) que recibe los patines de cada arco. Adicionalmente las tijeras también cuentan con rodamientos en sus articulaciones exteriores para facilitar el deslizamiento sobre los perfiles verticales de los arcos, el sistema finalmente se asegura y se bloquea con pasadores transversales entre arcos que al ajustarlos impiden el movimiento de la tijeras y evitan que la estructura se pliegue cuando esta en uso (figura 2.166).

La lona como elemento de cubierta se sujeta a los perfiles de los arcos y compagina perfectamente con los procesos de despliegue de la estructura, además existen diseños donde el usuario tiene la posibilidad de sustituir los paños de lona entre arco y arco de forma independiente (figura 2.167).

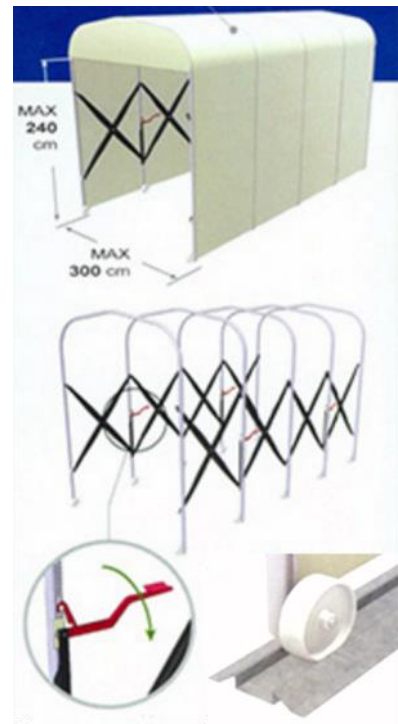


Figura 2.166 Túnel desplegable, estructura túnel, sistema de bloqueo, riel y rueda sobre suelo.

Fuente <http://tolder.es/esp/77z-tunel-plegable-para-emergencias-y-ocio.php>
Recuperado [17/12/2018].



Figura 2.167 Túnel. Estado plegado y desplegado.

Fuente <http://www.vicvimar.com/parking-tunel/#prettyPhoto>
Recuperado [17/12/2018].



Figura 2.168 Membrana desplegable de albergues militares [108].

Carpa Plegable, es el producto más comercial de arquitectura plegable a pequeña y mediana escala para eventos temporales, como exposiciones, mercadillos o ferias, y en situaciones de emergencia como albergues militares o refugios de emergencia, su sistema estructural basado en la agrupación de módulos de tijeras, configuran diferentes geometrías espaciales descritas anteriormente en el apartado 2.2.3.

Este tipo de aplicaciones de fácil montaje incorpora en la mayoría de los casos, desde la posición inicial de plegado, la cubierta textil que se despliega simultáneamente con la estructura, siendo un componente primordial para aportar estabilidad a la estructura en el estado final de despliegue.

En el caso de los albergues militares (figura 2.168), cuentan con doble capa textil, al interior y exterior de la estructura para mejorar el aislamiento, además incorpora solapes adicionales en la tela para las aberturas de los accesos, protegiendo el interior de posibles filtraciones de agua.

La membrana exterior es una pieza continua que se sujeta a puntos altos y bajos, que corresponden a las articulaciones superiores y centrales de las barras. Esto permite que al momento de plegarse la estructura, la membrana se pliegue hacia el interior y en forma ordenada. Pero en el estado final de despliegue los puntos altos y bajos no generan suficiente diferencia de altura ni tensión en la parte superior de la cubierta, provocando arrugas y posibles estancamientos de agua.

En el caso de los refugios desplegables descritos anteriormente (figuras 2.67 a 2.72), la membrana es discontinua para instalarla por partes. La primera parte, de arriba hacia abajo, corresponde a la cúspide hasta el paralelo que cubre los dos últimos módulos de tijeras superiores. El resto de partes de la membrana cubre las secciones definidas por la geometría de la estructura, correspondiente a los husos esféricos del domo y se conectan entre ellas por medio de cremalleras.

Las diferentes secciones de membranas, están sujetas a la estructura de los arcos plegables, específicamente a las barras de bloqueo, que se posicionan entre módulos de tijera e incluyen en su diseño el anclaje de sujeción de la tela.

La figura 2.169 expone con mayor detalle el tipo de anclaje para la lona, donde se visualiza la barra de bloqueo que incorpora un eje roscado que se introduce en los ojales de la membrana y se asegura con un tapón enroscable. Este sistema permite una rápida instalación de la membrana y así mismo un proceso de desmontaje de fácil y rápida ejecución.



Figura 2.169 Proceso de instalación de la membrana. Refugios desplegables [123].

Los toldos plegables o kioscos para mercadillos, también incluyen un cobertizo textil que se despliega en conjunto con la estructura tipo tijera (figura 2.170).

En este caso la membrana toma forma de pirámide con base cuadrada al sujetarla desde el mástil principal central, hasta las esquinas de la base cuadrangular de cubierta. El diseño de la lona incorpora tiras adicionales de velcro que se conectan a los perfiles perimetrales de la cubierta y de esta forma se sujeta a la estructura (figura 2.171). El punto alto se logra por un mástil vertical central, que corresponde al eje donde confluyen la agrupación de tijeras, el mástil es el eje donde se deslizan las barras para generar el movimiento de apertura y cierre de la estructura. La proporción del mástil es igual o un poco mayor a la longitud de las barras de las tijeras, para obtener la inclinación adecuada a cuatro aguas de la cubierta (figura 2.172). También existen otras alternativas de kiosco con más de un punto alto de cubierta, incorporando los mástiles adicionales requeridos, según el tamaño de la carpa.



Figura 2.170 Kioscos plegables.

Fuente <http://www.carpasbarcelona.com/carpas-plegables/publicidad-plegables-carpas.htm>

Recuperado [18/12/2018].



Figura 2.171 Kioscos plegables.

Fuente <http://www.carpasbarcelona.com/carpas-plegables/publicidad-plegables-carpas.htm>

Recuperado [17/12/2018].

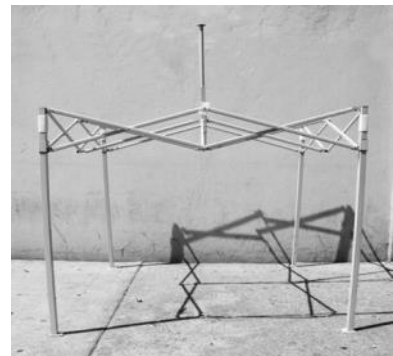


Figura 2.172 Mástil para general punto alto en la cubierta Fuente

<http://www.carpasbarcelona.com/carpas-plegables/publicidad-plegables-carpas.htm>

Recuperado [17/12/2018]

2.4 Conclusiones

El recorrido histórico del estado del arte acerca de las estructuras desplegables, enfocado en tres campos fundamentales, sistema tipo tijera, plegaduras y cubiertas textiles desplegables, permite reconocer la influencia que tienen los diseños propios de la naturaleza, para proporcionar los conceptos principales para el desarrollo de aplicaciones transformables en función de una necesidad o bienestar común.

Gracias a los avances tecnológicos de la era industrial e incorporación de nuevos de nuevos materiales, la aplicabilidad de este tipo de estructura se proyecta a múltiples áreas del conocimiento, incentivando de esta manera el interés e investigación académica.



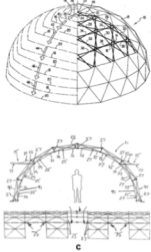
Los ejemplos estudiados proporcionan al estudio las características fundamentales para proyectar configuraciones espaciales desplegables , basados, en la plegabilidad, sencillez, ligereza, modulación y utilización de los recursos mínimos necesarios.

Cada aplicación analizada proporciona un aporte del conocimiento acerca de los mecanismos empleados, materiales y métodos implementación de la estructura, para determinar las ventajas y desventajas que pueden aportar a la investigación.

Resumen de características y aportes de los principales referentes analizados

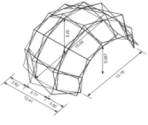




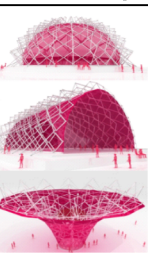

Las siguientes tablas descriptivas (Tablas 2.1 a 2.3), recopilan la información principal de los referentes estudiados, señalando los mecanismos principales para ejecutar los procesos de pliegue y despliegue de la estructura y así mismo los sistemas de bloqueo del movimiento, este análisis genera un listado de las posibles ventajas y desventajas que aportan de manera fundamental en la investigación para la proyección y viabilidad constructiva de domos desplegables a partir de una metodología específica.

TABLA 2.1 Selección de características y aportes en los principales referentes analizados

Aplicaciones/ejemplos		Características					Ventajas/ aportes/Innovación
Imagen	Mecanismo	Despliegue	Bloqueo del movimiento	Plegue	Desventajas		
 Yurta	Listones de madera articulados en varios puntos. Pasadores de madera	Manual. El entramado se despliega al tirar de un extremo	Cuando el extremo de entramado se fija al extremo contrario	Eliminar los pasadores que articulan los extremos del entramado y replegar	Baja estabilidad Elemento de división y no de cubierta	Estructura liviana Material flexible Transportable Elementos de igual o similar longitud	
 Silla egipcia	Barras articuladas en el centro. Sistema tipo tijera	Manual. Apertura de la tijera	La longitud del ancho de la tela genera el tope máximo de apertura	Cierre de las tijeras	Falta de un dispositivo adicional de bloqueo por si la tela falla	Estructura liviana Modular Transportable Elementos de igual longitud Fácil fabricación y ensamblaje	
 Dispositivo de elevación. Da Vinci	Sistema tipo tijera. Agrupación de módulos en vertical. Tomillo sin fin en el primer módulo	Manual. Girar la manivela del tomillo sin fin para la apertura del primer módulo de tijera	La longitud del tomillo sin fin, limita la apertura máxima	Girar la manivela en dirección contraria	Elementos de diferente longitud. Estable en un solo plano	Agrupación de módulos. Mayor longitud de extensión	
 Estructuras E.P. Piñero	Barras articuladas en un punto central. Sistema de aspas. Agrupación de módulos	Manual o con dispositivos mecánicos como motores, cilindros hidráulicos o grúas. Montaje por módulos	Barra adicionales de bloqueo o cables con longitud determinada	Eliminar barras de bloqueo, comprimir la estructural manual o mecánicamente.	Dificultad en los sistemas de anclaje al suelo. Integrar la cubierta al proceso de despliegue de la estructura	Estructuras espaciales de doble curvatura Modular Transportable Elementos de igual longitud Fácil fabricación y ensamblaje Grandes luces Desarrollo del nudo	
 Estructuras Zeigler.	Sistema de barras articuladas tipo tijera	Se eleva la estructura desde el centro con un a grúa y se despliega por peso propio. Manual: Desplegar el perímetro de la estructura hasta que se levante lo suficiente para poder empujarla hacia arriba desde el centro interior	Barra adicionales de bloqueo La estructura llega perpendicular al suelo	Eliminar barras de bloqueo, comprimir la estructura manualmente	Incompatibilidad geométrica	Cúpula triangulada Barras de las tijeras con articulación central deslizante y telescópica en los extremos Diferentes geometrías de doble curvatura Eliminación de elementos para aberturas Nudo desmontable	
 Estructuras Escrig	Sistema de barras articuladas tipo tijera	Se eleva la estructura desde el centro con un a grúa y se despliega por peso propio. Manual: Desplegar el perímetro de la estructura hasta que se levante lo suficiente para poder empujarla hacia arriba desde el centro interior	Diagonales. Tensores en los módulos cuadrangulares. Anclajes de suelo	Eliminar barras y cables de bloqueo, comprimir la estructura	Dificultad en el ensamblaje	Desarrollo nudos Liberación de barras Óptima compactación Grandes luces Incorporar la cubierta textil al proceso de despliegue Diagonalización progresiva en módulos cuadrados	

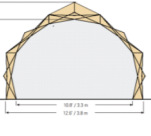
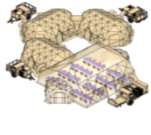


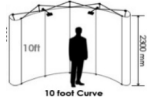

SISTEMA TIPO TIJERA

TABLA 2.1 Selección de características y aportes en los principales referentes analizados

Aplicaciones/ejemplos		Características				
Imagen	Mecanismo	Despliegue	Bloqueo del movimiento	Pliegue	Desventajas	Ventajas/aportes/Innovación
 C.H. Hernández	Sistema tipo tijera	Sistema de polipasto localizado en el centro de los arcos exteriores. Fuerza manual.	Barra de bloqueo en las tijeras de la base y tensores	Eliminar las barras de bloqueo	Deformación durante el proceso de despliegue. Falta de definición adecuada del patronaje, se generan arrugas	Refuerzo en las articulaciones de la barras. Doble capa de tijeras. Anclaje de tela incorporado en las barras
 Chuck Hoberman	Barras anguladas Sistema tipo tijera	Apertura de las tijeras por medio de motores, poleas y cables	Máxima apertura de la tijera, sistema de freno incorporado en los motores	Cierre de las tijeras, los motores recogen el cable y pliega la estructura	Dificultad en la fabricación de piezas al ser barras anguladas. Complejidad en el ensamble	Diseño de nudos alto grado tecnológico. Fabricación de piezas con alta tecnología. Nuevas composiciones geométricas
 Jon Begiristain	Sistema tipo tijera. Módulo triangular y sistema de nudos girados con barras individuales.	Se eleva la estructura manualmente y se procede a su despliegue desde los extremos	Longitud de tensores determinada	Se repliega la estructura manualmente hacia el centro	Los nudos tienden a girar. Posible torsión de barras	Nudos desmontables y adaptables a varias configuraciones. Fácil transporte.
 Yuya Ushida	Barras articuladas Módulo triangular	Manual. Apertura de tijeras	Fricción entre elementos, agrupación de muchos módulos	Cierre de la tijeras	Posible desgaste del material. Dificultad de reemplazar piezas	Sistema desmontable. Los nudos no se articulan con pernos, sistema de click. Implementación de la tecnología de impresión 3D
 Transform. Universidad Vrije,	Sistema de barras articuladas tipo tijera	Manual. Tira de los extremos y elevar la estructura desde el centro del arco	Barras y tensores adicionales de bloqueo. La estructura llega perpendicular al suelo	Eliminar barras de bloqueo, abrir la estructura para que el arco caiga y así repliegue la estructura	Dificultad durante la etapa final de despliegue por el peso de la estructura. Posibles riesgos al plegar la estructura	Desarrollo de nudos. Diseño de bases con patines y anclajes para tensores y barras. Diseño paramétrico
 Studio Florian. Pantograph	Sistema tipo tijera y barra articuladas formando cuadriláteros	Sistema automatizado por medio de motores	Encuentro de semi arcos en la cúspide que restringe el movimiento. Sistema de frenado en los motores. Tensores con longitud determinada	Sistema automatizado de motores para el plegado de los elementos	No está construido. Barras de diferente tamaño.	Composición de diferentes geometrías, gracias al diseño paramétrico. Nuevas alternativas de tensores durante el proceso de despliegue. Barras con varios agujeros, adaptable a diferentes posiciones de articulaciones
 Deployable Structures. Zhong You	Sistema de barras articuladas tipo tijera	Se despliega en el suelo y luego se levanta para posicionarlo verticalmente	El diseño del nodo incluye el tope para bloquear el movimiento en la etapa final de despliegue	Posicionar el arco en el suelo. Girar las barras en el sentido correcto para plegar la estructura	Dificultad para izar el arco desplegado.	Posicionamiento de tijeras en otro sentido. Desarrollo de nudo en la articulación central de la barras que responde a la deficiencia del canto central. El nodo controla el tope máximo de despliegue

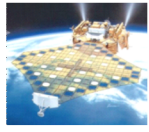
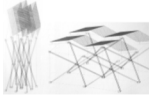
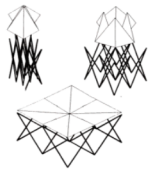


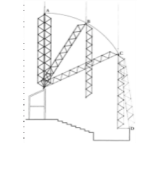

SISTEMA TIPO TIJERA

TABLA 2.1 Selección de características y aportes en los principales referentes analizados

Aplicaciones/ejemplos		Características				
Imagen	Mecanismo	Despliegue	Bloqueo del movimiento	Pliegue	Desventajas	Ventajas/ aportes/Innovación
  <p>Albergues militares</p>	Sistema tipo tijera. Módulos triangulares y cuadrangulares	Manual. Despliegue desde el perímetro exterior. Mástiles adicionales para elevar la estructura	Apertura máxima de las tijeras. Sistema de bloqueo por diagonales. Base perpendicular al suelo. Estacas para fijar la estructura al suelo	Desplazar las bases hacia afuera y replegar la estructura en el suelo	Dificultad para reemplazar una barra o nudo.	Materiales de alta resistencia Fabricación seriada e industrial. Accesorios de señalización para el proceso de montaje. Diseño de nudos que reciben varias barras. Posibilidad de acoplamiento de varios albergues
  <p>Refugio. Morethanshelters</p>	Sistema tipo tijera	Manual. Apertura de las tijeras al extender cada arco hacia el perímetro exterior y elevar la cúspide del domo	Barras de bloqueo incorporadas en la geometría del arco Punto de fijación en la base.	Soltar los arcos de la base y las barras de bloqueo. Proceder al plegado de los arcos hacia el centro, mientras la estructura se posiciona en el suelo	Inestabilidad durante el proceso de despliegue	Estructura espacial formada por arcos planos. Disminución de peso al eliminar barras. Diseño de un nodo principal, "clave" Disminución de la cantidad de nudos. Las barras de bloqueo incorporan el anclaje de la tela
 <p>Sistema Pop up</p>	Sistema tipo tijera. Módulo cuadrangular	Manual. Apertura de un modulo de tijera	Barras de bloqueo	Se replega la estructura manualmente hacia el centro	Limitación en diferentes configuraciones geométricas. Estructuras muy ligeras posibilidad de vuelco	Diferentes sistemas de bloqueo tipo click, magnético o de anclaje. Desarrollo nudos a nivel industrializado. Sección mínima en las barras
 <p>Plataforma de elevación</p>	sistema tipo tijera, doble capa	Mecánico. Extensión del pistón hidráulico	Controlado por las diferentes distancias que genera el pistón hidráulico	Cierre de la tijeras cuando el pistón se contrae	Despliegue únicamente lineal	Base con riel para el desplazamiento de la primera tijera. Barras de igual longitud Aumento de la sección de la barra en la articulación central

SISTEMA TIPO TIJERA - Aplicaciones comerciales

TABLA 2.2 Selección de características y aportes en los principales referentes analizados

Aplicaciones/ejemplos		Características				
Imagen	Mecanismo	Despliegue	Bloqueo del movimiento	Plegue	Desventajas	Ventajas/ aportes/Innovación
 Método Miura	Cables que tiran de los extremos de la superficie, Fuerza ejercida por un motor	Despliegue desde los extremos de la superficie	Cuando la superficie esta plana	Cuando los cables se contraen, acercan los extremos de la superficie, plegándola	Poca resistencia cuando la superficie esta desplegada	Solo basta con un movimiento para el proceso de despliegue. Geometría sencilla de teselación
 Vidriera hipercúbica desplegable. Piñero	Sistema tipo tijera combinado con paneles rígidos abisagrados, tornillo sin fin, engranajes y, cables y un motor.	Mecánico. Sobre la estructura de soporte se desliza el tornillo sin fin que despliega la estructura. Fuerza ejercida por el motor	Cuando los paneles se alinean y forman superficies planas paralelas	Giro del tornillo sin fin en dirección contraria al despliegue	Posible pandeo de la superficie en las juntas abisagradas	Combinación de sistemas tijera con paneles rígidos. Barras con accesorios para la sujeción del panel
 Félix Escrig	Sistema tipo tijera combinado con paneles rígidos abisagrados	Manual. Sistema de bisagras	Cuando los paneles se alinean y forman una superficie plana	Se repliega la estructura manualmente hacia el centro. Los paneles se levantan y quedan solapados	No se construyo. Dificultad en la viabilidad constructiva. No garantiza el despliegue simultaneo de tijeras con la plegadura	Paneles con bisagras en cada lado para mayor plegabilidad. Diferentes geometrías de teselado. Sistema de sópale entre paneles. Adaptación de paneles en superficies esféricas
 Chuck Hoberman			El sistema de bloqueo viene incorporado en la estructura y no en los paneles	La plegadura y la estructura se pliegan simultáneamente	No se construyo. Posible pandeo en las juntas longitudinales entre paneles	
 Tomohiro Tachi	Bisagras flexibles	Despliegue manual, tirando desde un extremo de la superficie plegada	Cuando la superficie esta plana	Acercando un extremo de la superficie al centro	Poca capacidad de soporte. Elementos con diferentes dimensiones	Software de simulación para superficies plegables. Bisagras flexibles. Bisagra tipo Vacuumatics, sistema neumático. Mayor dilatación entre paneles. Variación de la sección del panel para mejorar el plegado
 C.H. Hernández. Pabellón de Venezuela EXPO'92	Sistema de vigas abisagradas.	Despliegue manual tipo acordeón, apoyado con grúas.	Anclajes de muro que fijan la estructura desplegada y barras de bloqueo que arriostan la celosía. El diseño de la bisagra incluye el tope máximo de apertura	Eliminar las barras de bloqueo y anclajes. Colgar la estructura a una grúa y proceder a plegar la estructura como un acordeón	Muchos elementos adicionales para bloquear el movimiento de plegado. No incluye paneles de cubierta, se deben instalar posterior al despliegue.	Sistema de bisagra que incluye anclajes, el tope máximo de apertura y un riel protector. Fácil fabricación Rapidez en el ensamble Rápido montaje
 Fachada plegable. Kiefer Technic Showroom	Sistemas de paneles abisagrados, con rodamientos sobre rieles estructurales verticales. Motores eléctricos	Automatizado. Los paneles se despliegan de a dos y su movimiento de apertura es independiente de los demás	Sistema de frenado automático, cuando se detiene el motor según los parámetros cargados	Automatizado. Los paneles se pliegan de a dos y su movimiento de plegado es independiente de los demás	Sobrecostos al ser alta tecnología. Solo se pliega en un solo sentido	Incorporación de software para control de movimiento Sistema adaptable a las condiciones climáticas. Fácil instalación y recambio de piezas. Bisagra incluida dentro del diseño del panel

PLEGADURAS

TABLA 2.2 Selección de características y aportes en los principales referentes analizados




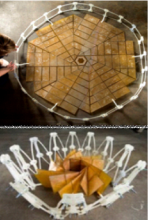
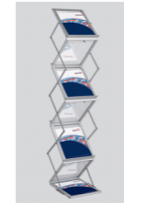

Aplicaciones/ejemplos	Características						
	Imagen	Mecanismo	Despliegue	Bloqueo del movimiento	Pliegue	Desventajas	Ventajas/ aportes/Innovación
PLEGADURAS	 Fachada Torres Al-bahr	Automatizado. Bisagras flexibles. Bisagras rígidas. Actuador. Pistón hidráulico. Sistema tipo paraguas	Cuando el pistón se retrae los paneles se posicionan en una superficie semi plana	Automatizado. Lo genera la longitud que se determine al extender el pistón	Cuando el pistón se extiende los paneles con geometría de triángulo rectángulo se pliegan	Sobre costo, alta tecnología	Alta tecnología en el desarrollo de software para la automatización Actúa según parámetros climáticos. Innovación en geometría y teselación Elementos con dimensiones iguales
	 Resonant Chamber	Actuadores lineales eléctricos Bisagras flexibles	Cuando los pistones se extienden la superficie se despliega	Cuando los paneles se alinean y forman superficies planas paralelas	Cuando el pistón se retrae la superficie se pliega	No llega a desarrollar una superficie plana	Uso de tecnologías para el diseño computacional y modelado. Fabricación digital. Diferentes acabados en los paneles. Paneles biselados para optimizar el plegado.
	 Rising. Robert van Embricqs	Listones abisagrados. Bisagras mecánicas tipo libro. Bisagras flexibles	Manual. Desplazar los extremos laterales de la superficie hacia afuera	Posicionar los listones buscando posiciones estables con la triangulación de la estructura	Se repliega al acercar los extremos laterales de la superficie hacia el centro	Posible falla en las bisagras flexibles por desgaste	Diseño práctico y sencillo. Fácil fabricado y ensamble. Bajo costo. Variedad de transformación
	 Panel Solar	Motor y tensores que despliegan la estructura de soporte. Paneles con bisagras flexibles	Automatizado. Cuando la estructura soporte se despliega, simultáneamente despliega la plegadura	Cuando la superficie esta plana. Sistema de tensores adicionales	Se contraen los tensores y repliega la estructura junto con la plegadura	Superficie muy delgada, posibilidad de fallo ante impacto de asteroides.	Despliegue concéntrico. Estructura de soporte perimetral desplegable. Despliegue simultáneo estructura y plegadura Óptima compactación de la superficie en estado plegado
	 Revistero plegable	Manual. Planos abisagrados por medio de un pasador	Despliegue manual, apertura de las tijeras, la estructura se despliega linealmente hacia arriba	Las barras de la primera tijera y la base contiene el anclaje para bloquear el movimiento	Desconectar el anclaje de bloqueo y plegar la estructura hacia abajo	Falta de anclaje al suelo. Posible vuelco de la estructura. El anclaje de bloqueo puede desengancharse	Plegadura combinado con el sistema tipo tijera. La barras incorporan las platinas para posicionar el pasador Transportable

TABLA 2.3 Selección de características y aportes en los principales referentes analizados

Aplicaciones/ejemplos		Características					
Imagen	Mecanismo	Despliegue	Bloqueo del movimiento	Plegue	Desventajas	Ventajas/aportes/Innovación	
 Velarium. Coliseo Romano	Manual. Poleas y cuerdas, sistema retráctil	Se tira de las cuerdas posicionadas radialmente para que giren sobre poleas y la tela logre desplegarse. Se despliega hacia el centro	Se atan las cuerdas a los mástiles	Movimiento inverso de las cuerdas para replegar la tela. Se repliega hacia el perímetro	No existe ruinas o datos históricos confirmados del funcionamiento real del Velarium Posibles embolsamientos y arrugas por falta de tensión en la tela.	Cubierta adaptable a condiciones ambientales con mecanismos sencillos. Piezas iguales de tela. Admite posiciones intermedias e independientes	
 Alas mecánicas. Da Vinci	Manual, sistema abatible. Mecanismos de palanca, cuerdas, poleas y barras	Se genera al ejercer fuerza hacia abajo sobre la palanca que transmite el movimiento para que el ala sea abatible	Si no se produce fuerza sobre la palanca, no hay movimiento	Se genera al ejercer fuerza hacia arriba sobre la palanca para que el ala sea abatible	Según el peso del ala, puede necesitar de más fuerza, que afecta la estructura de soporte y el funcionamiento	La longitud total de las barras se sujeta al textil. La tela se posiciona pretensada. El textil proporciona resistencia ala estructura de barras	
 Cubierta retráctil. Frei Otto	Motorizado. Sistema retráctil. Los carretes se desplazan sobre los cables radiales sujetando puntos extremos de la membrana	Los carretes tiran de la membrana desplegándola desde el mástil hacia el perímetro del espacio	Cuando se detiene el motor y la membrana es tensionada. Sistema de freno adicional	Los carretes se desplazan hacia el mástil replegando la membrana	Acumulación de agua mientras esta replegada.	Construcción ligera, estructura basada en cables. Protege en situaciones de lluvia, impermeable. Mecanismos sencillos	
 Parasoles tipo paraguas. Frei Otto	Cilindros hidráulicos. Barras articuladas. Sistema tipo paraguas	Los cilindros hidráulicos extienden su brazo telescópico, las barras articuladas se desdoblán y despliegan la membrana	Cuando se extienden por completo el cilindro hidráulico y la membrana se tensa	El cilindro hidráulico se contrae y dobla las barras articuladas junto con la membrana	Posibilidad de vuelco. Suelo adecuado para cimentación o anclajes de fijación para el mástil.	Despliegue simultaneo de la estructura y la membrana. Diferentes configuraciones geométricas. Plegado ordenado	
 Pabellón de Venezuela EXPO 2000	Cada pétalo se mueve por la fuerza de un cilindro hidráulico.	Cuando los cilindros hidráulicos se extienden, cada pétalo gira desde su punto de articulación en forma abatible hacia arriba	Sistema de freno integrado en el cilindro hidráulico	Cuando los cilindros hidráulicos se retraen, cada pétalo gira desde su punto de articulación en forma abatible hacia abajo	Sobrecosto por fabricación y montaje de estructuras de grandes luces	Admite posiciones intermedias. Variedad de transformación. Superficies sinclásticas, facilita los desagües.	
 Parasoles tipo paraguas. Félix Escrig	Sistema tipo tijera.	Apertura de las tijeras sobre el mástil central, que transmite el movimiento de despliegue a los demás módulos de tijeras	Sistema de bloqueo en el mástil y determinado por la geometría de la membrana tensada	Cierre de las tijeras sobre el mástil central, que transmite el movimiento de plegue a los demás módulos de tijeras	Arrugas, posible embolsamiento en posición desplegada. Carencia de líneas de plegue en la capa inferior, el plegado no es ordenado	Combinación de sistema tipo tijera con membranas desplegables. Despliegue simultaneo estructura y textil. Doble capa, superior e inferior	

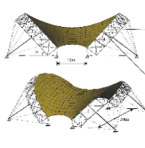
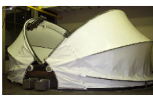
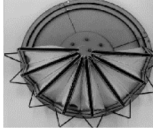

CUBIERTAS TEXTILES DESPLEGABLES

TABLA 2.3 Selección de características y aportes en los principales referentes analizados

Aplicaciones/ejemplos		Características					Ventajas/ aportes/Innovación
Imagen	Mecanismo	Despliegue	Bloqueo del movimiento	Pliegue	Desventajas		
 Cubierta Auditorio. Félix Escrig	Motorizado. Carros de tracción impulsados por motores que se desplazan sobre rieles. Sistema tijera de arcos articulados	Desplazamiento de los patines que abre las tijeras y despliega la totalidad de la cubierta	Sistema de freno en los patines y cuando la membrana se posiciona en su estado final de despliegue y tensionada	Desplazamiento de los patines en sentido contrario para cerrar las tijeras y replegar la cubierta	Posible embolsamiento de agua en estado plegado. Dificultad durante el montaje de los arcos articulados, al no ser coplanares	Estructura visible al exterior. Sistema de sujeción de la membrana mediante acordonado. Patronaje adecuado a la geometría de los arcos Plegado ordenado de la membrana	
 Cubierta Piscina. Félix Escrig	Manual. Sistema tipo tijera, apertura por gravedad controlado por cables	La estructura es colgada en puntos específicos y se despliega por peso propio	Al fijarse a los puntos de anclaje al suelo	Previamente colgada la estructura. Se eliminan los puntos de conexión de los anclajes de suelo y se repliega la estructura hacia el centro	Dificultad proceso de pliegue	Puntos de sujeción de la lona: articulaciones inferiores de las tijeras Pinzados de la membrana hacia el interior para garantizar el plegado ordenado. Despliegue simultáneo.	
 Cubierta cilíndrica. Masao Saito	Manual. Sistema tipo tijera	Apertura de las tijeras de los extremos para desplegar la estructura completa	Barras de bloqueo tensores y anclajes al suelo	Cierre de la tijeras	La membrana solo cubre la estructura, las bocas de la bóveda de cañón quedan abiertas	Estructura visible al interior. La membrana va al exterior Puntos de sujeción de la lona: articulaciones superiores de las tijeras	
 Sistema de tijeras lineales. Mollaret	Manual. Sistema tipo tijera.	Apertura de las tijeras	No específica	Cierre de las tijeras	La agrupación solo se despliega en un solo sentido. No proporciona protección frente a la lluvia	Membrana pretensada. Valles y cretas: puntos de sujeción en las articulaciones superiores y centrales de las barras Incluye relingas arqueadas en los valles para mantener la tensión de la tela y generar desagües.	
 Estructura textil híbrida desplegable	Manual. Barras articuladas	Apertura del módulo tijera	Barras de bloqueo transversales para triangular la estructura. Tensión máxima de la membrana	Eliminar las barras de bloqueo y cerrar el módulo de tijera.	Pocos puntos de fijación de la lona a las barras, que puede afectar la seguridad de la estructura.	Diseño único de patrón, simplifica los procesos de fabricación. La forma de la membrana se adapta a la curvatura de la estructura, ofreciendo varias posibilidades con el mismo patrón.	
 Módulos bipirámides desplegables	Manual. Barras articuladas	Apertura de un módulo bipirámide, similar al mecanismo de paraguas	Tensores y máxima tensión de la membrana	Cierre del módulo bipirámide, posicionar las barras en vertical	Posible acumulación de agua en los valles	Mástil telescópico, genera puntos altos en la membrana. El diseño del nudo incorpora la sujeción de la tela (apisonada) y paso de los tensores. Sujeción de la tela desde los nudos o lineal a la barra.	


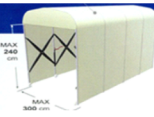


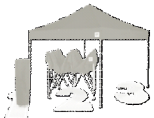
CUBIERTAS TEXTILES DESPLEGABLES

TABLA 2.3 Selección de características y aportes en los principales referentes analizados

Aplicaciones/ejemplos		Características					
Imagen	Mecanismo	Despliegue	Bloqueo del movimiento	Pliegue	Desventajas	Ventajas/ aportes/Innovación	
 <p>Estructura Mariposa para recintos espaciales</p>	Sistema tipo tijera con cables pasantes. Conexión tipo pivote para lograr la inclinación de los arcos	La apertura de un módulo cuadrangular tipo tijera genera la fuerza para el despliegue total del arco	Sistema de bloqueo a través de barras adicionales en cada módulo, que al posicionarse colinealmente, en la etapa final de despliegue, frenan el proceso de despliegue.	Desbloquear la posición colineal de las barras adicionales y proceder al pliegue de cada arco	La membrana no hace parte del proceso de despliegue, se debe instalar después de que los arcos estén desplegados y en su posición final. Incrementando los tiempos de montaje.	La inclinación de los arcos genera mayor área a cubrir por la lona. La tensión de la membrana colabora para mantener la estructura en equilibrio. Mástiles y cables para mantener los arcos en su posición	
 <p>Domo plegable para el telescopio GRECOR</p>	Sistema de pivote automatizado para rotar los arcos estructurales desde la posición horizontal hasta su posición final.	Despliegue de las secciones de membrana a través de la rotación de los arcos	El sistema finaliza su despliegue cuando se juntan en la cúspide las dos mitades de la esfera y los arcos se bloquean entre sí	Rotación de los arcos en sentido inverso	Posibles fallos en el proceso de acople entre los dos arcos finales para garantizar una junta estanca	Secciones de membranas iguales. La membrana genera la estabilidad estructural de los arcos. Proceso de pliegue y despliegue sencillo.	
 <p>Cubierta. Marco plegable</p>	Manual. Sistema de marcos abisagrados en la cúspide y sistema de riel y rodamientos en la base.	Apertura de cada marco, similar al movimiento de un acordeón. El ángulo entre marcos aumenta	Tensión máxima de la membrana	Movimiento de los arcos, disminuyendo el ángulo de apertura	La membrana solo cubre la estructura, las bocas de la bóveda de cañón quedan abiertas	Obtener una estructura en equilibrio durante las diferentes etapas de despliegue. Implementación de anclajes adaptables para cambiar la tensión de la membrana	
 <p>Cubierta desplegable para campo de tenis</p>	Sistema tipo tijera con cables pasantes y poleas para desplegar y replegar la estructura	Apertura de las tijeras de cada tramo. Despliegue simultáneo	Sistema de bloqueo cuando se juntan en la cúspide los dos tramos de tijeras agrupadas	Eliminar conexión entre barras en la cúspide de los arcos. Cierre de las tijeras para plegar la estructura	Los bordes de la membrana que corren a lo largo de los arcos de tijera no están sujetos a las barras. lo que implica que no existe una junta estanca.	Membrana posicionada entre los arcos Mayor pronunciamiento en crestas y valles: puntos de sujeción articulaciones superiores e inferiores de las barras. Relingas arqueadas en valles y crestas	

CUBIERTAS TEXTILES DESPLEGABLES

TABLA 2.3 Selección de características y aportes en los principales referentes analizados

Aplicaciones/ejemplos		Características					
Imagen	Mecanismo	Despliegue	Bloqueo del movimiento	Plegue	Desventajas	Ventajas/ aportes/Innovación	
 Cube	Manual. Barras articuladas	Posicionada la base del cubo, tirar hacia afuera los puntos centrales de las caras laterales (nudos). Se configuran pirámides con la tensión de las barras y la tela	Tensores exteriores desde los nudos al suelo. Membrana tensionada y el estado final de despliegue.	Empujar hacia el interior los nudos centrales de las caras laterales. Plegar las barras y posicionarlas en un paquete vertical para su almacenamiento	Facilidad de plegue imprevisto. Falta barras de bloqueo o estructura de redundancia	Rapidez en el montaje. Geometría sencilla. Agrupación de módulos: sistema de acople, conexión tipo cremallera	
 Túnel desplegable	Manual. Sistema tipo tijera, accesorios de complemento como rieles, ruedas o patines	Apertura de la tijeras linealmente	Barra de bloque	Cierre de la tijeras	Posibles embolsamientos y arrugas en la parte superior de la cubierta	Sistema de rieles que guían el recorrido de apertura de la tijeras. Facilidad mantenimiento lona, piezas independientes. Adición de módulos. Uso en posiciones intermedias	
 Albergues militares	Manual. Sistema tipo tijera	Apertura de las tijeras hacia el perímetro exterior y empujar hacia arriba la cúspide para desplegar la estructura completamente	Apertura máxima de las tijeras. Sistema de bloqueo por diagonales. Posicionamiento de la base coplanar al suelo. Estacas para fijar la estructura al suelo	Cierre de la tijeras		Estructura oculta. Cubierta exterior e interior. Extensiones de la membrana para solapes en accesos y aislamiento del suelo. Plegado de la tela en forma ordenada	
 Refugio desplegable			Barra de bloqueo tensores y anclajes al suelo			Instalación de la lona por partes. Conexión de estructura y membrana tipo eje roscado, ojal y tapón de rosca. Conexión de secciones de la membrana por medio de cremalleras. Sistema de acople entre módulos sistema de cremallera	
 Carpa plegable			Botón de ajuste tipo push, accionado cuando los módulos de tijera se posicionan en el estado final de despliegue definido			Son estructuras que no están diseñadas para soportar grandes cargas de peso o viento	Incorpora mastiles verticales para aumentar la altura de los puntos altos en la membrana. Conexión a estructura con tiras de velcro

CUBIERTAS TEXTILES DESPLEGABLES. Aplicaciones comerciales



SISTEMA TIJERA Y TIPOS DE DESPLIEGUE

El presente capítulo explica la definición, clasificación y tipos de agrupaciones basados en el sistema tipo tijera (STT) para obtener configuraciones espaciales desplegables.

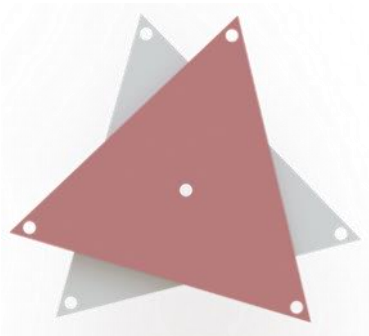
Se presenta una serie de requerimientos geométricos para cumplir las correctas condiciones de plegabilidad en agrupaciones planas y proceder a la configuración de módulos tridimensionales para formar agrupaciones más complejas y proyectarlas a posibles aplicaciones arquitectónicas.

Para facilitar la comprensión de lector y visualizar las diferentes posibilidades de agrupaciones, se expone una serie de tablas descriptivas que explica de manera gráfica cada una de las agrupaciones presentadas en este capítulo, complementado cada tabla con imágenes de las maquetas a escala realizadas en cada caso, que permite visualizar, comprender y analizar los procesos de fabricación, ensamble, montaje y pliegue-despliegue de las estructuras desarrolladas.



Contenido del capítulo

3.1 Sistema tipo tijera y clasificación	118
3.1.1 Tijeras anguladas	121
3.1.2 Tijeras rectas	122
3.1.2.1 Tijeras con articulación central	122
3.1.2.2 Tijeras con articulación excéntrica	123
3.2 Tipos de despliegue con tijeras rectas	125
3.2.1 Despliegue lineal	127
3.2.1.1 Tijeras rectas con articulación central. Agrupación plana	127
3.2.1.2 Tijeras rectas con articulación excéntrica. Agrupación plana	128
3.2.1.3 Tijeras rectas con articulación excéntrica. Agrupación plana. Despliegue inclinado	129
3.2.1.4 Agrupación de tijeras que no genera el pliegue total	130
3.2.1.5 Redes Desplegables a partir de planos	131
3.2.1.6 Agrupaciones tridimensionales/Superficies	132
a. Red cuadrangular	134
b. Red triangular	138
3.2.2 Despliegue con curvatura	141
3.2.2.1 Superficie con simple curvatura	144
a. Red cuadrangular	144
b. Red triangular	147
3.2.2.2 Superficie anticlástica (Gauss -)	150
a. Red cuadrangular	150
b. Red triangular	154
3.2.2.3 Superficie sinclástica (Gauss +)	155
a. Red cuadrangular	155
b. Red triangular	159
c. Geometría a partir de la configuración de bóvedas	180
3.3 Conclusiones	185



3.1 Sistema tipo tijera y clasificación

Se define una tijera como la articulación de dos barras o planos en un punto central o descentrado posicionado sobre el eje longitudinal de los elementos a articular (figura 3.1).

El sistema tipo tijera permite el giro de un elemento con respecto a otro sin que puedan separarse [13], el encadenamiento de estos módulos forman una agrupación de tijeras que generan una variedad de configuraciones geométricas de redes desplegadas planas o tridimensionales.

Para configurar una agrupación de tijeras es necesario determinar la posición de los puntos de articulación que se ubican en los extremos de cada elemento, estos permiten enlazar una tijera con la siguiente y así sucesivamente.

Si la relación entre los puntos de articulación posicionados en los extremos, forman un ángulo diferente a 180° se denominan tijeras anguladas. Y si las articulaciones forman un ángulo de 180° son tijeras rectas (figura 3.2).

Figura 3.1 Sistema tipo tijera. Barras articuladas y planos articulados.
Fuente: Elaboración del autor

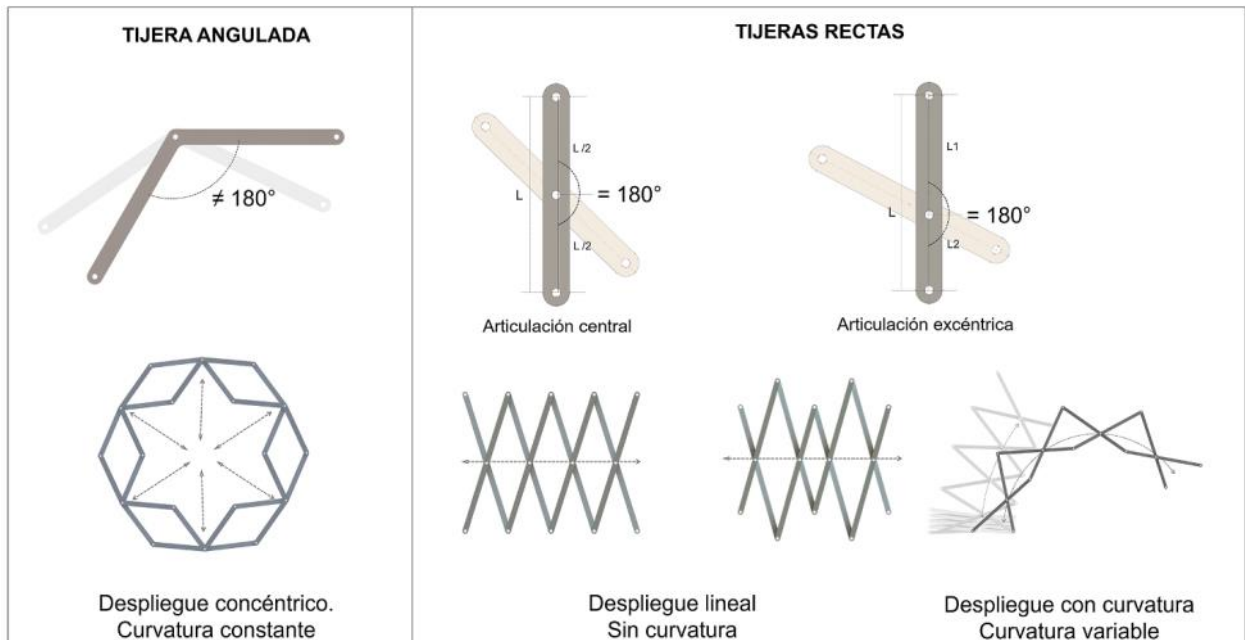


Figura 3.2 Denominación de tijeras según posición de las articulaciones y su tipo de despliegue. Agrupación de tijeras anguladas y agrupación de tijeras rectas. Fuente: Elaboración del autor

Es importante señalar que para obtener el correcto pliegue y despliegue de una agrupación de tijeras, es necesario cumplir la condición de plegado definida en la siguiente ecuación (figura 3.3):

$$a + b = c + d$$

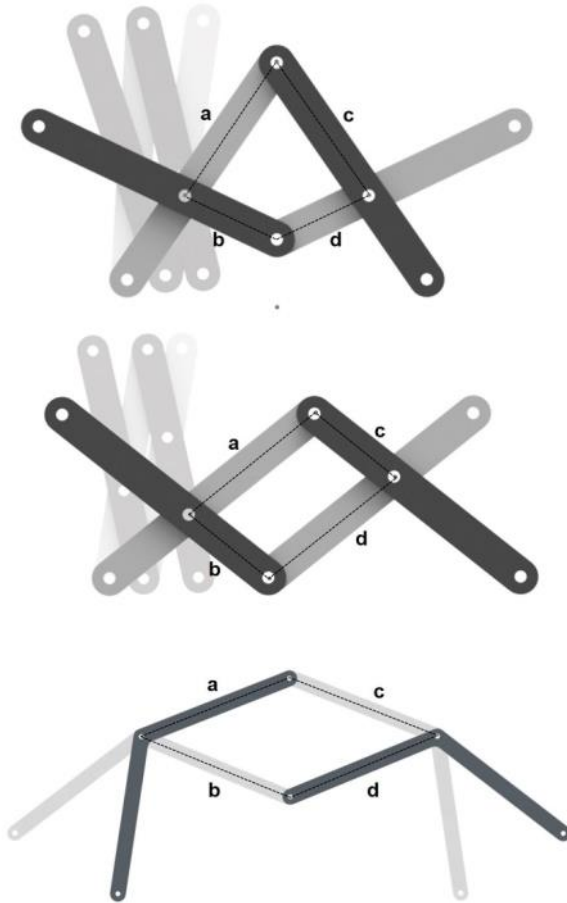


Figura 3.3 Condición de plegado necesaria para la correcto pliegue y despliegue de la agrupación de tijeras rectas y anguladas.

Fuente: Elaboración del autor

A partir de estas dos tipologías descritas, tijeras rectas y tijeras anguladas y cumpliendo la condición de plegado, se propone una clasificación de las posibles configuraciones que se pueden obtener, señalando las características de despliegue y la posición de la articulación central.

El mapa conceptual que se visualiza a continuación limita la tipologías de despliegue solo a las que se generan con barras del mismo tamaño y no se combinan sistemas entre tijeras rectas y tijeras anguladas (figura 3.4).

Esta clasificación se presenta como una guía que establece el campo de estudio específico, aclarando que es posible generar más configuraciones y diversidades de despliegues con nuevas geometrías, combinando sistemas, módulos y tamaños de los elementos, donde su exploración puede generar todo un nuevo campo de aplicaciones, fuera de clasificación presentada.

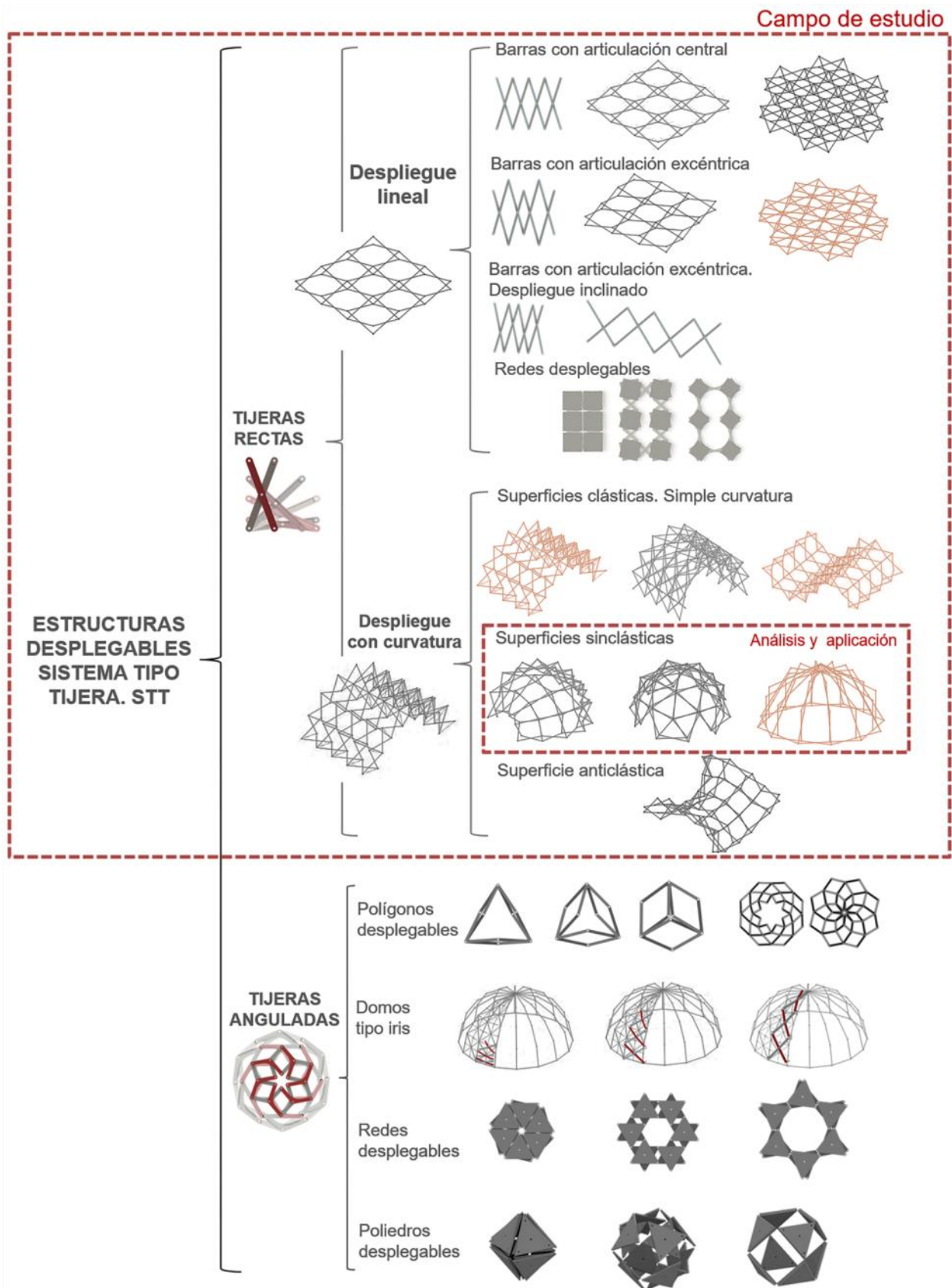


Figura 3.4 Clasificación estructuras desplegables. Sistema tijera.

Tipologías de despliegue con barras del mismo tamaño.
No se combinan sistemas entre tijeras rectas y tijeras anguladas.

Esta clasificación pretende ser una guía para explorar, reinterpretar, combinar sistemas y proponer nuevas alternativas de diseño basadas en la plegabilidad y movilidad estructural. Fuente: Elaboración del autor

3.1.1 Tijeras anguladas

La agrupación de barras anguladas, con dimensiones iguales, genera geometrías basadas en polígonos o poliedros regulares que se despliegan concéntricamente, esto determina en su proceso de despliegue, una curvatura constante al mantener un diámetro continuo en cada etapa de despliegue (figuras 3.5 y 3.6).

Uno de los principales exponentes de este tipo de agrupaciones y que explora diferentes configuraciones a partir de tijeras anguladas es Chuck Hoberman que demuestra con sus diseños de juguetes, esculturas y escenarios las innumerables posibilidades de diseño con este sistema desplegable (figuras 2.43 y 3.7).

Aunque es un campo de estudio llamativo para continuar explorando en nuevas configuraciones geométricas para aplicaciones arquitectónicas, el presente estudio no profundiza en el tema de las tijeras anguladas, el énfasis de este estudio se basa en sistemas desplegables tipo tijera con barras rectas. (Más información sobre configuraciones con tijeras anguladas. (Ver Anexo 1).



Figura 3.5 Hexágono desplegable a partir de barras anguladas.

Fuente: Elaboración del autor

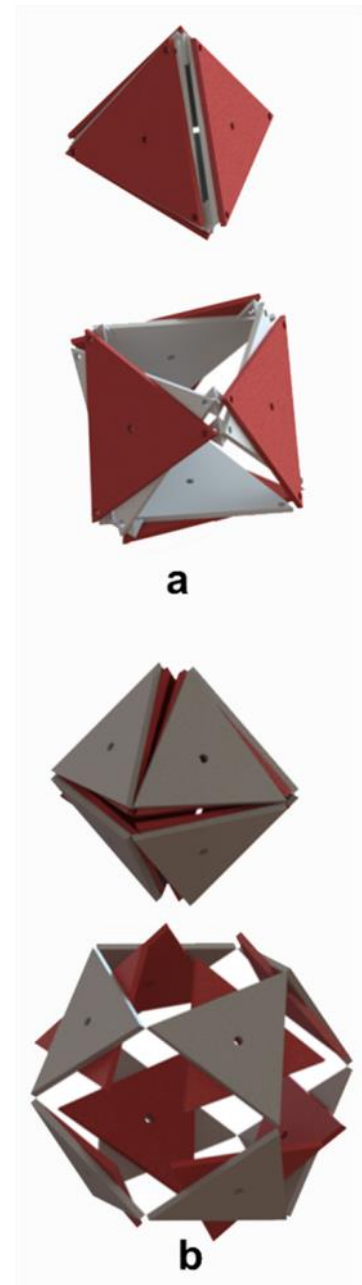


Figura 3.6 Poliedros desplegables, reemplazando las caras por planos. Sistema tipo tijera. a) Tetraedro desplegable. b) Octaedro desplegable (Ver Anexo 1).

Fuente: Elaboración del autor

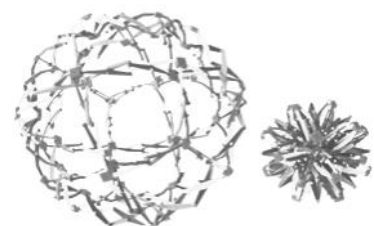


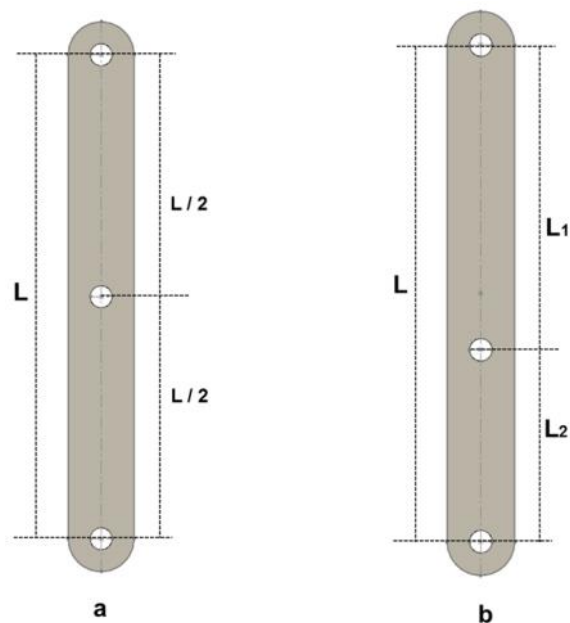
Figura 3.7 Esfera desplegable

[41]

3.1.2 Tijeras rectas

La tijeras rectas contienen tres articulaciones definidas en dos grupos, articulaciones de los extremos y la articulación central. En cada barra las articulaciones de los extremos y la articulación central forman una línea recta. La diferentes tipos de despliegue que se pueden obtener con la agrupación de tijeras rectas, se determinan con la ubicación de la articulación central sobre el eje longitudinal, este posicionamiento define dos categorías de sistemas con tijeras rectas:

Figura 3.8 a) Barra con articulación central. b) Barra con articulación excéntrica.
Fuente: Elaboración del autor



3.1.2.1 Tijeras con articulación central

El punto de articulación entre dos barras se posiciona sobre el eje longitudinal, en el centro exacto de cada elemento, es decir, corresponde al punto medio de la distancia longitudinal y transversal de la barra o el plano (figura 3.8 a). La agrupación de tijeras rectas con articulación central generan un despliegue lineal (figura 3.9).

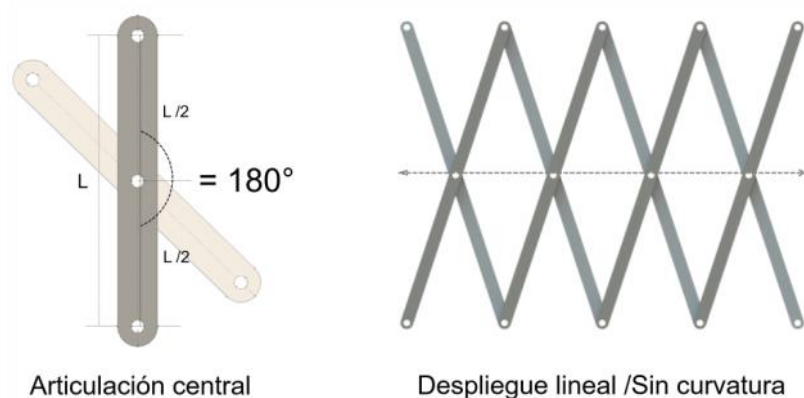


Figura 3.9 Agrupación de tijeras rectas con articulación central.
Fuente: Elaboración del autor

3.1.2.2 Tijeras con articulación excéntrica.

El punto de articulación entre dos barras, se posiciona en un punto diferente al centro de la distancia longitudinal de cada elemento, sin olvidar en mantener la línea recta entre articulaciones (figura 3.8 b).

Partiendo de una agrupación de módulos de tijeras, compuestos con barras rectas del mismo tamaño y con articulación excéntrica posicionada a la misma distancia en ambos elementos. La agrupación de módulos de tijeras con este tipo de articulación puede generar un despliegue con trayectoria lineal o un despliegue con una trayectoria que describe una curvatura (figura 3.10), dependiendo de la posición de la tijera y su enlace con la siguiente tijera adyacente, en el apartado 3.2 se describe con más detalle esta tipología de agrupación y despliegue.

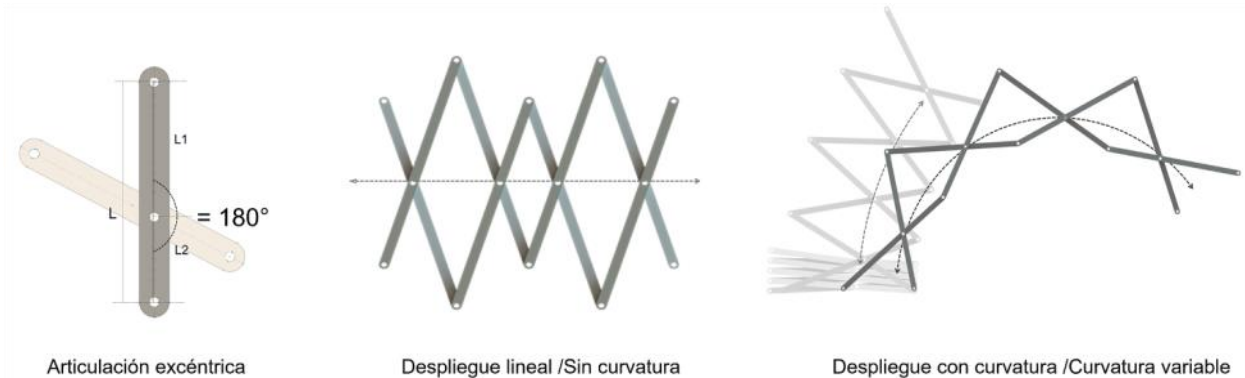


Figura 3.10 Agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica.

Fuente: Elaboración del autor



3.2 Tipos de despliegue con tijeras rectas

Los sistemas desplegables que se pueden obtener con la agrupación de tijeras rectas, con articulación central o excéntrica, generan tipologías de despliegues lineales o curvos, que dependen del posicionamiento de la barra y el correcto enlace con la siguiente tijera adyacente.

Aunque el énfasis del estudio son los despliegues que generan curvatura, específicamente superficies sinclásticas, se explica adicionalmente como se obtienen los despliegues lineales, para establecer la correcta posición de las barras en cada tipo de despliegue, evitando confusiones y resaltando las diferencias entre despliegues.

Se describen cuatro posibilidades de superficies configuradas a partir de agrupaciones de tijeras rectas: Superficie plana, superficie con simple curvatura, superficie sinclástica y superficies anticlástica, configuradas a partir de redes cuadrangulares y redes triangulares (figura 3.11).

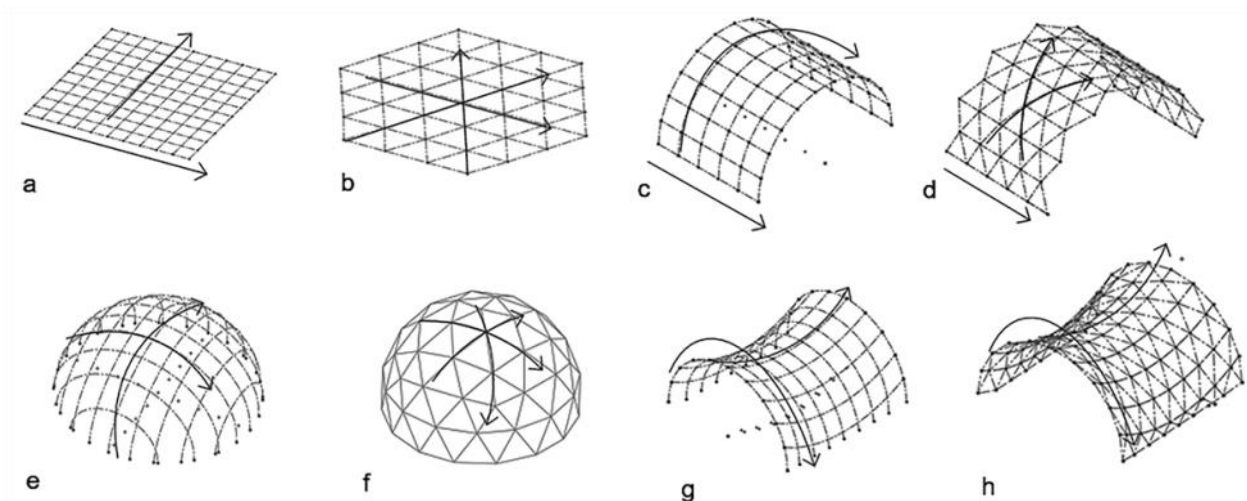


Figura 3.11

- a) Superficie plana, red cuadrangular.
- b) Superficie plana, red triangular.
- c) Superficie con simple curvatura red cuadrangular.
- d) Superficie con simple curvatura red triangular.
- e) Superficie sinclástica, red cuadrangular.
- f) Superficie sinclástica, red triangular.
- g) Superficie anticlástica, red cuadrangular.
- h) Superficie anticlástica, red triangular.

Fuente: Elaboración del autor

Para dar inicio a la descripción de las diferentes posibilidades de agrupaciones y despliegues, se enfatiza nuevamente en cumplir la condición de plegado. Se observa que para cumplir esta condición, debe enlazarse por lo menos dos módulos de tijeras para formar un cuadrilátero en el espacio vacío al unir dos tijeras (figura 3.12).

El análisis de la configuración de los cuadriláteros permite entender los requisitos necesarios para lograr la plegabilidad basado en los grados de libertad.

El principio del despliegue y posterior sistema de bloqueo en este tipo de estructuras planas se basa en mantener un grado de libertad (1GL). En este caso, el grado de libertad (DOF. Degree of freedom) hace referencia al movimiento del cuadrilátero conformando por las barras articuladas, el cual se comporta como una estructura deformable, es una estructura no estable.

Una explicación sencilla para comprender los grados de libertad es: Un polígono tiene tantos grados de libertad como aristas le faltan para ser estable [96].

El cuadrilátero tiene un grado de libertad, es decir que con una arista adicional se logra la estabilidad formal y en el caso del sistema tipo tijera se obtiene el bloqueo del movimiento (figura 3.12).

Figura 3.12 Grado de libertad de un cuadrilátero. 1GL. Con adicionar una barra se logra la estabilidad formal.

Fuente: Elaboración del autor



La siguiente ecuación comprueba los grados de libertad de un polígono y cuantas barras son necesarias para lograr la estabilidad formal:

$$2V = A + 3$$

V= Vértices A= Aristas

Aplicado al cuadrilátero que se forma en la figura 3.12:

$$2 \times 4 = 4 + 3$$

$$8 > 7$$

Presenta un grado de libertad

Entendida la deformación del cuadrilátero como un polígono con un grado de libertad, los diferentes tipos de despliegue que se analizan a continuación, definen diversas geometrías de cuadriláteros que se forman durante las etapas de despliegue en cada agrupación.

El presente estudio pretende visualizar, entender y analizar las características de los cuadriláteros que se forman entre módulos de tijeras, para comprender la posición de las barras y la agrupación de los mismos, según una tipología de despliegue específica.

3.2.1 Despliegue lineal

3.2.1.1 Tijeras rectas con articulación central. Agrupación plana

La primera agrupación básica para generar un despliegue lineal, es una agrupación plana de tijeras con articulación central, siendo todas las barras del mismo tamaño, se observa que en los espacios entre módulos tijera se forman cuadriláteros iguales en cada etapa de despliegue (figura 3.13).

En términos geométricos, son específicamente paralelogramos que tienen sus lados iguales y ángulos oblicuos. Y en algún momento durante el proceso de despliegue, se forman cuadrados cuando las barras de las tijeras se posicionan con un ángulo de 90° .

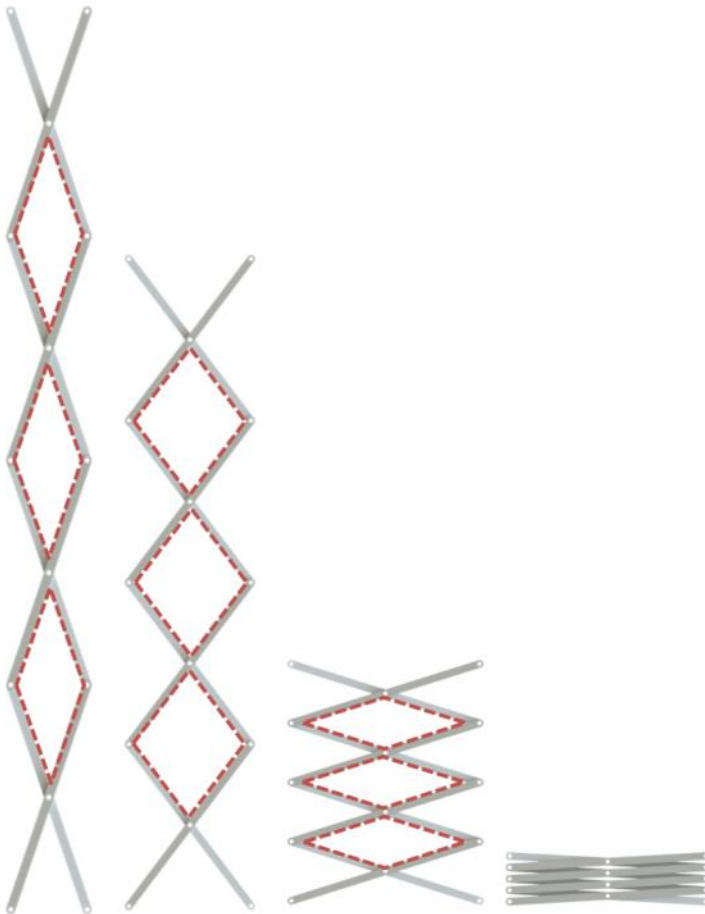


Figura 3.13 Proceso de despliegue agrupación de tijeras rectas con articulación central.
Fuente: Elaboración del autor

3.2.1.2 Tijeras rectas con articulación excéntrica. Agrupación plana

Un segundo ejemplo, consiste en la agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica. Para lograr un despliegue lineal, como en el caso anterior, se deben formar rombos entre los módulos de tijera.

El rombo se caracteriza por tener lados iguales, las diagonales son perpendiculares y no forma ángulos rectos, pero en este tipo de estructuras, cuyo movimiento de despliegue genera la deformación de los rombos, si que se obtienen cuadrados en algún momento, cuando las barras se posicionan a 90° entre ellas.

Como se tiene una articulación excéntrica, se generan dos distancias en la barra, un tramo largo y un tramo corto. De esta manera, la correcta posición de las barras en cada módulo de tijera, para obtener el despliegue lineal, corresponde a enlazar los tramos de igual longitud de un módulo de tijera con el siguiente, es decir, unir tramos largos entre módulos y en el siguiente nivel unir los tramos cortos con el módulo consecutivo, buscando conformar los rombos y siempre cumpliendo la condición de plegabilidad.

El resultado en las etapas de despliegue de la agrupación, son dos tamaños de rombos donde la medida de sus lados corresponde a las dos distancias dadas por la posición de la articulación excéntrica en la barra (figura 3.14).

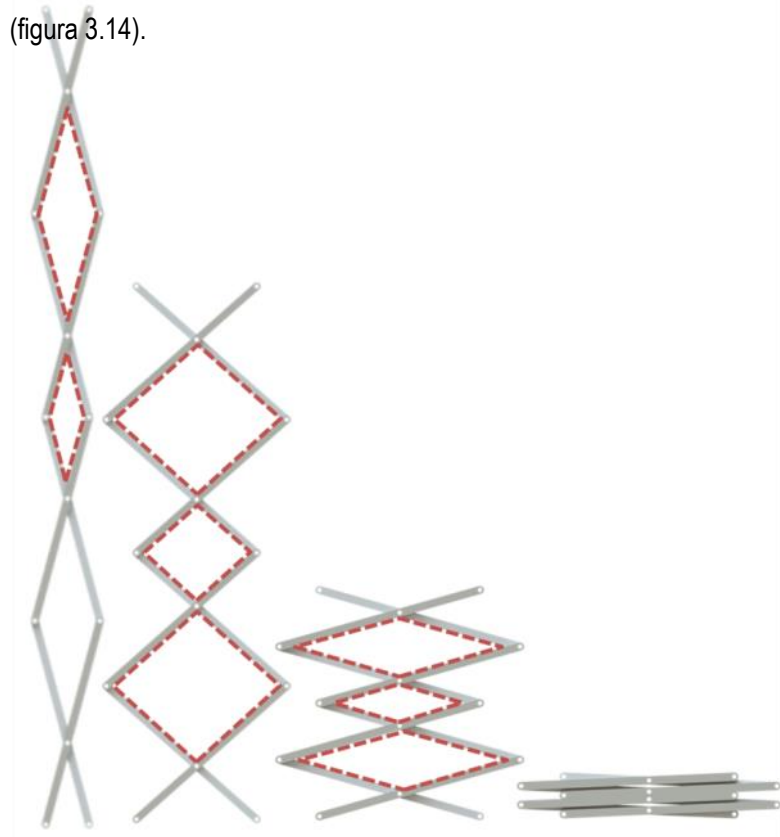


Figura 3.14 Proceso de despliegue agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica. Fuente: Elaboración del autor

3.2.1.3 Tijeras rectas con articulación excéntrica. Agrupación plana.

Despliegue inclinado.

Una tercera forma de agrupación, consiste en configurar romboides entre módulos de tijeras, es decir, paralelogramos que tiene sus lados continuos desiguales, pero los lados opuestos son iguales y sus ángulos son oblicuos. Sin olvidar que en algún momento del despliegue, cuando las barras formen un ángulo de 90° se forma un rectángulo.

Aquí, la unión entre tijeras debe corresponder a que el tramo corto de una tijera se enlaza con el tramo largo de la siguiente tijera, buscando configurar el romboide con la relación de que los lados opuestos son iguales. El despliegue que se describe, traza una línea inclinada, que se acentúa a medida que se despliega la agrupación (figura 3.15).

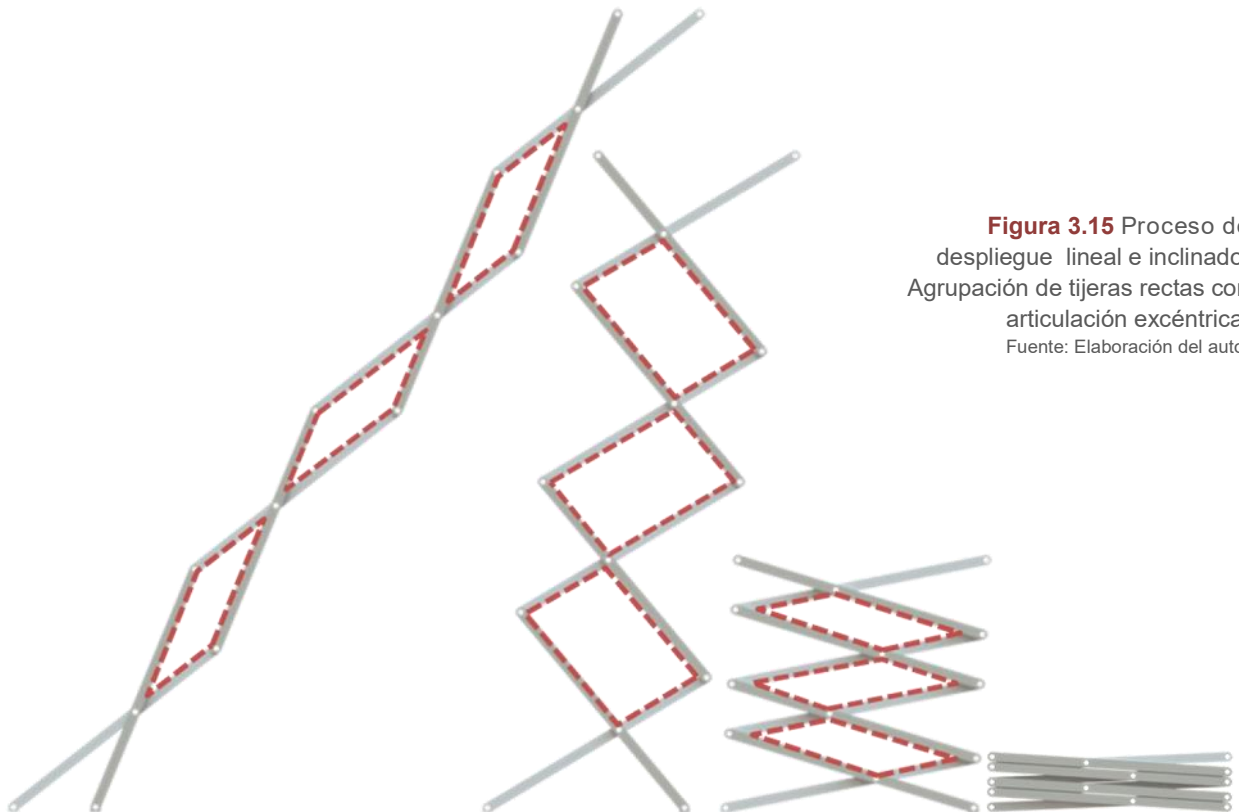


Figura 3.15 Proceso de despliegue lineal e inclinado. Agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica. Fuente: Elaboración del autor

3.2.1.4 Agrupación de tijeras que no genera el pliegue total.

Sucede cuando no se cumple la condición de plegabilidad, las barras de un módulo de tijera que se unen con el siguiente módulo adyacente forman cuadriláteros irregulares o tipo deltoides, donde la suma de los dos lados del cuadrilátero formado, correspondiente a cada módulo de tijera, no son iguales.

Esto no quiere decir que la agrupación este errónea, aunque no se obtenga un pliegue total de la agrupación, se puede aprovechar este tipo de posicionamiento de barras para generar otros tipos de despliegues irregulares o detener el proceso de pliegue en un punto específico por requerimientos del diseño (figura 3.16).

Figura 3.16 Proceso de despliegue de agrupación de tijeras rectas que no cumplen la condición de plegabilidad.
Fuente: Elaboración del autor



3.2.1.5 Redes Desplegables a partir de planos

Es posible también configurar redes desplegadas conformadas por planos que cumplan la relación de la línea recta entre los puntos de articulación por elemento, para así obtener un despliegue lineal.

De esta forma, se puede combinar barras rectas con planos, lo que permite realizar diferentes exploraciones que pueden llegar a generar interesantes configuraciones de estructuras desplegadas aplicables en diseños de fachadas, mobiliario o diseño interior (figura 3.17). Su exploración geométrica es perfectamente viable para extrapolarlo a agrupaciones espaciales, pero su estudio no corresponde al ámbito de esta investigación.

Se expone solo el concepto básico para visualizar otra forma de generar el despliegue lineal a partir del sistema tipo tijera conformado por barras y planos.

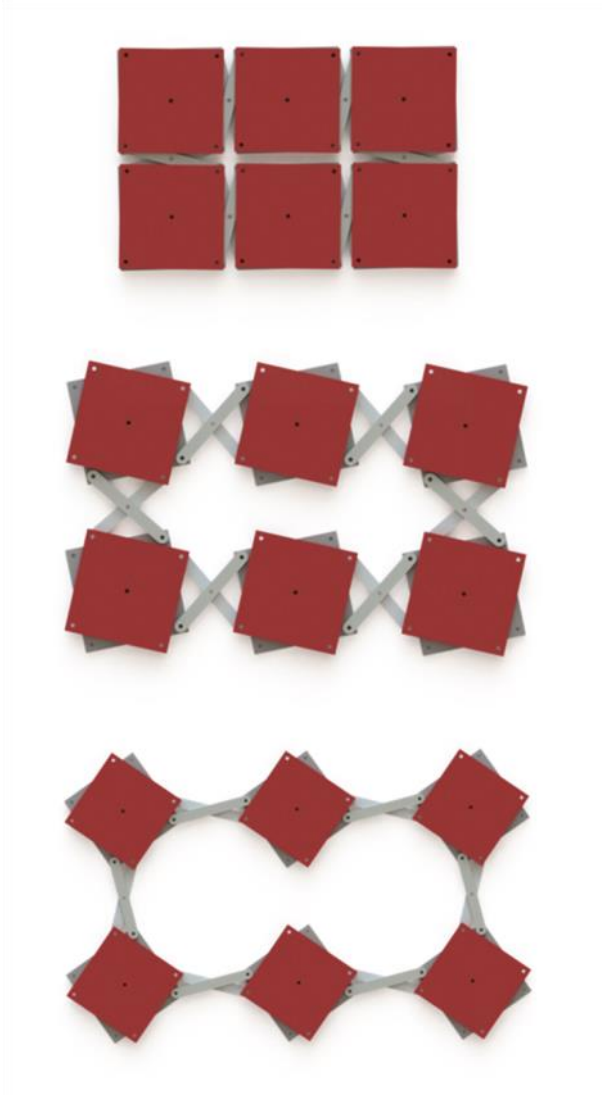


Figura 3.17 Red desplegable plana a partir de cuadrados y barras rectas.

Fuente: Elaboración del autor.

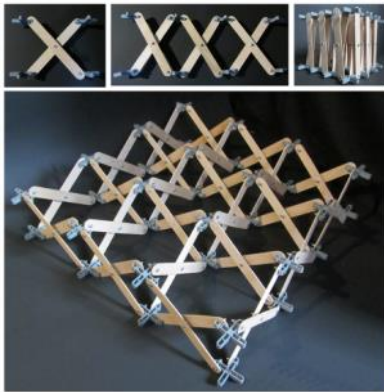


Figura 3.18 Maqueta. Agrupación espacial a partir de tijeras rectas con articulación central. Red cuadrangular. Despliegue lineal [64].



Figura 3.19 Torre desplegable. Agrupación espacial de tijeras rectas con articulación central. Red triangular. Despliegue lineal. Fuente: Resultados maquetas taller SMiA. Optativa Construcción ligera ETSAV, 2018 <https://smia-experimental.com/> Recuperado [10/01/2019]

Figura 3.20 Detalle de nodo para maqueta (impresión 3d) y articulación de las barras para formar una red cuadrangular. Tijeras rectas con articulación central. Despliegue lineal. Fuente: Elaboración del autor. Resultados maquetas taller de estructuras desplegables Recuperado [10/01/2019]

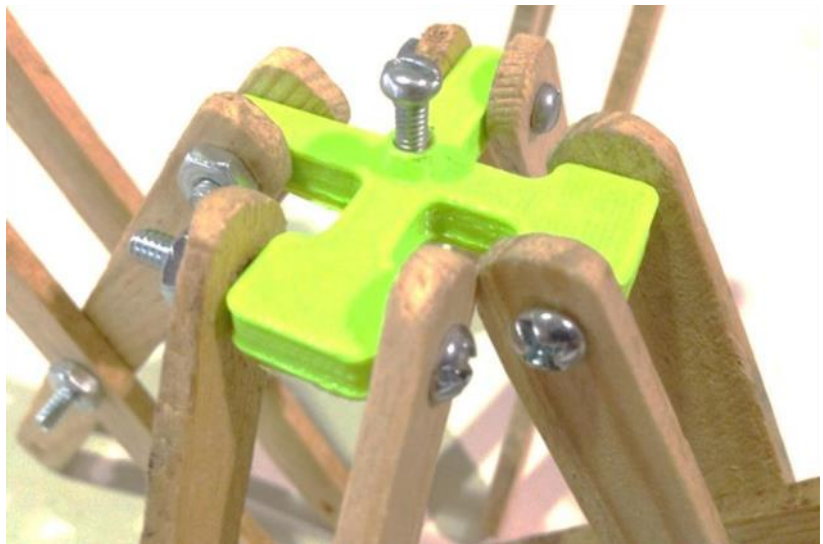
Figura 3.21 Detalle nodo (impresión 3d). Agrupación espacial a partir de tijeras rectas con articulación excéntrica. Red triangular. Despliegue con curvatura [87]. Fuente: Elaboración del autor. Workshop Pontificia Universidad Católica de Minas Gerais, Brasil. 2017

3.2.1.6 Agrupaciones tridimensionales/Superficies

Partiendo de las agrupaciones planas vistas anteriormente, se proyecta la repetición de los módulos de tijeras en los ejes (x), (y) o (z), lo que permite configurar redes desplegables con diferentes posibilidades espaciales, dependiendo en la dirección en que se agrupan los módulos de tijera en el espacio (figura 3.18 y 3.19).

El reto está en el diseño geométrico y técnico del nodo que articula las tijeras en distintas direcciones, de tal forma que no interfiera en el movimiento de plegado de la estructura, corresponda proporcionalmente a las dimensiones de las barras y permita el correcto ensamble, sin interferencias de las barras en cada dirección (figuras 3.20 y 3.21).

Dentro de los métodos más comunes y ampliamente desarrollados para las agrupaciones espaciales, se menciona el de Félix Escrig, él desarrolla la configuración de estructuras desplegables espaciales a partir de la geometría de prismas (figura 3.22), los cuales forman módulos de tijeras tridimensionales de tres, cuatro, cinco o seis tijeras, reemplazando cada cara del prisma por una tijera [25].



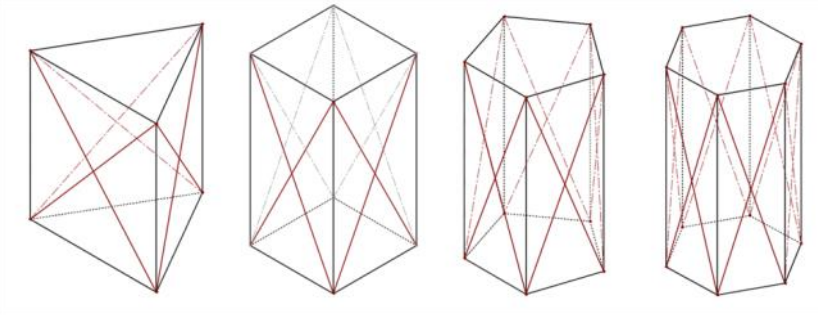


Figura 3.22 Agrupación de tijeras a partir de la geometría de prismas. Cada cara corresponde a una tijera [25].

En la actualidad, las agrupaciones espaciales con despliegue lineal más aplicadas y estudiadas por diferentes autores refieren a redes formadas por el encadenamiento de módulos triangulares (figura 3.19) o cuadrangulares (figura 3.18), las cuales generan cierto grado de estabilidad, facilidad en el ensamblaje y procesos de despliegue en su mayoría sin dificultades.

Para una mayor comprensión se visualiza en las tablas 3.1 a 3.19 las diferentes agrupaciones, señalando el tipo de superficie que se obtiene, el módulo base, el tipo de tijera, la correcta posición correspondiente a las agrupaciones de tijeras y las etapas de despliegue.

Complementando la descripción con la construcción de maquetas a escala experimentales, diseñadas específicamente con un formato tipo lego, implementando la tecnología del corte laser y la impresión 3D, para facilitar el aprendizaje sobre este tipo de estructuras en talleres académicos impartidos en distintas universidades liderados por el autor y con el apoyo del grupo de investigación SMiA (figuras 3.23).

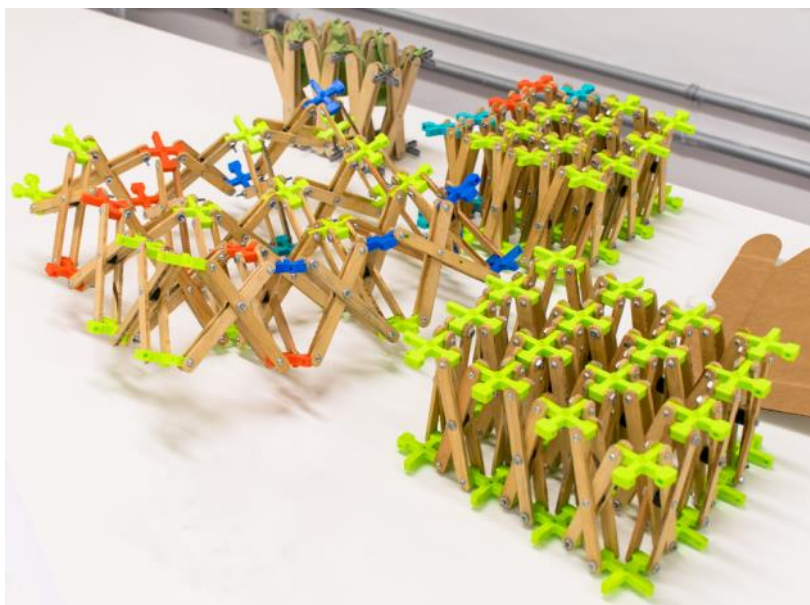


Figura 3.23 Kits de maquetas desplegables STT, desarrolladas durante la investigación. Implementación de corte laser e impresión 3D.
Fuente: Elaboración del autor.

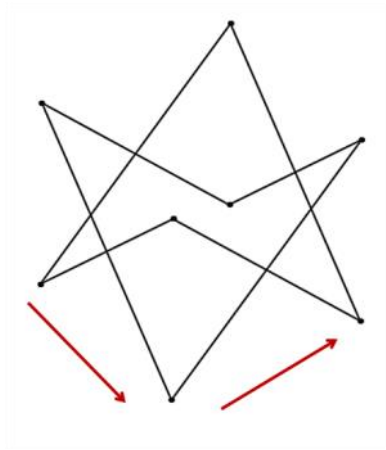


Figura 3.24 Módulo cuadrangular. Superficie plana desplegable a partir de barras con articulación central.
Fuente: Elaboración del autor.

Para una mejor comprensión en la descripción de las superficies, se define que la configuración de superficies desplegables están formadas por la agrupación de módulos, que determinan una unidad espacial cuadrangular o triangular. Cada módulo representa la agrupación de tijeras específicas para obtener un despliegue determinado.

a) Red cuadrangular

La primera categoría de superficie desplegable, corresponde a una superficie con despliegue lineal.

El módulo para obtener una superficie con despliegue lineal y con red cuadrangular, consiste en reemplazar cada cara de un cubo por una tijera con articulación central (figura 3.24), la agrupación de estos módulos permite generar una estructura espacial que se despliega y se repliega de manera lineal.

La tabla 3.1 expone la configuración apropiada con el STT para obtener esta tipología de superficie.

La configuración de esta superficie a nivel de maqueta, se representa en la figura 3.25, donde se explica el proceso de ensamble desarrollado, visualizando el paso a paso a seguir para conectar las tijeras y los nodos.

Tabla 3.1 Superficie plana. Agrupación de tijeras rectas. Despliegue lineal. Tijeras con articulación central. Red cuadrangular.
Fuente: Elaboración del autor.

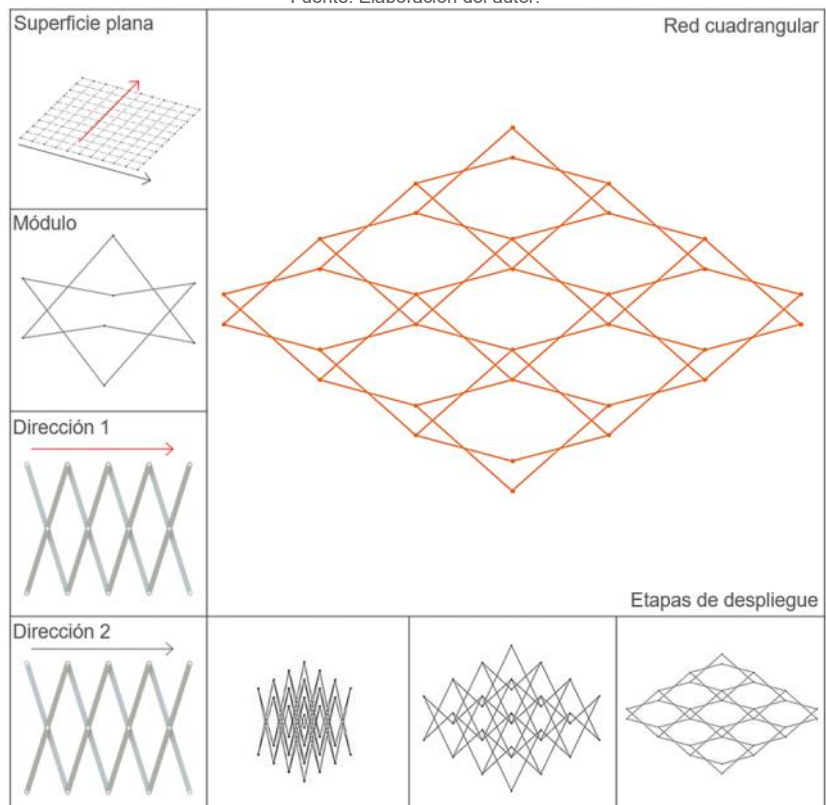




Figura 3.25 Secuencia de imágenes del paso a paso para el armado de una estructura desplegable con el STT. Agrupación de tijeras rectas con articulación central, red cuadrangular. Despliegue lineal. Materiales: Barras en madera (Palos de helado o bajalenguas), separadores plásticos para cerámica tipo cruz (nodos), tornillos, tuercas y manguera plástica (separador entre barras, diámetro un poco mayor al del tornillo). Maqueta realizada con simple capa de tijeras, las siguientes maquetas se elaboran con doble capa de tijeras para mejorar la estabilidad, resistencia y durabilidad de la maqueta. Fuente: Workshop ETSAV 2013-2016. Modelos y fotografías realizados por Annamaria Patiño Lakatos. <https://smia-experimental.com/> Recuperado [10/01/2019]

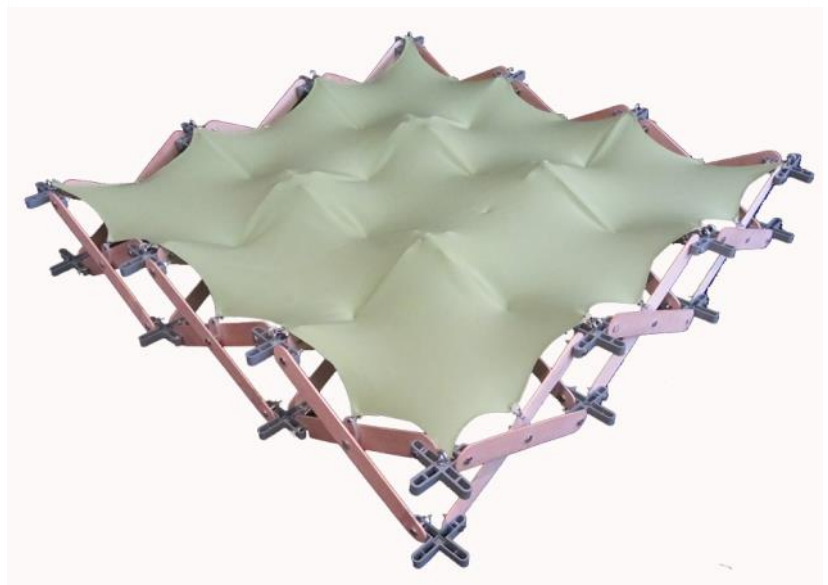
Figura 3.26 Agrupación de tijeras rectas con articulación central. Despliegue lineal. Red cuadrangular. Barras en MDF realizadas con corte laser. Nodo en PLA, impresión 3D. Conexiones entre elementos a través de tornillos y asegurados con tuercas. Propuesta de cubierta desplegable en lycra. Fuente: Elaboración del autor. Workshop Pontificia Universidad Católica de Minas Gerais, Brasil. 2017



Figura 3.27 Ensamble de módulos de tijeras con doble barras (se incorpora doble barra para aumentar la sección de la barra, disminuir las deformaciones durante el despliegue y mejorar la durabilidad de la maqueta). Nodo en PLA, realizado con impresión 3d. Barras de madera, palos para helados. Conexiones entre elementos a través de tornillos y asegurados con tuercas. Fuente: Elaboración del autor. Workshop Tecnológico de Monterrey, 2015



Figura 3.28 Agrupación de tijeras rectas con articulación central, red cuadrangular. Despliegue lineal. Barras en madera (Palos de helado o bajalenguas), separadores plásticos para cerámica tipo cruz (nodos), tornillos, tuercas y manguera plástica (separador entre barras, diámetro un poco mayor al del tornillo). Fuente: Elaboración del autor. Workshop ETSAV 2013-2016. Modelos y fotografías realizados por Annamaria Patiño Lakatos.



La secuencia del proceso de armado en esta agrupación de tijeras, sirve para comprender el proceso de ensamble para las siguientes superficies desplegables que se construyeron durante la investigación (figura 3.25).

Otras maquetas realizadas para esta superficie, exploran la sección de la barra, nodos y propuestas de cerramiento adaptables al movimiento de plegado, es este caso cubiertas desplegables con lycra (figuras 3.26 a 3.28).

También es posible configurar superficies con despliegue lineal a partir de barras con articulación excéntrica, concepto desarrollado en el apartado 3.2.1.2, partiendo del mismo principio de reemplazar las caras del cubo por una tijera, las barras se deben posicionar de tal manera que los tramos cortos coincidan con la tijera consecutiva en una arista, y de la misma manera, los tramos largos deben coincidir entre tijeras consecutivas en las aristas restantes (figura 3.29). La tabla 3.2 expone las características de esta agrupación que se aplica a una superficie plana, sin olvidar que también es viable configurar torres desplegables con barras excéntricas en una red cuadrangular, agrupando de manera adecuada los módulos para obtener un despliegue lineal y en vertical (figura 3.30).

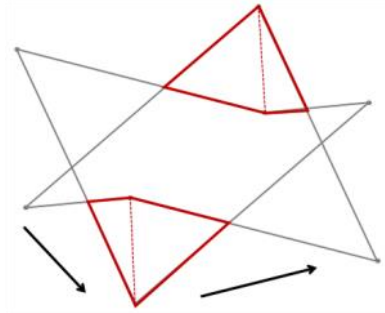


Figura 3.29 Módulo cuadrangular. Superficie plana desplegable a partir de barras con articulación excéntrica. Fuente: Elaboración del autor.

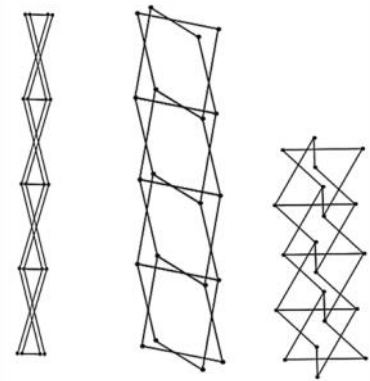


Figura 3.30 Torre desplegable. Agrupación de módulos cuadrangulares, barras con articulación excéntrica. Fuente: Elaboración del autor.

Tabla 3.2 Superficie plana. Agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica. Despliegue lineal. Tijeras con articulación central y excéntrica. Red cuadrangular. Fuente: Elaboración del autor.

Superficie plana	Red cuadrangular		
Módulo			
Dirección 1	Etapas de despliegue		
Dirección 2			

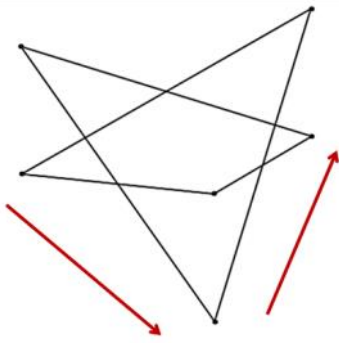


Figura 3.31 a Módulo triangular. Superficie plana desplegable a partir de barras con articulación central.

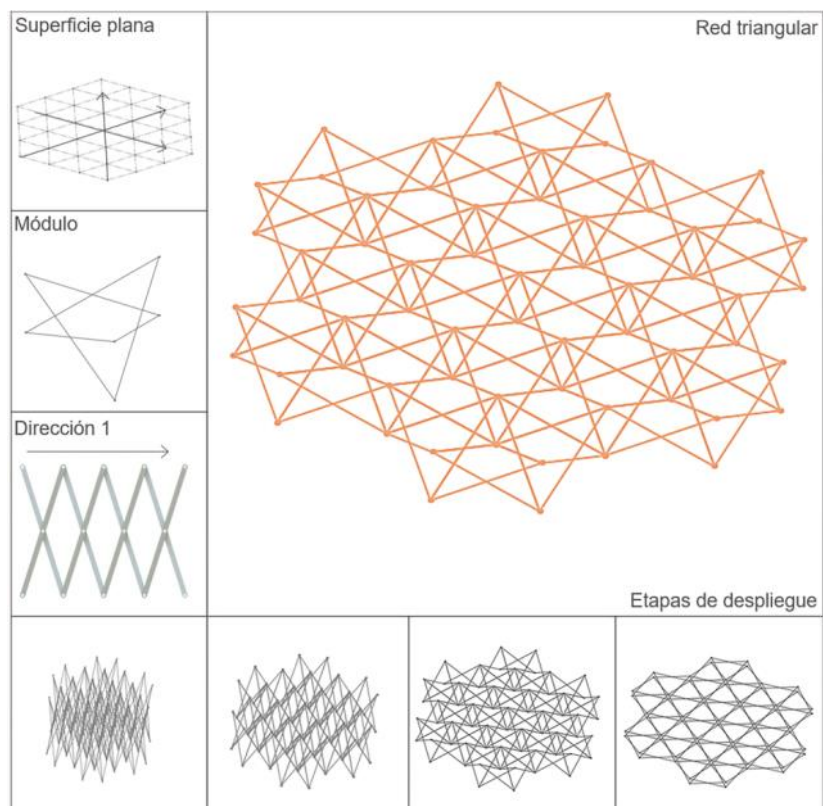
Fuente: Elaboración del autor.

b) Red triangular

La siguiente superficie a describir refiere a una superficie desplegable a partir de una red triangular (tabla 3.3). El módulo base consiste en reemplazar cada cara de un prisma triangular por una tijera (figura 3.31a), todas las tijeras tienen articulación central y las barras de la misma longitud, la agrupación con esta tipología de módulos genera una superficie con despliegue lineal, que también se puede aplicar para la configuración de torres desplegables (figura 3.19 y figura 3.31 b).

Tabla 3.3 Superficie plana. Agrupación de tijeras rectas. Despliegue lineal. Tijeras con articulación central. Red triangular.

Fuente: Elaboración del autor.



Las figuras 3.31 b, 3.32 y 3.33 representan las maquetas realizadas para esta tipología de superficie. Para proponer un proceso de fácil ensamble en la construcción de este tipo de maquetas, se diseñan nodos específicos que responden a la geometría hexagonal resultante de la agrupación de los módulos triangulares y adecuados al tamaño de las barras, estos son materializados con impresión 3d y permiten la conexión de módulos para lograr el trazado triangular. Además el nodo incorpora un sistema de sujeción para conectar la lycra, como propuesta de cubierta adaptable a nivel de maqueta.

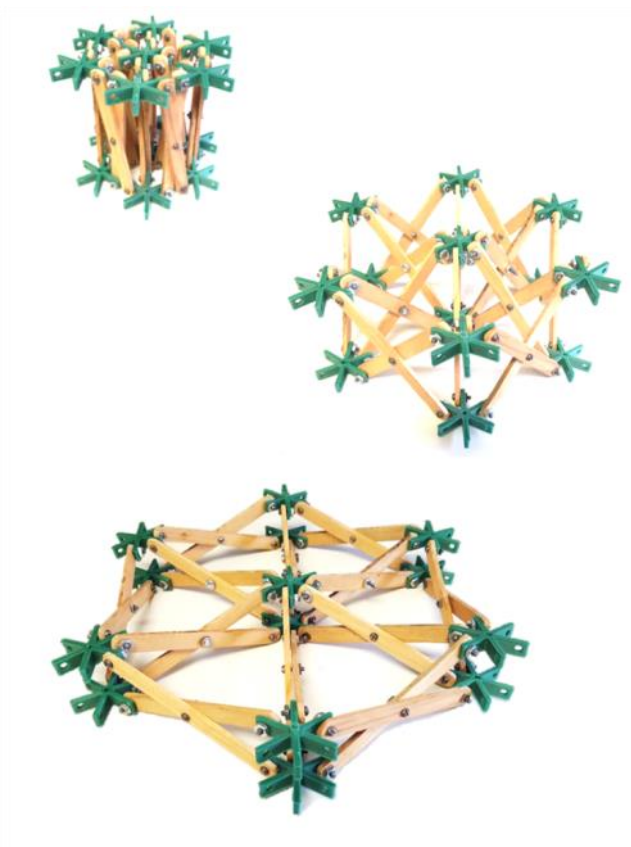


Figura 3.31 b Maqueta. Agrupación de tijeras rectas con articulación central. Red triangular. Despliegue lineal. Nodo en PLA, realizado con impresión 3d. Barras de madera, palos para helados. Conexiones entre elementos a través tornillos y asegurados con tuercas. Módulo de tijera con simple capa. Fuente: Elaboración del autor. Workshop en el Tecnológico de Monterrey, 2015

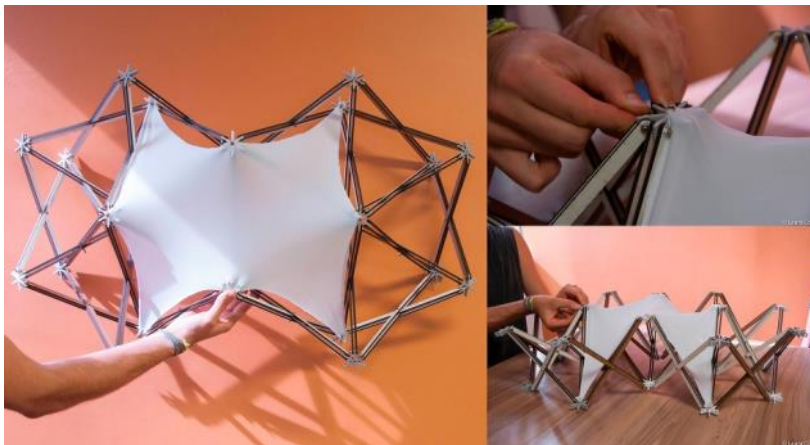


Figura 3.32 Maqueta. Agrupación de tijeras rectas con articulación central. Despliegue lineal. Red triangular. Barras en MDF realizadas con corte laser. Nodo en PLA, impresión 3D. Conexiones tipo tornillo y tuerca. Propuesta de cubierta desplegable en lycra. Fuente: Elaboración del autor. Workshop Pontificia Universidad Católica de Minas Gerais, Brasil. 2017

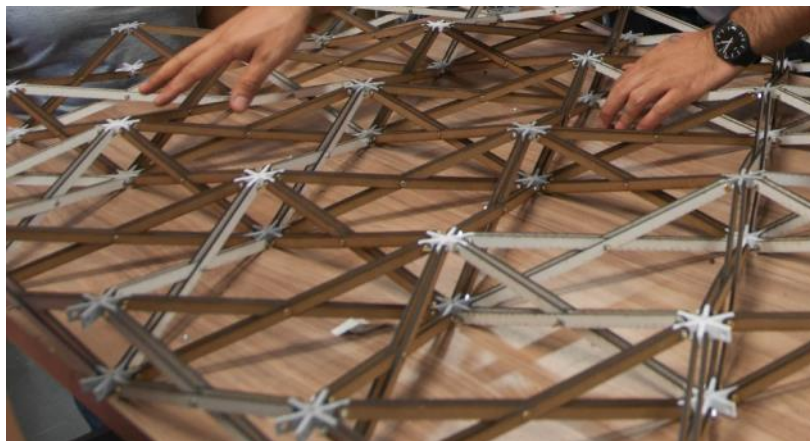


Figura 3.33 Maqueta. Agrupación de tijeras rectas con articulación central. Despliegue lineal. Red triangular. Barras en MDF realizadas con corte laser. Nodo en PLA, impresión 3D. Conexiones tipo tornillo y tuerca. Fuente: Elaboración del autor. Workshop Pontificia Universidad Católica de Minas Gerais, Brasil. 2017

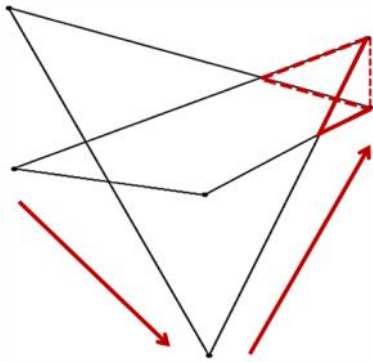


Figura 3.34 Módulo triangular. Superficie plana desplegable a partir de barras con articulación central y excéntrica. Fuente: Elaboración del autor.

La tabla 3.4 describe la configuración de una superficie desplegable con red triangular a partir de la combinación de barras con articulación central y excéntrica. Para obtener esta superficie, el módulo base consiste en la agrupación de tres tijeras, dos de ellas con articulación excéntrica y la tercera tijera con articulación central.

El posicionamiento de las barras debe corresponder a enlazar los tramos cortos entre tijeras consecutivas y coincidir en una de las aristas del prisma triangular. Los tramos largos finalmente se enlazan a la tijera con articulación central que se posiciona en la cara faltante del prisma triangular (figura 3.34).

La correcta agrupación de los módulos triangulares forma hexágonos que van componiendo la superficie desplegable (figura 3.35), la cual va creciendo a medida que se conectan más módulos.

Tabla 3.4 Superficie plana. Agrupación de tijeras rectas. Despliegue lineal. Tijeras con articulación central y excéntrica. Red triangular. Fuente: Elaboración del autor.

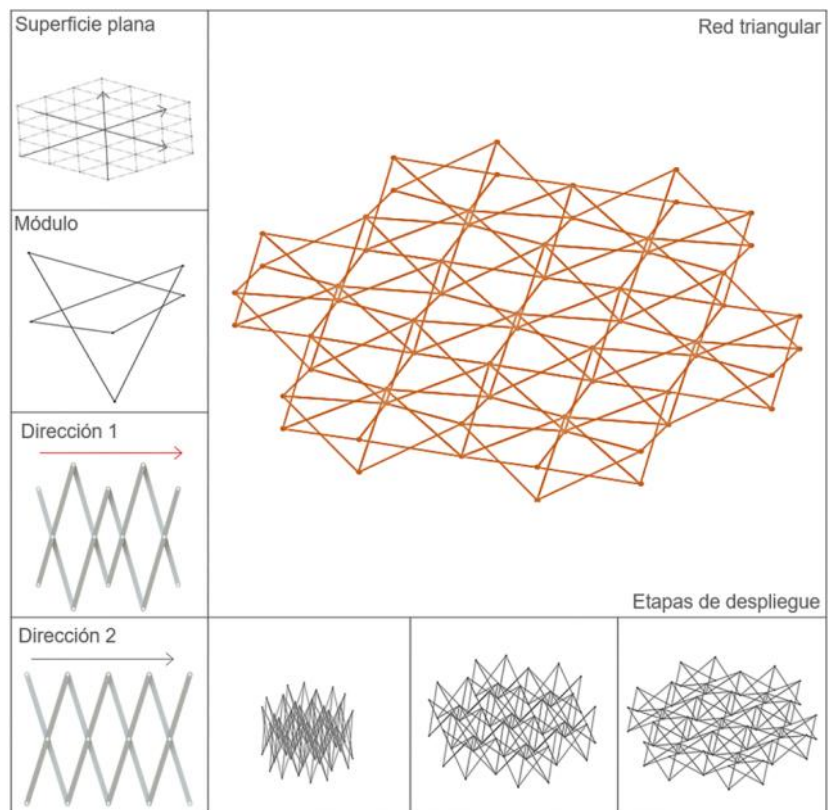
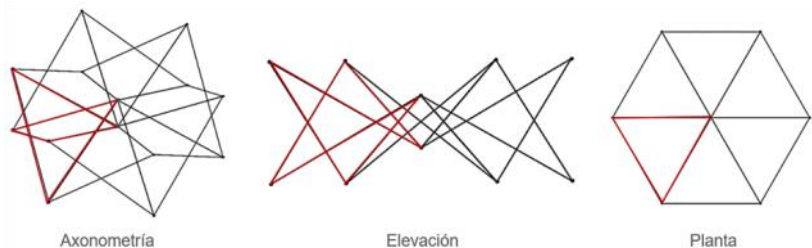


Figura 3.35 Configuración de hexágono a partir del módulo triangular. Tijeras con articulación central y excéntrica. Despliegue lineal. Fuente: Elaboración del autor.



3.2.2 Despliegue con curvatura

Las agrupaciones que se describen a continuación, parten de tijeras que configuran unidades de agrupaciones planas que generan un despliegue con curvatura o lineal y se enlazan en direcciones determinadas para obtener superficies con curvatura.

Las superficies desplegadas con el STT se basan en módulos que incorporan diferentes combinaciones de tijeras con articulación central y tijeras articulación excéntrica en posiciones específicas, para obtener un despliegue con una curvatura determinada.

Para iniciar su análisis y descripción, se categorizan tres tipologías de superficies, que corresponden a la superficie de simple curvatura, superficie anticlástica y superficie sinclástica (figura 3.36), esta última con un estudio a mayor profundidad para proponer nuevas geometrías de domos desplegables que se expone en los siguientes capítulos.

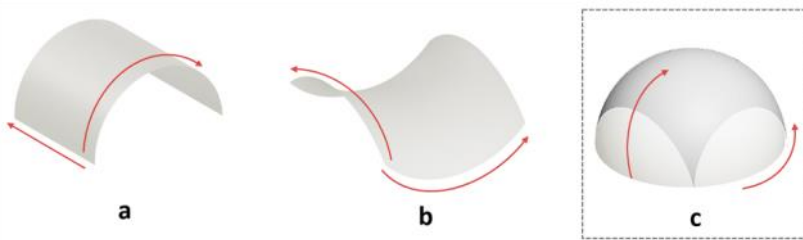


Figura 3.36
a) Superficie con simple curvatura.
b) Superficie anticlástica.
d) Superficie sinclástica.
Fuente: Elaboración del autor

La base para la configuración de superficies desplegables con curvatura, es formar una agrupación plana de tijeras con articulación excéntrica. La condición para obtener el despliegue curvo, es formar entre módulos de tijera trapecoides simétricos o también llamados deltoides (figura 3.37 a).

Las características principales de los deltoides corresponden a que cada par de lados consecutivos son iguales, tienen un par de ángulos opuestos iguales y las diagonales son perpendiculares.

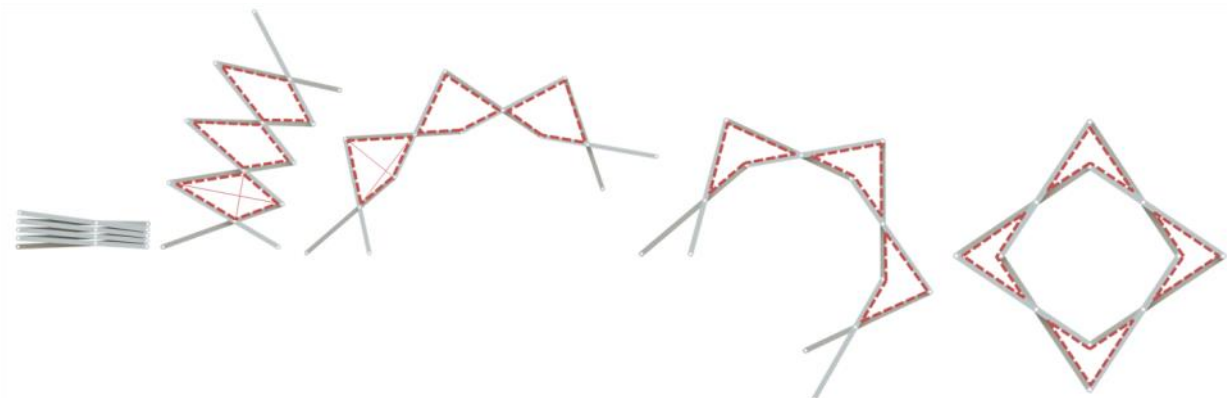


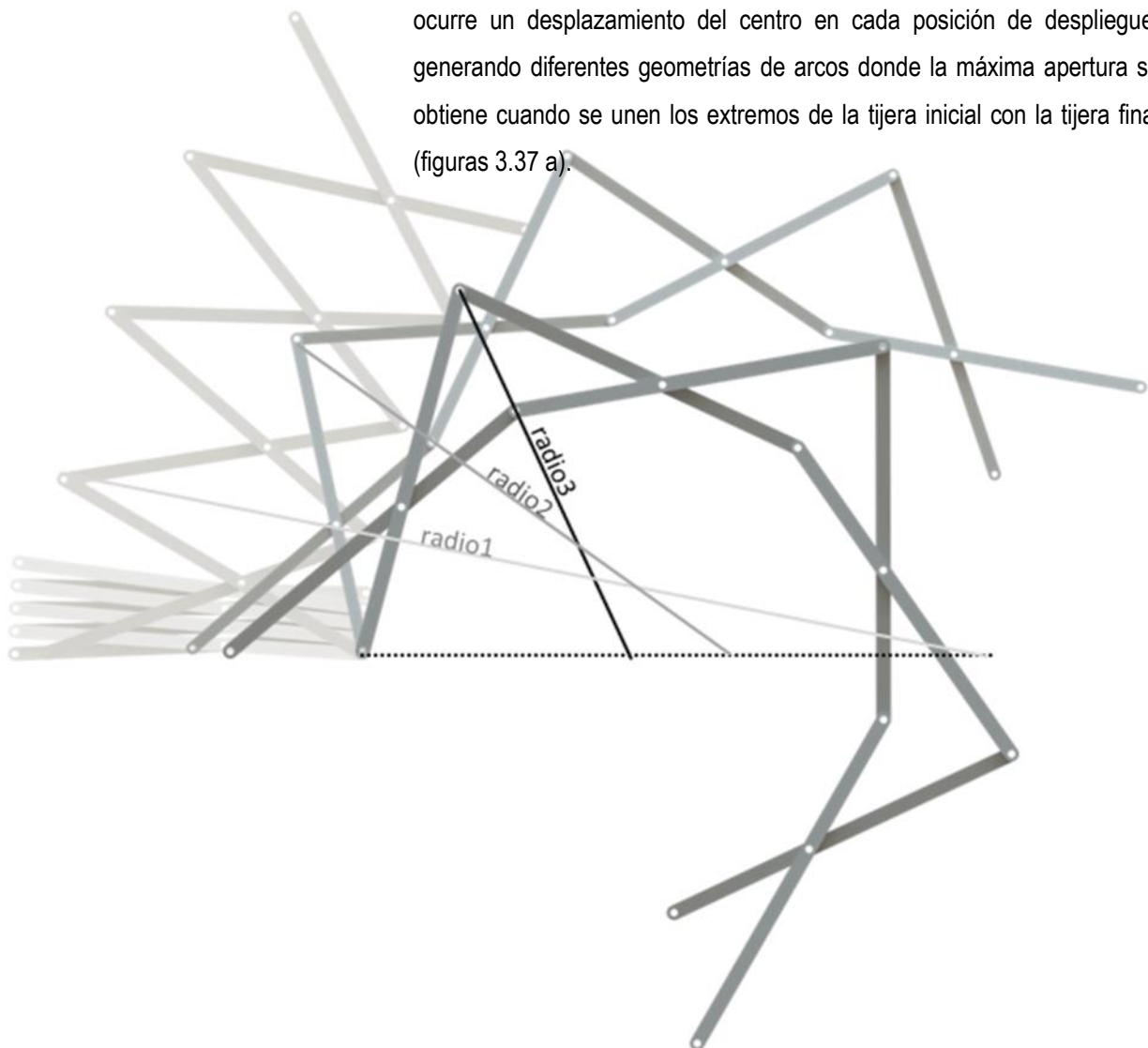
Figura 3.37 a. Etapas de despliegue agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica. Despliegue con curvatura. Formación de la geometría de deltoides entre tijeras.
Fuente: Elaboración del autor

Es decir, que se debe posicionar las barras de cada tijera de tal forma que se cumplan las condiciones anteriores para configurar deltoides, el tramo largo de una barra de tijera debe enlazarse con el tramo largo de la tijera consecutiva y de igual forma con los tramos cortos, sin olvidar la condición de plegabilidad. Una forma más sencilla de verlo y para configurar la curva correctamente, es que los tramos cortos de las barras están se posicionan hacia el interior del arco que se despliega y los tramos largos se posicionan hacia en el exterior del arco (figura 3.37 b).

Al analizar las diferentes etapas de despliegue (figura 3.37 a), se observa que se generan deltoides de diferentes proporciones, donde varía la longitud de las diagonales según la etapa de despliegue, llegando a configurar deltoides cóncavos (las diagonales no se cortan) en su máxima apertura.

También, se observa que el proceso de despliegue en este tipo de agrupación, la curvatura descrita es una curvatura con radio variable y ocurre un desplazamiento del centro en cada posición de despliegue, generando diferentes geometrías de arcos donde la máxima apertura se obtiene cuando se unen los extremos de la tijera inicial con la tijera final (figuras 3.37 a).

Figura 3.37 b. Proceso de despliegue que describe una curvatura variable. El radio cambia y el centro se desplaza en cada etapa de despliegue.
Fuente: Elaboración del autor



Sobre el análisis del movimiento de arcos expandibles, Sastre [76], describe exactamente lo que sucede en el proceso de despliegue de este tipo de agrupaciones planas. “Durante más de la mitad del tiempo, la estructura tiende a expandirse verticalmente, ya que era un viga expansible, pero de repente comienza a plegarse y obtiene su posición final en un movimiento bastante brusco” (figura 3.38).

Refiere además a la máxima extensión del arco, que se visualiza en una etapa intermedia del proceso de despliegue, justo antes de curvarse, esta longitud puede exceder o igualar la luz total del arco a configurar [76].

Lo importante de estas consideraciones, es en primer lugar, plantear correctamente el dimensionamiento de las barras, para que soporten los esfuerzos generados en las etapas de despliegue más críticas y en segundo lugar, tener en cuenta el espacio suficiente en altura para obtener un despliegue sin interferencias.

El planteamiento inicial de esta investigación, descrito en el primer capítulo, propone domos desplegables a partir de la configuración de semiarcos que se juntan en la cúspide y precisamente, uno de los objetivos es reducir esta longitud total de extensión del arco para facilitar los procesos de montaje y desmontaje de la estructura, se observa la exploración de este tipo de geometrías de arcos y semiarcos en las propuestas desarrolladas por Escrig y Sastre (figura 3.39 y 3.40).

A partir del capítulo quinto, la investigación exponen el avance y los aportes a partir de esta geometría, proponiendo una nueva metodología de diseño aplicada al desarrollo de domos desplegables, a través de la experimentación y comprobación de la viabilidad constructiva en prototipos realizados a escala.

Para contextualizar al lector y continuar con la línea descriptiva sobre las tipologías de superficies desplegables con curvatura, configuradas con el STT, se exponen las siguientes tablas gráficas (Tablas 3.5 a 3.19) complementadas con la construcción de maquetas que apoyan el proceso de comprensión de estas estructuras.

El planteamiento de las superficies desplegables a partir del STT analizadas en el presente capítulo, contempla, tanto en los modelos físicos como en los modelos digitales, la condición de implementar barras de la misma longitud, facilitando los procesos de fabricación y montaje.

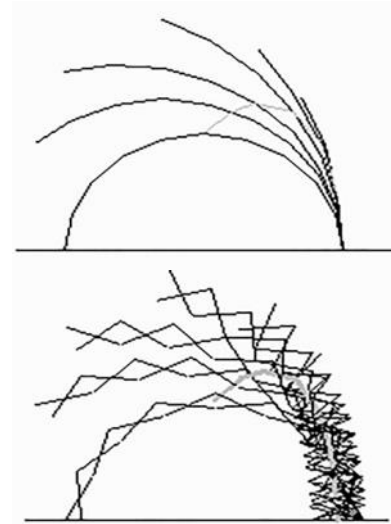


Figura 3.38 Análisis del proceso de despliegue de arcos expandibles curvatura [76]

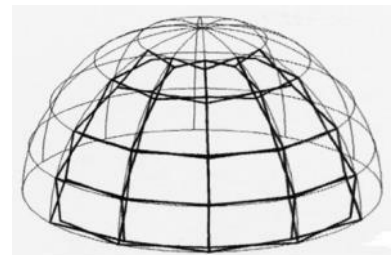


Figura 3.39 Propuesta de domo desplegable. Arcos configurados a partir de la geometría de paralelos y meridianos [25]

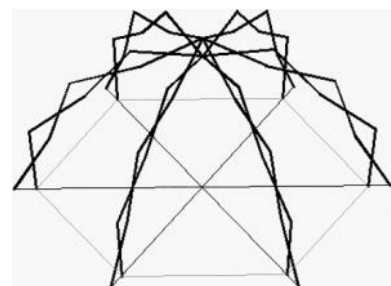


Figura 3.40 Propuesta de domo desplegable. Semiarcos que se unen en la cúspide [76]

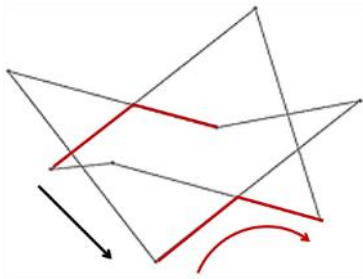


Figura 3.41 Módulo cuadrangular de tijeras con articulación central y excéntrica. Superficie con simple curvatura. Fuente: Elaboración del autor

3.2.2.1 Superficie con simple curvatura

a) Red cuadrangular

Una superficie de simple curvatura se define como una línea recta desplazándose por una línea curva directriz. Para configurar una superficie desplegable cuadrangular a partir del STT (tabla 3.5), el despliegue lineal (dirección 1) corresponde a la agrupación de tijeras rectas con la misma longitud de barra y articulación central. Y el despliegue con curvatura (dirección 2) corresponde a la agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica.

Esta combinación de agrupaciones de tijeras genera superficies desplegables como bóvedas de cañón, superficies cilíndricas o similares.

El módulo base corresponde a un módulo cuadrangular compuesto por dos tijeras con articulación central y dos tijeras con articulación excéntrica, posicionándolas de manera paralela con su semejante; sin olvidar la correcta posición de las tijeras excéntricas, donde los tramos cortos deben coincidir en la misma posición (hacia el interior de arco que forma durante el proceso de despliegue) para obtener de esta forma un correcto proceso de despliegue y la curvatura deseada (figura 3.41).

Tabla 3.5 Superficie simple curvatura. Agrupación de tijeras rectas. Tijeras con articulación central y excéntrica. Red cuadrangular.

Fuente: Elaboración del autor

<p>Superficie simple curvatura</p>	<p>Red cuadrangular</p>		
<p>Módulo</p>			
<p>Dirección 1</p>	<p>Etapas de despliegue</p>		
<p>Dirección 2</p>			

Para la construcción de los modelos físicos que representan superficies desplegables con curvatura, a partir del STT, se implementa doble barras en las tijeras en madera (palos de helado o bajalenguas) para mejorar la resistencia de la estructura y durabilidad de la misma (figura 3.42) y en los nodos tipo cruz, los cuales se consiguen a nivel comercial como separadores de cerámicas, se realizan los huecos con taladro en cada eje de la cruz, manteniendo una distancia considerable del centro del nodo para conectar los extremos de las barras y estas puedan girar sin interferencias. El nodo incluye una armella en la parte superior como conexión, para fijar una cubierta en lycra (figura 3.43).

Durante la exploración de este tipo de maquetas se desarrollaron modelos con diferentes medidas de excentricidad en las barras (figura 3.44) y alternativas de cubiertas en lycra (figuras 3.45 a 3.47). Esta exploración permite analizar las diferentes curvaturas resultantes en función de la excentricidad propuesta y cuestionarse sobre la posición ideal de la articulación central para obtener una curvatura específica.

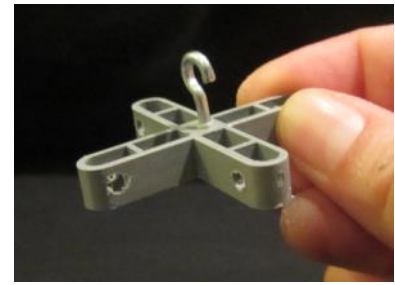


Figura 3.43 Adaptación de separador de cerámica para nodo de maqueta, incluye armella fijación de Lycra. Modelo y fotografía realizados por Annamaria Patiño Lakatos

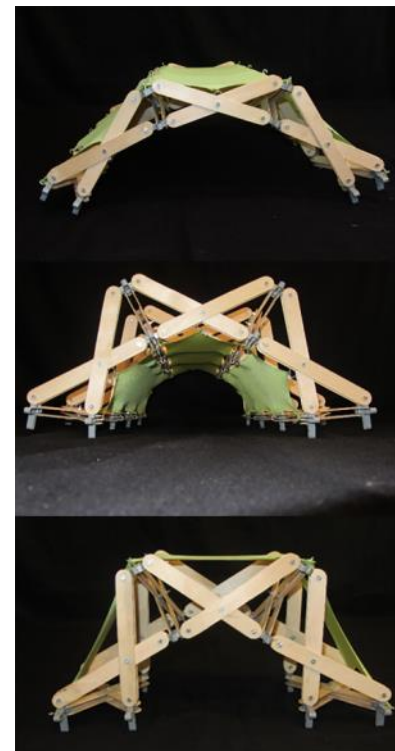


Figura 3.44 Exploración de diferentes maquetas, aumentando la excentricidad en las barras. Entre mayor excentricidad, el diámetro interno del arco disminuye. Modelos y fotografías realizados por Annamaria Patiño Lakatos. Fuente: Elaboración del autor

Figura 3.42 Secuencia de imágenes del paso a paso para el armado de una estructura desplegable con el STT. Agrupación de tijeras rectas con articulación central y excéntrica, red cuadrangular. Despliegue con curvatura. Superficie de simple curvatura Modelos y fotografías realizados por Annamaria Patiño Lakatos. Fuente: Elaboración del autor

Figura 3.45 Maqueta.

Agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica. Incluyen tijeras en una dirección y se articulan los arcos en la otra dirección con barras roscadas continuas, se incluye separadores para mantener los arcos distanciados. Despliegue con curvatura. Superficie de simple curvatura. Propuesta de cubierta interior con Lycra.

Workshop Pontificia Universidad Católica de Minas Gerais, Brasil.
Fuente: Elaboración del autor

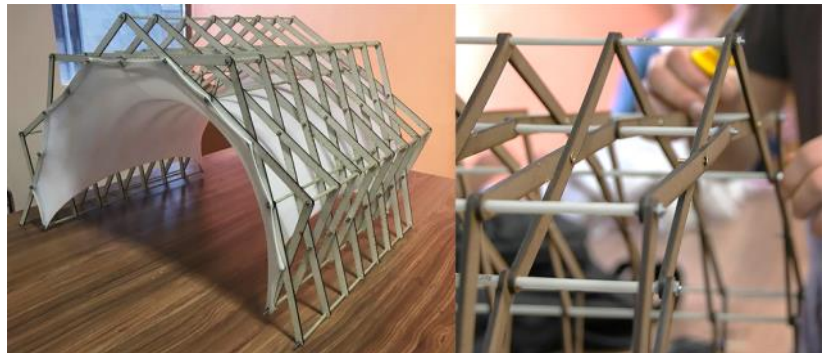


Figura 3.46 Maqueta.

Agrupación de tijeras rectas con articulación central y excéntrica, red cuadrangular. Despliegue con curvatura. Superficie de simple curvatura. Propuesta de cubierta exterior con Lycra. Modelos y fotografías realizados por Annamaria Patiño Lakatos .

Fuente: Elaboración del autor

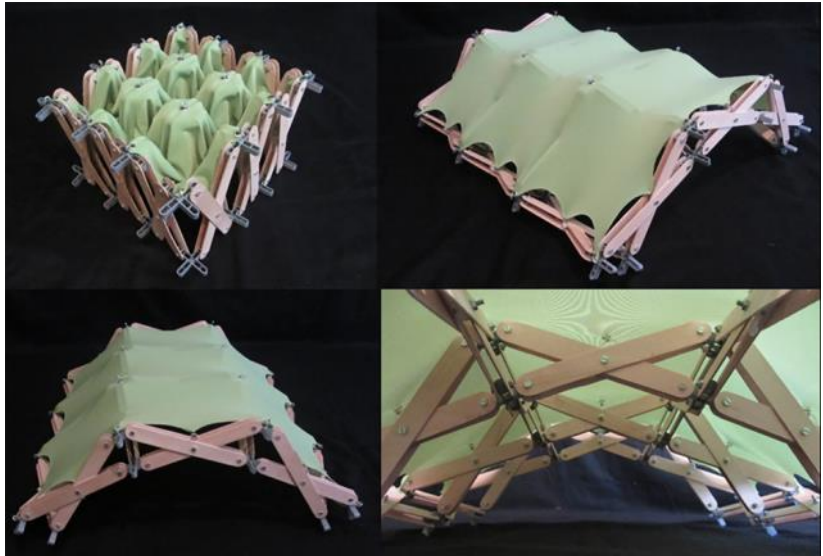


Figura 3.47 Maqueta.

Agrupación de tijeras rectas con articulación central y excéntrica, red cuadrangular. Despliegue con curvatura. Superficie de simple curvatura. Propuesta de cubierta interior en tres secciones longitudinales con Lycra. Modelos y fotografías realizados por Annamaria Patiño .

Fuente: Elaboración del autor

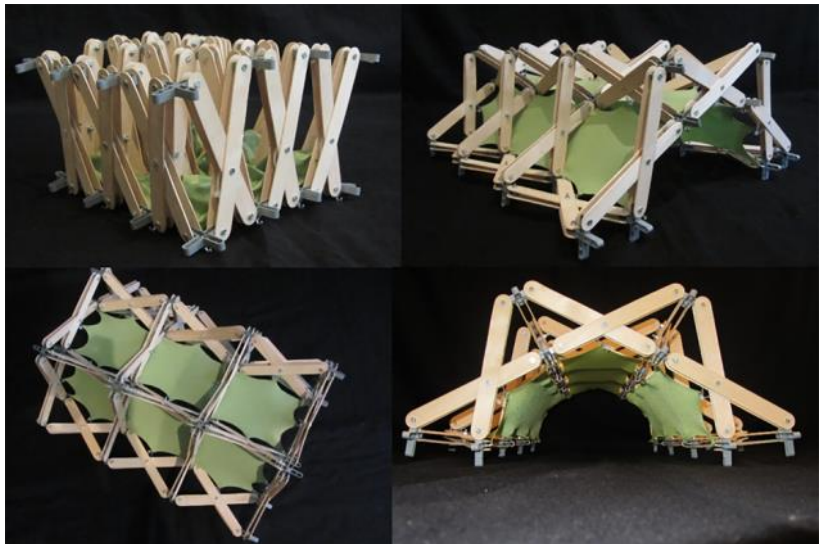
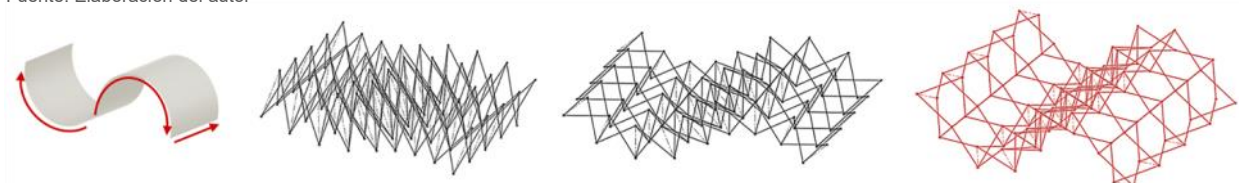


Figura 3.48 Superficie con múltiple curvatura basada en la agrupación de dos superficies con simple curvatura .

Fuente: Elaboración del autor



Otra alternativa para promover la exploración de este tipo de superficies, es formar una superficie desplegable de múltiple curvatura a partir de la agrupación de dos superficies de simple curvatura, posicionando una de ellas en forma invertida (figura 3.48).

b) Red triangular

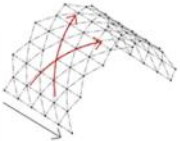
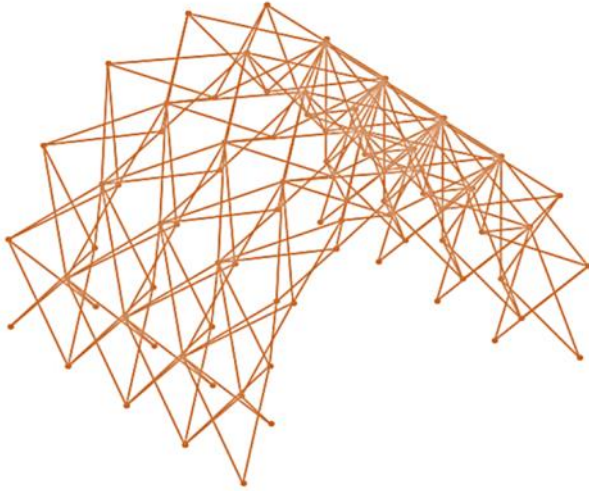

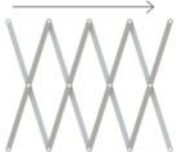
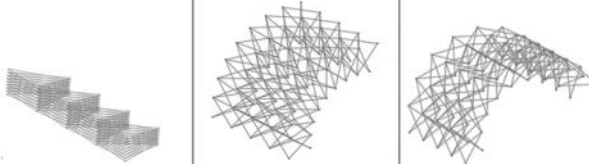
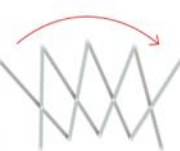
Para formar esta superficie, se mantiene en una dirección la agrupación de tijeras rectas con articulación central y en la otras dos direcciones se implementan las tijeras con articulación excéntrica (tabla 3.6).

Para la correcta configuración del módulo triangular se deben enlazar los tramos largos de la tijeras excéntricas a la tijera con articulación central y los tramos cortos enlazarse entre ellos (figura 3.49).

La agrupación entre módulos debe responder a mantener las directrices de la superficie a desarrollar, en un sentido el despliegue lineal y posicionamiento de la tijera correspondiente con articulación central y en los otros sentidos enlazar los módulos siguiendo la condición de plegabilidad para obtener la curvatura en el despliegue (figura 3.49).

Tabla 3.6 Superficie simple curvatura. Agrupación de tijeras rectas. Tijeras con articulación central y excéntrica. Red triangular.

Fuente: Elaboración del autor

<p>Superficie simple curvatura</p> 	<p>Red triangular</p> 		
<p>Módulo</p> 			
<p>Dirección 1</p> 	<p>Etapas de despliegue</p> 		
<p>Dirección 2</p> 			

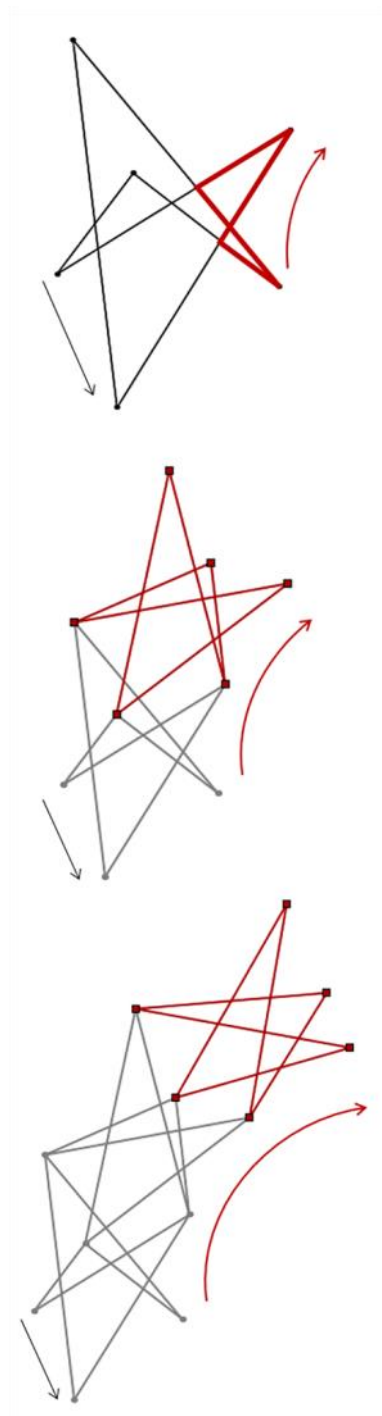


Figura 3.49 Módulo triangular de tijeras con articulación central y excéntrica. Y agrupación de módulos. Superficie con simple curvatura. Fuente: Elaboración del autor

Los modelos físicos que representan las superficies desplegables con simple curvatura a partir de una red triangular, se construyen en esta oportunidad con barras plásticas, que se consiguen a nivel comercial como elementos para manualidades y los nodos, consisten en anillas metálicas, utilizados como accesorios de bisutería.

La exploración con estas maquetas, lleva a proponer dos agrupaciones específicas, ambas configuran sistemas de arcos desplegables, pero su diferencia radica en la agrupación de los arcos (figura 3.50), cada arco esta compuesto de siete módulos triangulares y la forma de posicionar cada arco plegado enlazado con el arco consecutivo, genera dos posibilidades de superficies.

Figura 3.50 Maquetas con barras plásticas y nodos a partir de anillas metálicas. Configuración superficie con simple curvatura. Dos propuestas diferentes de enlazar dos arcos formados por módulos triangulares.

Fuente: Elaboración del autor



En la figura 3.51 se observa la agrupación de dos arcos, donde el nodo central enlaza los tramos cortos de todos los módulos triangulares y se incorpora una agrupación de tijeras planas con articulación central para cerrar la cara faltante en la agrupación.

El proceso de despliegue genera una geometría de arco, pero al analizar el comportamiento de las tijeras, se observa que a medida que se abren las tijeras con articulación excéntrica, las cuales se van posicionando para obtener la curvatura, las tijeras con articulación central se van cerrando.

El resultado es una superficie de simple curvatura, tipo bóveda de cañón pero con una proporción longitudinal menor, en comparación con la posición plegada de la estructura, esto se debe al cierre de las tijeras con articulación central en la última etapa de despliegue (figura 3.51).

En cambio, en la figura 3.52, el nodo central enlaza los tramos largos de los módulos de tijera y nuevamente se completa la cara faltante con una agrupación plana de tijeras rectas con articulación central. En este caso se reduce el acortamiento longitudinal de la superficie con simple curvatura.

Se aclara que esta interpretación es a nivel experimental y a nivel de maquetas que no incorporan la precisión de los nodos en impresión 3d. La implementación de las anillas metálicas permite que el módulo triangular se deforme durante las diferentes posiciones de despliegue y esto afecta directamente en el largo o corto de la superficie.

Además las barras no están forzadas a comportamientos de torsión, ya que el sistema de anilla admite que los extremos de las barras se posicionen adecuadamente en cada etapa y no tengan que mantener la relación coplanar entre barras y la implementación de un nodo rígido

Figura 3.52 Maqueta. Agrupación de dos arcos conformados con módulos triangulares, enlazados por el tramo largo. Se incorpora una agrupación de tijeras planas con articulación central para completar la superficie. Fuente: Elaboración del autor

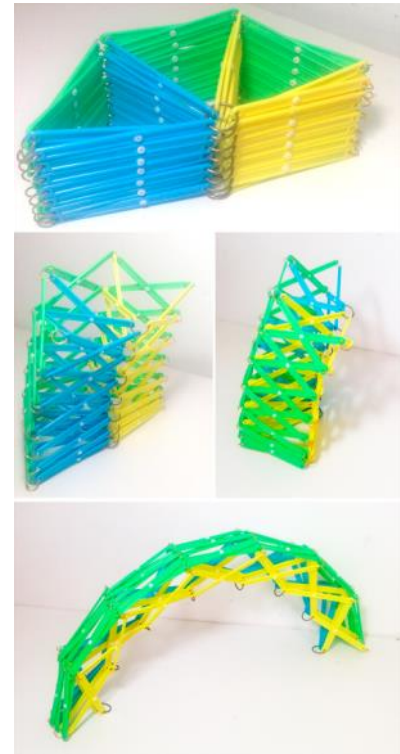
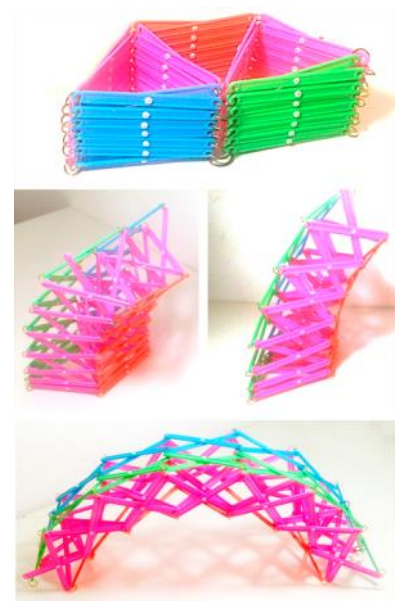


Figura 3.51 Maqueta. Agrupación de dos arcos conformados con módulos triangulares, enlazados por el tramo corto. Se incorpora una agrupación de tijeras planas con articulación central para completar la superficie. Fuente: Elaboración del autor



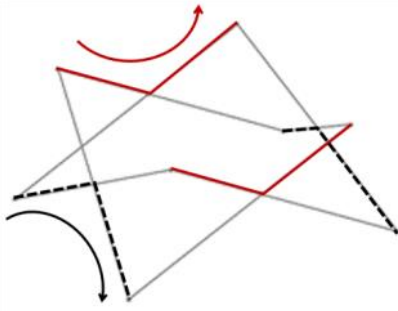


Figura 3.53 Módulo cuadrangular de tijeras con articulación excéntrica. Superficie anticlástica.
Fuente: Elaboración del autor

3.2.2.2 Superficie anticlástica (Gauss -)

a) Red Cuadrangular

En este caso una superficie anticlástica desplegable a partir de una red cuadrangular, se obtiene cuando en las dos direcciones, las agrupaciones de tijeras rectas generan una curvatura, es decir todas las tijeras tienen articulación excéntrica. Esta superficie de doble curvatura debe cumplir la condición, para que sea anticlástica, que las dos curvaturas tienen su concavidad en direcciones opuestas (tabla 3.7).

La configuración del módulo consiste en posicionar en paralelo dos tijeras con el tramo corto hacia el exterior del arco que se forma durante el despliegue y completar el módulo cuadrangular con dos tijeras excéntricas paralelas con el tramo corto hacia el interior de despliegue (figura 3.53).

Es importante aclarar que al enlazar los módulos con barras del mismo tamaño, un análisis a mayor detalle de las diferentes etapas de despliegue de la superficie anticlástica, refleja que a medida que se despliega la agrupación de tijeras, empiezan a aparecer incompatibilidades entre módulos. Estas incompatibilidades refieren a aberturas, similares a rasgaduras que distorsionan e interrumpen la continuidad de la red cuadrangular de la superficie (figura 3.54).

Las soluciones técnicas a proponer suelen radicar en el ajuste de barras particulares donde se requiera y nodos adaptables a estas circunstancias.

La figura 3.55 y tabla 3.7 exponen las diferentes etapas de despliegue de la superficie anticlástica, incorporando barras particulares, la imagen demuestra la necesidad de que estas barras sean telescópicas o extensibles, ya que su longitud se ve afectada en cada etapa de despliegue. O se opte por incorporálas en la etapa final de despliegue con la medida específica a la posición final, aunque podría generar inestabilidad en la estructura durante el proceso de despliegue.

Las maquetas realizadas a escala durante la investigación, incorporan barras en madera del mismo tamaño y nodos de plástico. Al realizar el ensamble entre piezas, con la correcta agrupación de módulos (figuras 3.56 a 3.58), el proceso de despliegue es posible, aunque no a la perfección. La flexibilidad de los materiales y la escala, generan un despliegue forzoso, solo hasta donde lo permite la longitud de barra estipulada y se observa que el comportamiento de las barras y los nodos tienden a la torsión deformando la cuadrícula base.

Tabla 3.7 Superficie anticlástica. Agrupación de tijeras rectas, red cuadrangular. Fuente: Elaboración del autor

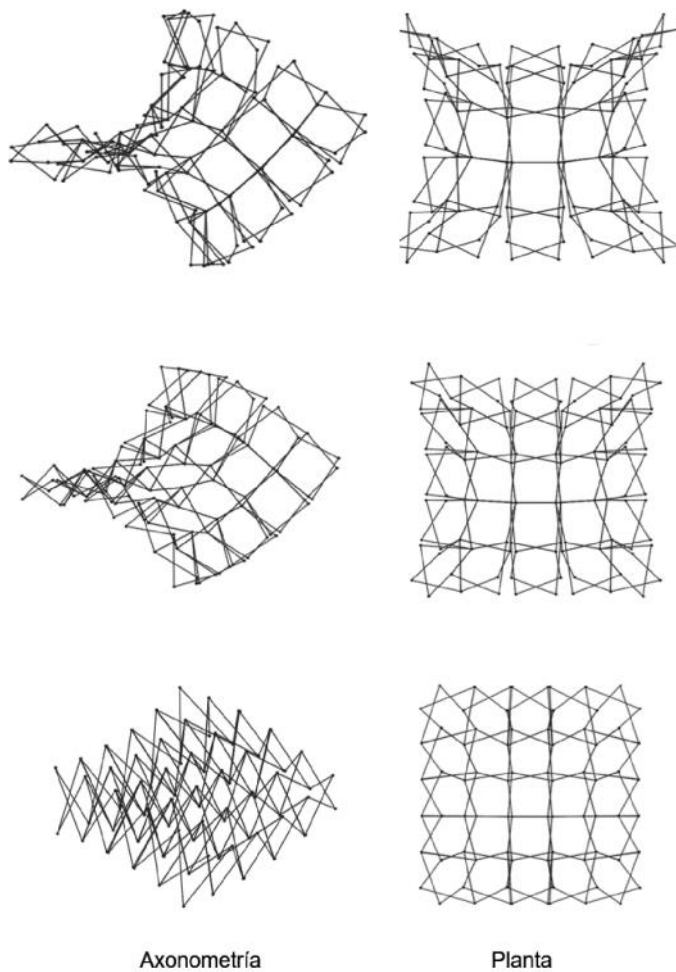
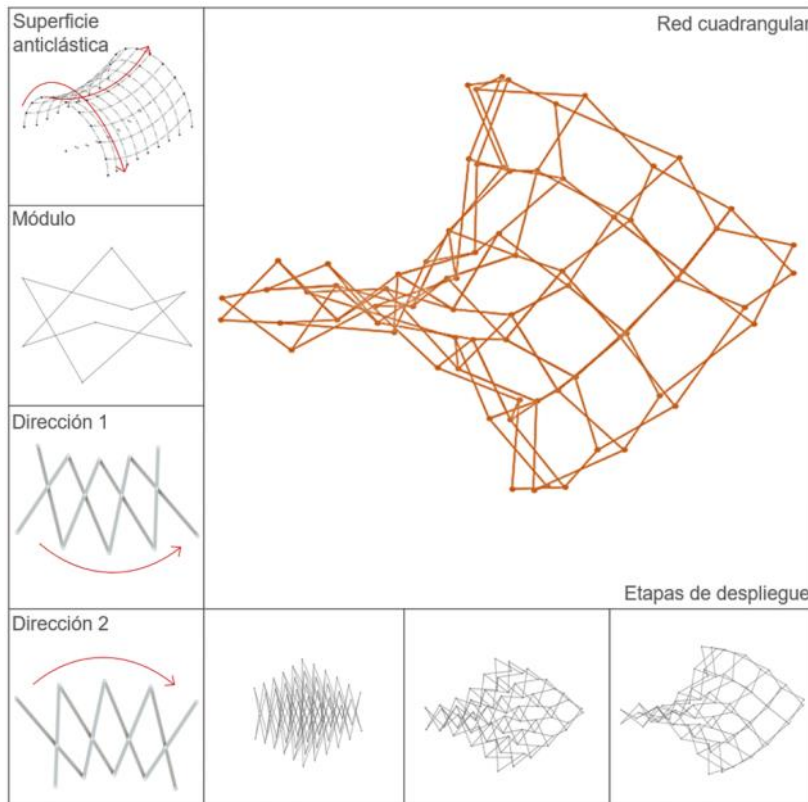
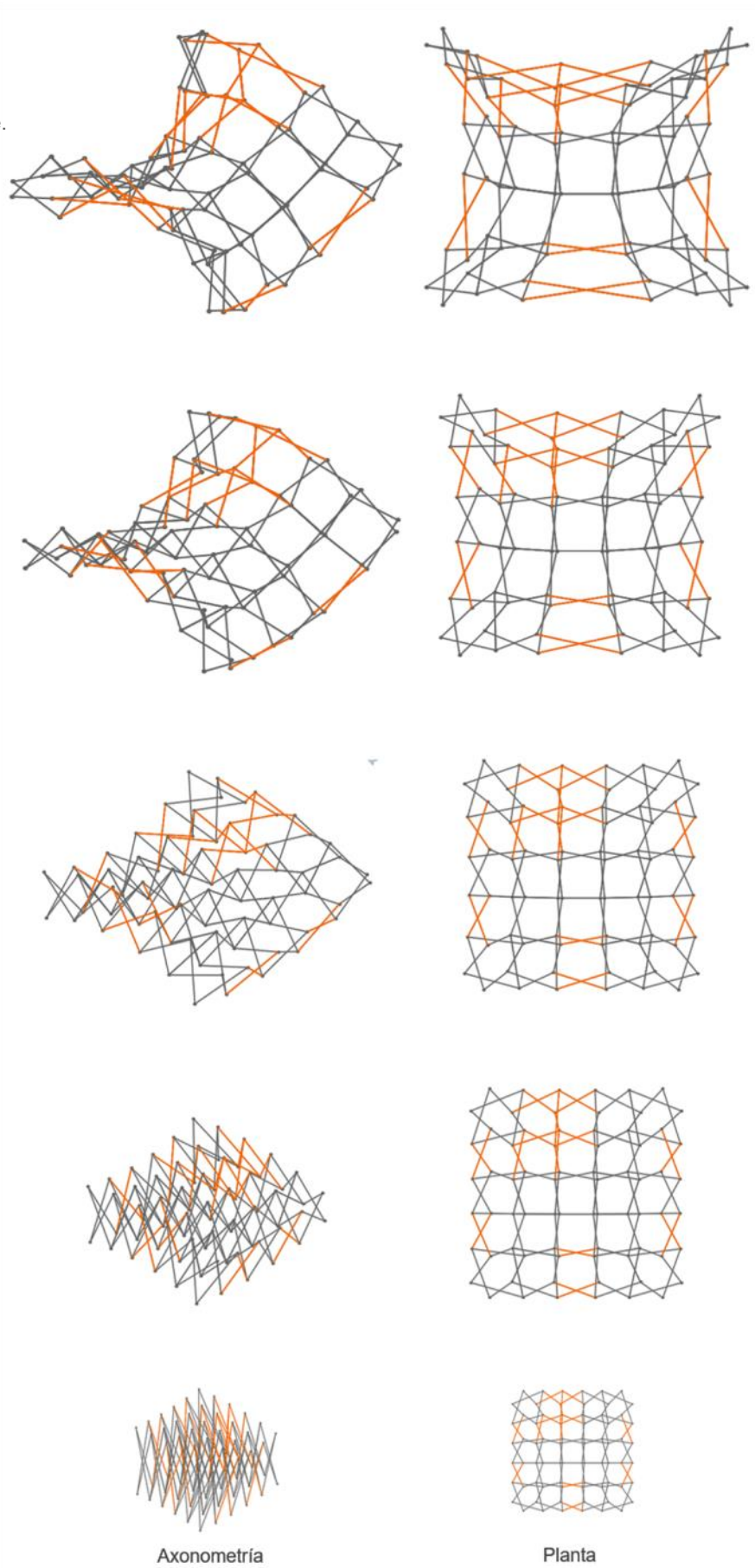


Figura 3.54 Etapas de despliegue de una superficie anticlástica con el STT. Barras de igual longitud. El proceso de despliegue presenta incompatibilidades, generándose aberturas que interrumpen la continuidad de la superficie. Simulación SolidWorks® [135]
Fuente: Elaboración del autor

Figura 3.55 Etapas de despliegue de una superficie anticlástica con el STT. Las barras naranjas presentan cambios de longitud en las diferentes etapas de despliegue. Simulación SolidWorks® [135]. Fuente: Elaboración del autor



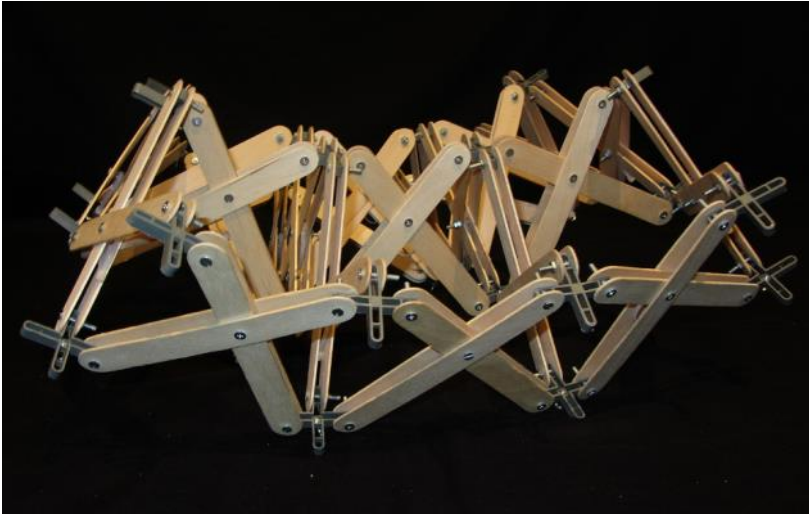


Figura 3.56 Maqueta. Agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica, red cuadrangular. Superficie anticlástica. Modelos y fotografías realizados por Annamaria Patiño Lakatos. Fuente: Elaboración del autor

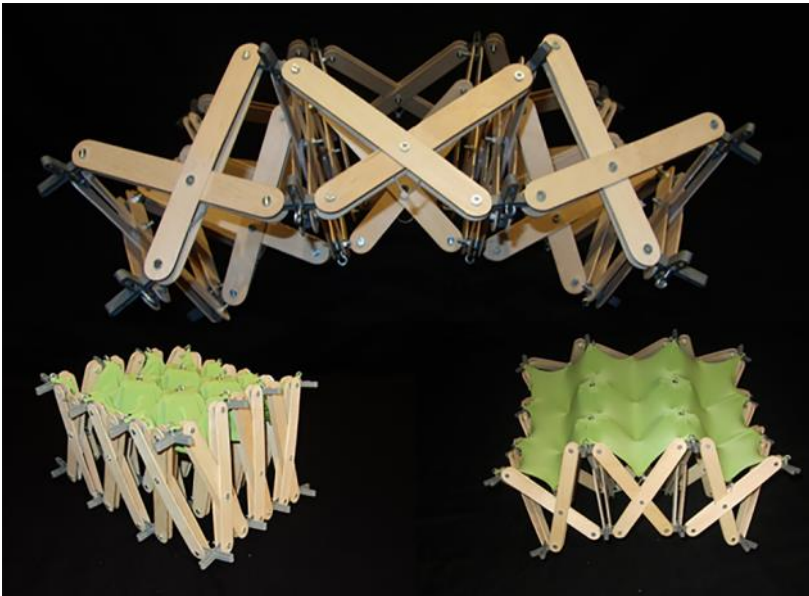


Figura 3.57 Maqueta. Agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica, red cuadrangular. Superficie anticlástica. Propuesta de cubierta exterior con Lycra. Modelos y fotografías realizados por Annamaria Patiño Lakatos. Fuente: Elaboración del autor

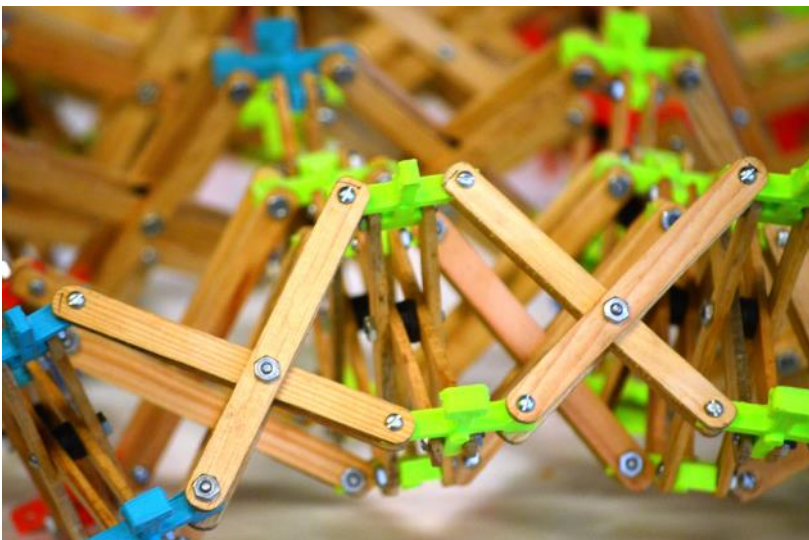


Figura 3.58 Maqueta. Agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica. Red cuadrangular. Superficie anticlástica. Nodo en PLA, Workshop en el Tecnológico de Monterrey, 2015. Fuente: Elaboración del autor

b) Red triangular

La superficie anticlástica a partir de una red triangular (figura 3.59), debe mantener las condiciones anteriormente descritas, pero exploraciones realizadas anteriormente de esta geometría, describen que tanto en la agrupación cuadrangular como triangular, se generan incompatibilidades en su proceso de despliegue y hay que incorporar barras de distinta longitud.

El análisis y profundización en el estudio de este tipo de superficie no es un tema específico en esta investigación y se presenta como esquema general para motivar a futuras investigaciones.

Cabe mencionar que el avance en la proyección de superficies anticlásticas desplegables con el STT, se ha desarrollado a través de la agrupación de tijeras anguladas, Roovers [72] presenta definiciones paramétricas para convertir cualquier superficie con curvatura en una agrupación de tijeras anguladas logrando superficies desplegables de todo tipo (figura 3.60).

Figura 3.59 Superficie de doble curvatura, paraboloides hiperbólico. Agrupación de tijeras rectas [6].

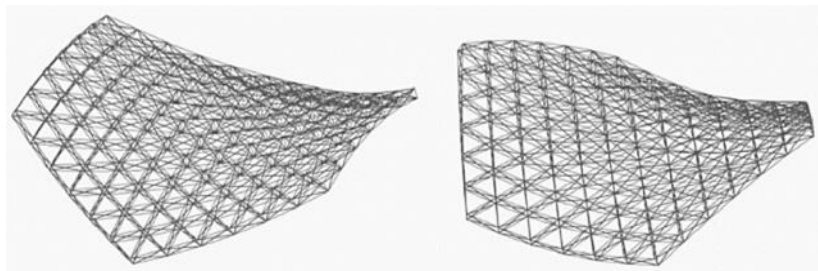
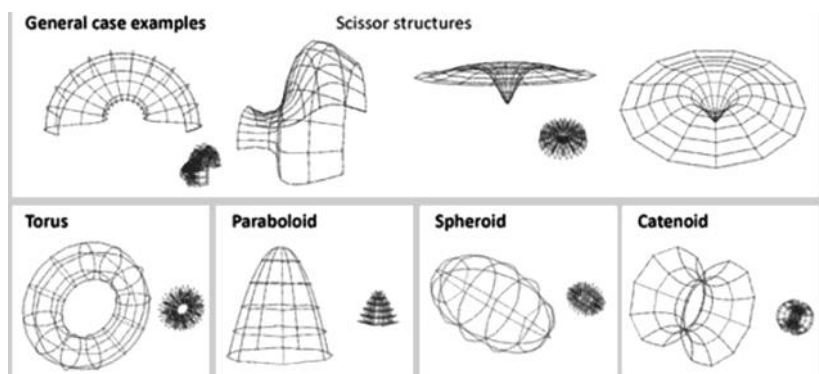


Figura 3.60 Configuración de superficies de doble curvatura con tijeras anguladas [72].

Imagen tomada de http://www.vub.ac.be/ARCH/ae-lab/gallery/people/kelvin-roovers/O79879_KROOVERS_Classification_Table_v2_small.jpg
Recuperado [22/01/2019]



3.2.2.3 Superficie sinclástica (Gauss +)

a) Red cuadrangular

La superficie sinclástica también es una superficie de doble curvatura pero a diferencia de la superficie anticlástica, la concavidad de las dos direcciones de las agrupaciones de tijeras están en el mismo sentido. Las diferentes espacialidades que se obtienen con este tipo de agrupación refieren a domos, cúpulas o secciones de casquetes a partir de la esfera.

La tabla 3.8 describe la configuración de una superficie sinclástica desplegable a partir de una red cuadrangular, el módulo debe tener todos los tramos cortos de las tijeras en la misma dirección, hacia el centro de la curvatura a desplegar (figura 3.61).

Aunque el interés es buscar la mayor homogeneidad en las barras de las tijeras, al desarrollar la simulación del despliegue de los modelos digitales en el programa SolidWorks® [135], sucede que al agrupar los módulos con barras de la misma longitud para formar la superficie sinclástica, durante las últimas etapas de despliegue empiezan a generarse incompatibilidades, principalmente sobreposición de tijeras (figura 3.62).

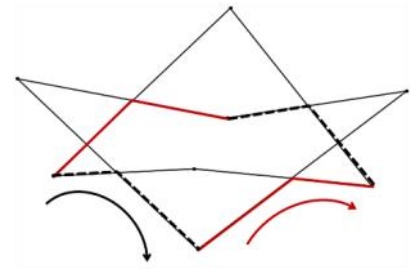


Figura 3.61 Módulo cuadrangular de tijeras con articulación excéntrica. Superficie sinclástica. Fuente: Elaboración del autor

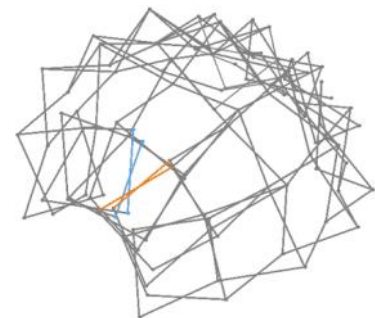


Figura 3.62 Incompatibilidad del proceso de despliegue en superficies sinclásticas cuando todas las barras son de la misma longitud. Sobreposición de tijeras. Simulación SolidWorks® [135]. Fuente: Elaboración del autor

<p>Superficie sinclástica</p>	Red cuadrangular		
<p>Módulo</p>			
<p>Dirección 1</p>			
<p>Dirección 2</p>			

Tabla 3.8 Superficie sinclástica. Agrupación de tijeras rectas. Tijeras con articulación excéntrica. Red cuadrangular. Fuente: Elaboración del autor



Figura 3.63 Esquema del trazado de geodésicas en una esfera, meridianos y paralelos.
Fuente: Elaboración del autor

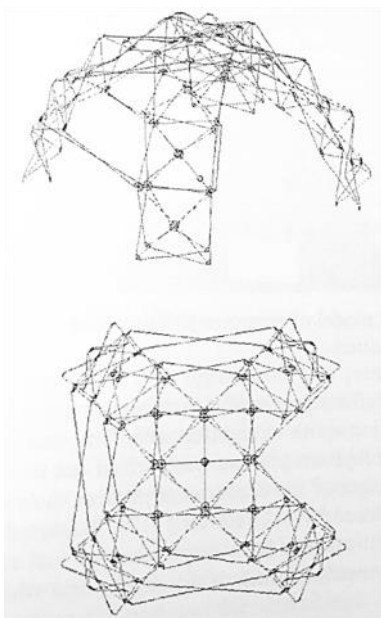


Figura 3.65 Diseño domo desplegable. Módulos cuadrangulares rigidizados con diagonales [30].

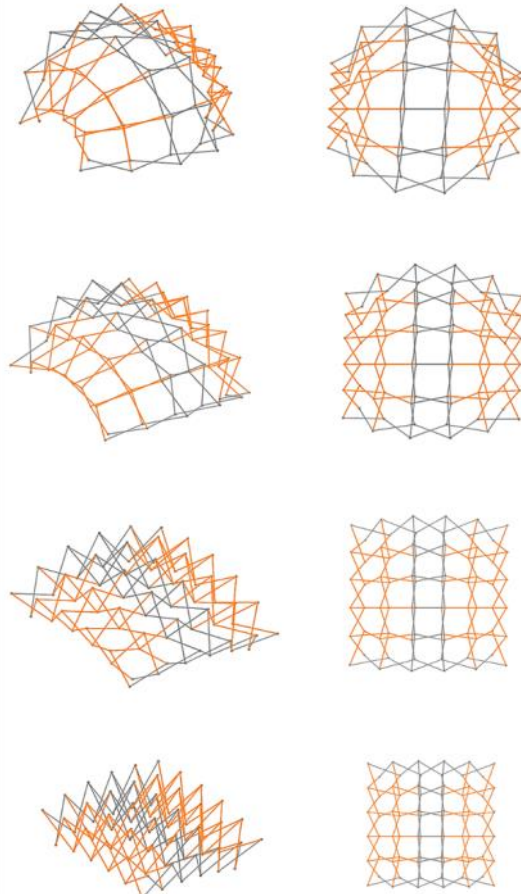
Figura 3.64 Etapas de despliegue de una superficie sinclástica con el STT. Las barras naranja presentan cambios de longitud en las diferentes etapas de despliegue. Simulación SolidWorks® [135].
Fuente: Elaboración del autor

La razón es que básicamente se parte de dividir una esfera en geodésicas, meridianos y paralelos (figura 3.63) y los tramos resultantes de esta división siempre van a generar tramos de menor dimensión a medida que se acercan a los polos y de esta forma, longitudes diferentes en las barras de las tijeras.

El esquema principal que se presenta en la tabla 3.8 incluye tijeras con barras de diferentes longitud, esto implica que deben considerarse en el diseño tijeras barras telescópicas o extensibles, ya que su longitud varía en cada posición de despliegue (figura 3.64).

Otra posible solución es eliminar las tijeras que generan la incompatibilidad durante el proceso de despliegue, añadirlas en la posición final de despliegue con la longitud correspondiente establecida por el diseño y finalmente asegurar y estabilizar la estructura. Pero seguramente se incrementa la inestabilidad de la estructura durante la secuencia del despliegue, siendo una estrategia peligrosa y poco viable.

Zeigler [97] y Gantes [30] exploraron en esta tipología de superficies, proponiendo domos desplegables, rigidizando el módulo con tijeras en las diagonales y añadiendo barras particulares en la posición final de la estructura (figura 2.27 y 3.65).



La exploración y solución a este tipo superficies, ya ha sido desarrollada por diferentes autores, expuestos en el capítulo dos, que proponen superficies sinclásticas resueltas con el STT con barras de diferentes longitudes, coherentes con el trazado de las geodésicas y con soluciones técnicamente eficientes (figura 2.31, 2.32, 2.39, 3.66 y 3.67).

La aplicación más importante a nivel de arquitectura refiere a la cubierta para la piscina de San Pablo en Sevilla de Escrig (figura 2.32) donde se observa que la curvatura en la etapa final del despliegue (posicionamiento final), depende de la longitud de la barra establecida y de la máxima apertura de las tijeras, además los elementos estructurales no evidencian grandes esfuerzos de tensión que puedan provocar el fallo de las barras.

Una propuesta de interés sobre el análisis y comportamiento de las barras y los nodos en este tipo de superficies desplegables, la desarrolla el equipo de Daniel S-H Lee, Olga Popovic Larsena y Seung-Deog Kim [52].

Ellos presentan el diseño del nodo y barras extensibles fabricadas en aluminio y mecanizadas con CNC. Las barras se ajustan a cada posición y tienen la posibilidad de rotar sobre su propio eje longitudinal para disminuir los esfuerzos de torsión generados durante el proceso de despliegue (figura 3.66).

Las imágenes correspondientes a esta propuesta de domo, son modelos simulados en programas específicos que describen un comportamiento favorable, donde las barras y los nodos se adaptan a cada etapa de despliegue, respondiendo acertadamente a los esfuerzos y distancias requeridas (figura 3.67)

En esta investigación los modelos físicos realizados para este apartado, permiten visualizar el comportamiento de este tipo de agrupación a nivel de maqueta, utilizando los mismos materiales descritos anteriormente.

En las figuras 3.68 y 3.69 se observa que la proporción de la distancia de la articulación excéntrica entre barras es bastante notoria, es decir que el tramo corto corresponde a un tercio o menos de la longitud total de la barra. Esto genera que la curvatura sea más pronunciada a diferencia de la figura 3.70 que, aunque se compone de barras de diferente tamaño, la proporción entre tramo corto y tramo largo es menor y genera una curvatura más sinuosa. Lo que lleva a cuestionar sobre el método para hallar la posición ideal de la articulación central en cada caso específico.

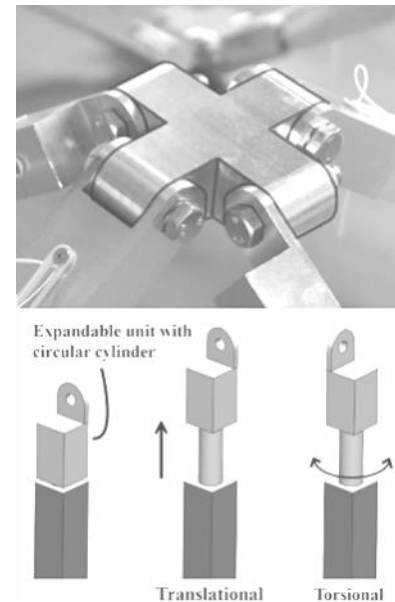


Figura 3.66 Diseño de nodo y barras telescópicas, eje longitudinal con rotación [52].

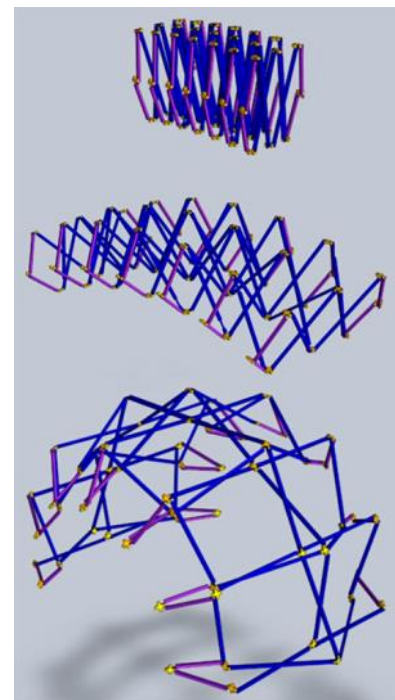


Figura 3.67 Simulación etapas de despliegue. Refugio de emergencia tipo domo [52].

Figura 3.68 Maqueta.

Agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica, red cuadrangular. Superficie sinclástica. Modelos y fotografías realizados por Annamaria Patiño Lakatos. Fuente: Elaboración del autor

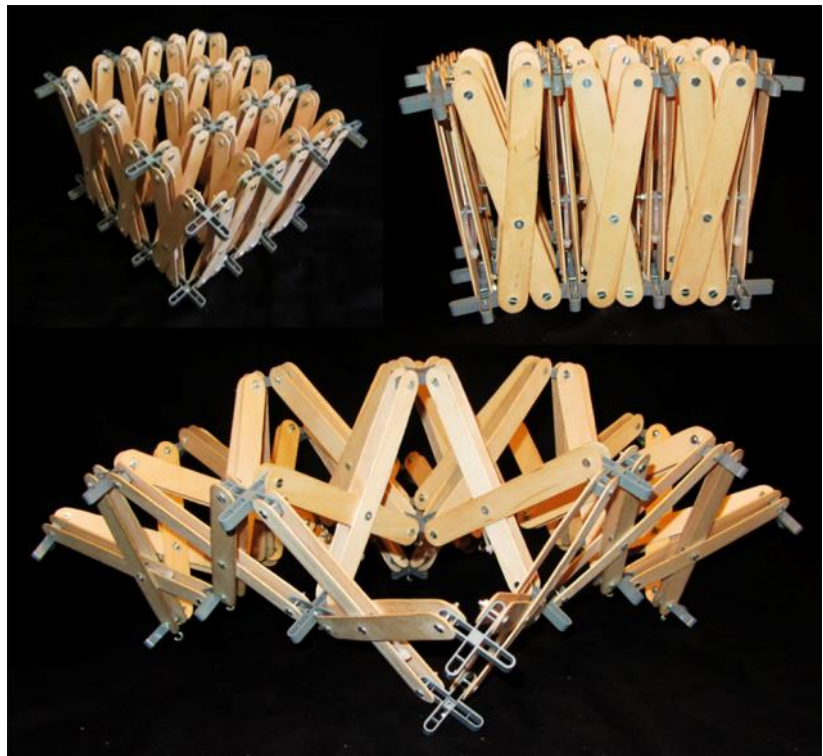


Figura 3.69 Maqueta.

Agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica, red cuadrangular. Superficie sinclástica. Propuesta de cubierta interior con Lycra. Modelos y fotografías realizados por Annamaria Patiño Lakatos. Fuente: Elaboración del autor

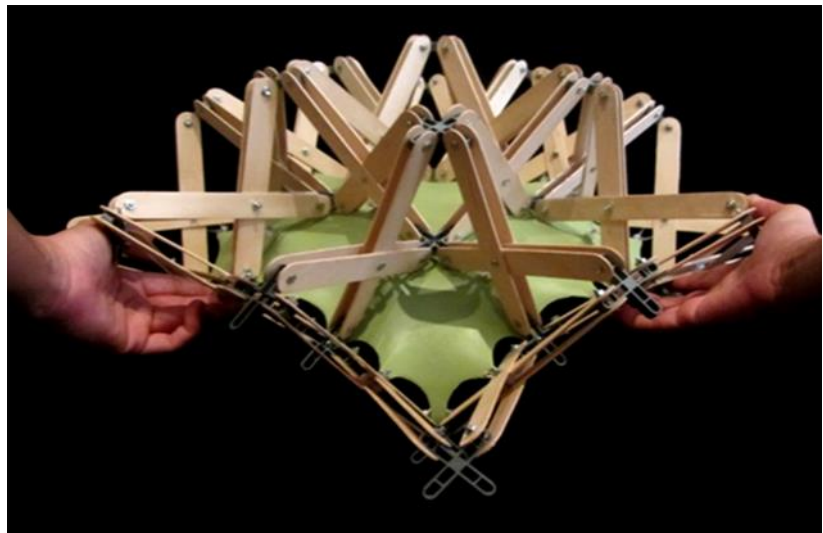


Figura 3.70 Maqueta. Agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica. Red cuadrangular. Superficie anticlástica. Nodo en PLA, Workshop Pontificia Universidad Católica de Minas Gerais, Brasil. 2017. Fuente: Elaboración del autor



b) Red triangular

Ahora, al referirse a una superficie sinclástica desplegable con el STT, a partir de una red triangular, el módulo base se compone de tres tijeras y todas sus barras tienen articulación excéntrica (figura 3.71).

El posicionamiento de las tijeras debe corresponder a la curvatura sinclástica, es así que todos los tramos cortos de las barras apuntan hacia el interior de la superficie a desarrollar, es decir hacia el centro, de esta forma se obtiene la concavidad en todas las direcciones (figura 3.71).

A partir de la correcta agrupación de módulos triangulares es posible generar la geometría de hexágonos (figura 3.72). Si se parte de un hexágono como un nuevo módulo inicial, correspondiente a la cúspide de un domo, es posible enlazar alrededor de este hexágono inicial módulos para completar la configuración de una superficie sinclástica desplegable (figura 3.73).

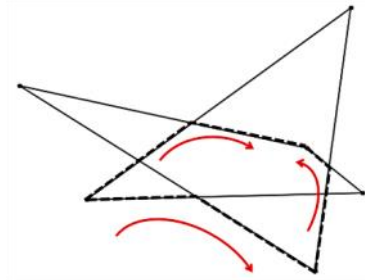


Figura 3.71 Módulo triangular, tijeras con articulación excéntrica. Superficie sinclástica. Fuente: Elaboración del autor

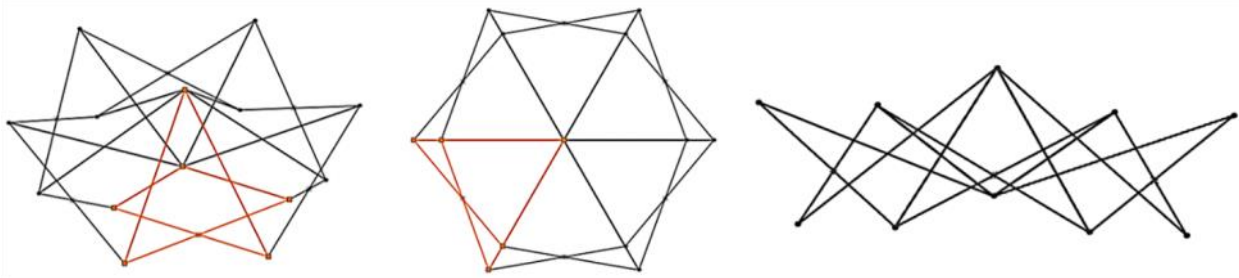


Figura 3.72 Agrupación de módulos triangulares que forman un hexágono. Superficie sinclástica. Fuente: Elaboración del autor

La figura 3.74 expone las etapas de despliegue de esta agrupación de siete hexágonos, un hexágono central y seis alrededor, el modelo realizado en el programa SolidWorks® [135] tiene como condición mantener la longitud y la dirección de las barras, sin que puedan generar torsión durante las etapas de despliegue.

Se observa que a medida que se despliega la superficie sinclástica, empiezan a aparecer incompatibilidades entre módulos, específicamente se genera la sobreposición entre tijeras.

La descripción de las incompatibilidades es señalada también por Félix Escrig en su modelo de malla proyectiva de base triangular, un casquete de 60 metros de diámetro y 15 metros de altura, configurado con barras de diferente tamaño. Escrig [25], describe los ojales que se generan en la superficie en las etapas intermedias, que aunque en la realidad no son visibles, las barras en estos puntos responden curvándose y generando grandes flexiones (figura 3.75).

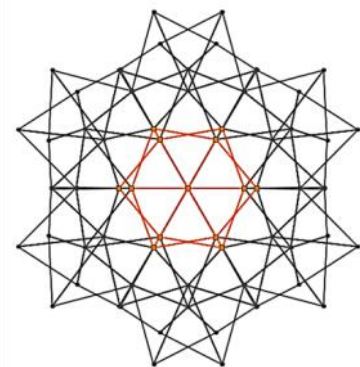


Figura 3.73 Agrupación de hexágonos. Superficie sinclástica. Fuente: Elaboración del autor

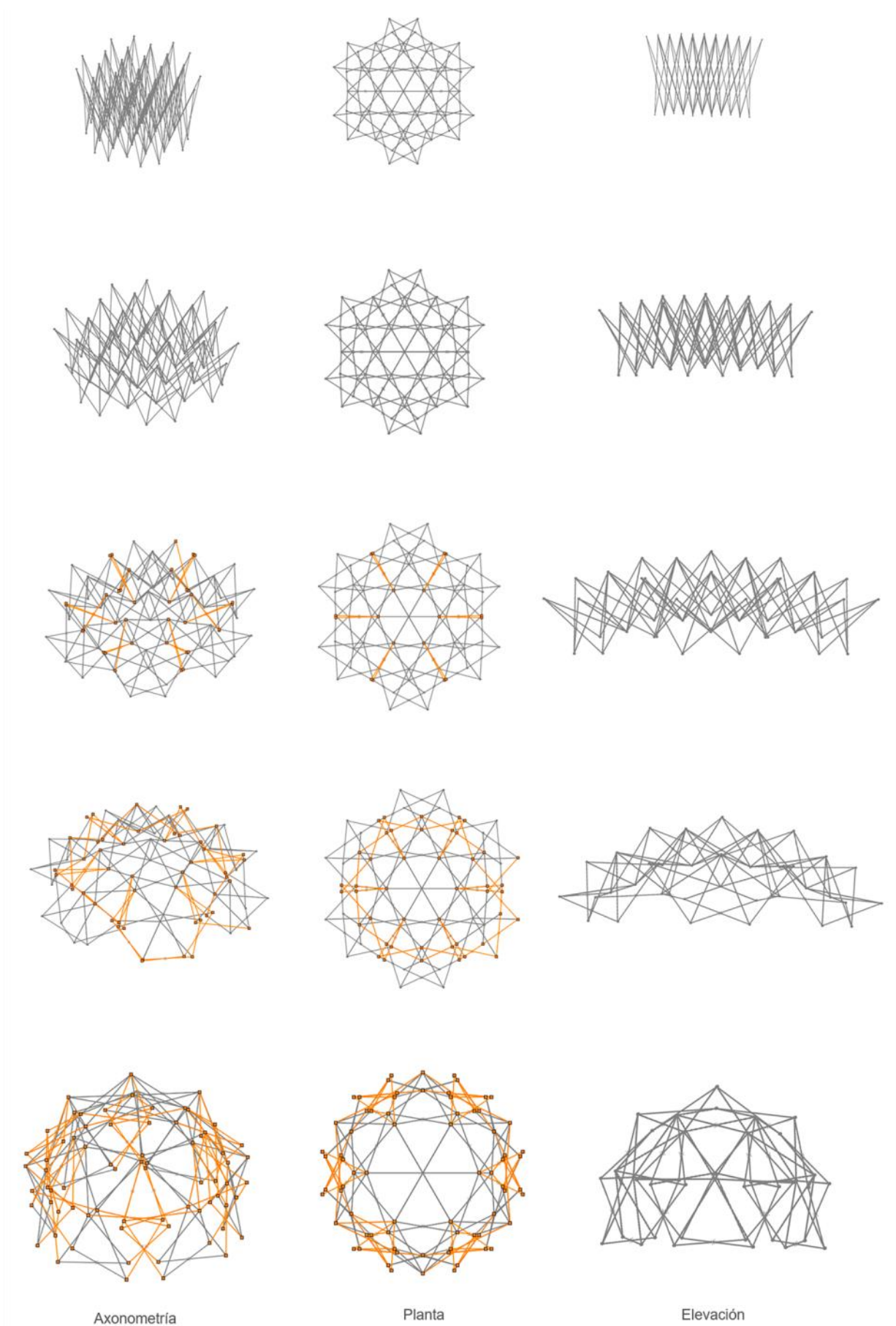


Figura 3.74 Etapas de despliegue de una superficie sinclástica con el STT. Agrupación de módulos triangulares. Barras con la misma longitud. Las barras naranja representan la incompatibilidad en el proceso de despliegue, sobreposición de tijeras. Simulación SolidWorks® [135]. Fuente: Elaboración del autor

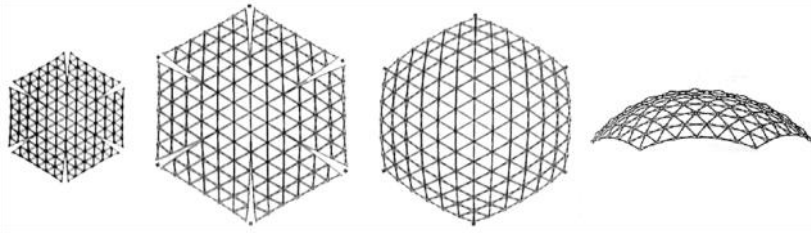


Figura 3.75 Malla proyectiva de base triangular. Casquete de 60 metros de diámetro y 15 metros de altura. Esquema incompatibilidades durante el proceso de despliegue [25]

Las soluciones técnicas presentadas por Escrig para enfrentar este tipo de incompatibilidades, consiste en introducir mecanismos de barras con articulación central deslizante (figura 3.76), similar al sistema tipo tijera propuesto por Zeigler (figura 2.25) y también optar por suprimir tijeras o barras aisladas específicas [13].

Con el objetivo de buscar proyectar la geometría de domos desplegables que incorporen el mayor número de elementos iguales y reducir las incompatibilidades, la figura 3.77 presenta una superficie sinclástica, a partir del mismo concepto de agrupación de la figura 3.74, pero eliminando módulos hexagonales intercalados para permitir una secuencia de despliegue sin interferencias con barras de la misma longitud.

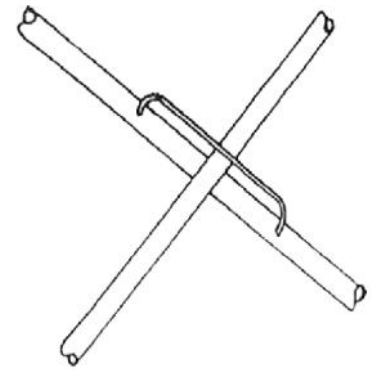


Figura 3.76 Tijera con articulación central deslizante [25]

La tabla 3.9 y 3.10 representan las dos alternativas de superficies descritas a partir de la agrupación de hexágonos. La tabla 3.9 corresponde a una superficie sinclástica continua con siete módulos agrupados, con una posición final de despliegue limitada por las incompatibilidades del despliegue y la tabla 3.10, corresponde a una superficie sinclástica que descarta módulos hexagonales intercalados. Esta última configuración genera aperturas tipo accesos, que pueden ser una ventaja a la hora de una aplicación arquitectónica.

A partir de esta estrategia, de suprimir módulos, se presentan otras posibilidades de agrupación creando nuevas configuraciones que representan arcos o casquetes que forman superficies sinclásticas (figuras 3.78).

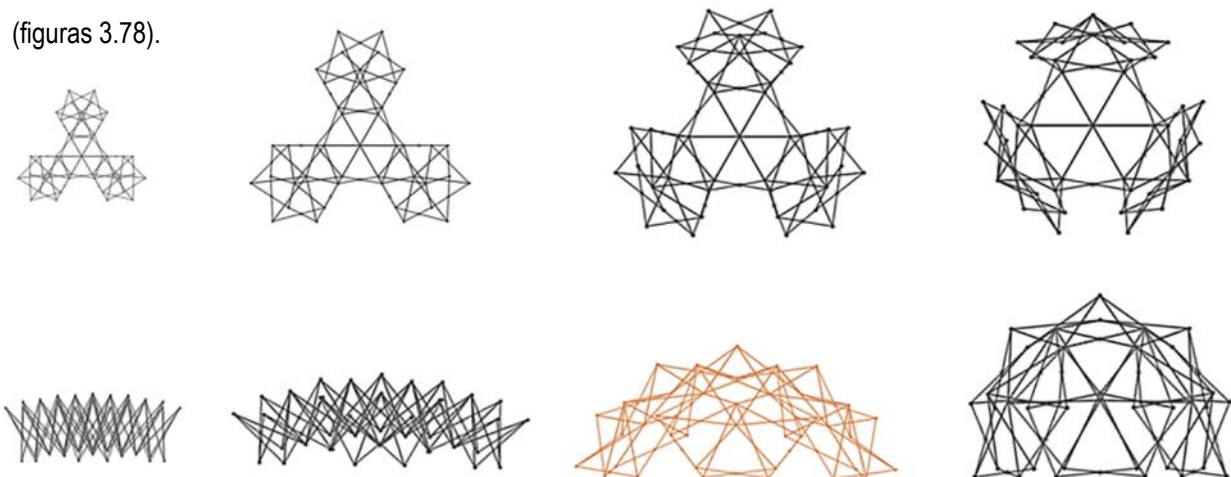


Figura 3.77 Domo a partir de la agrupación de cuatro hexágonos. Superficie sinclástica. Red triangular. Barras de igual longitud. Fuente: Elaboración del autor

Tabla 3.9 Superficie sinclástica. Agrupación de tijeras rectas. Tijeras con articulación excéntrica. Red triangular. Agrupación de siete hexágonos. Fuente: Elaboración del autor

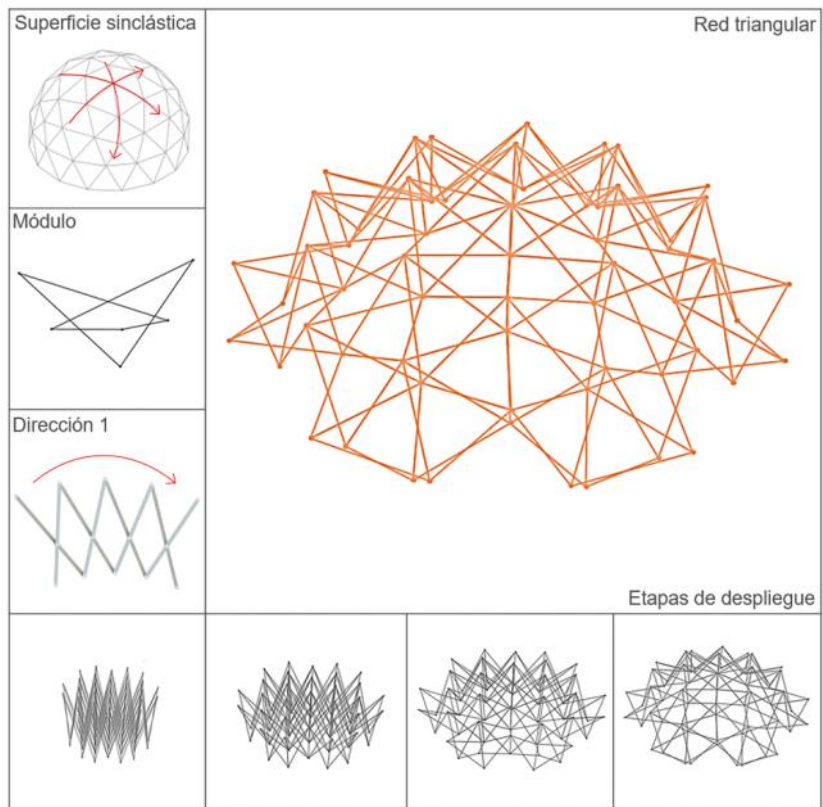


Tabla 3.10 Superficie sinclástica. Agrupación de tijeras rectas. Tijeras con articulación excéntrica. Red triangular. Agrupación de cuatro hexágonos. Fuente: Elaboración del autor

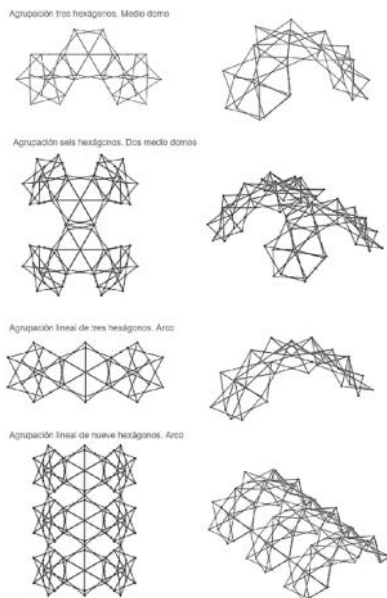
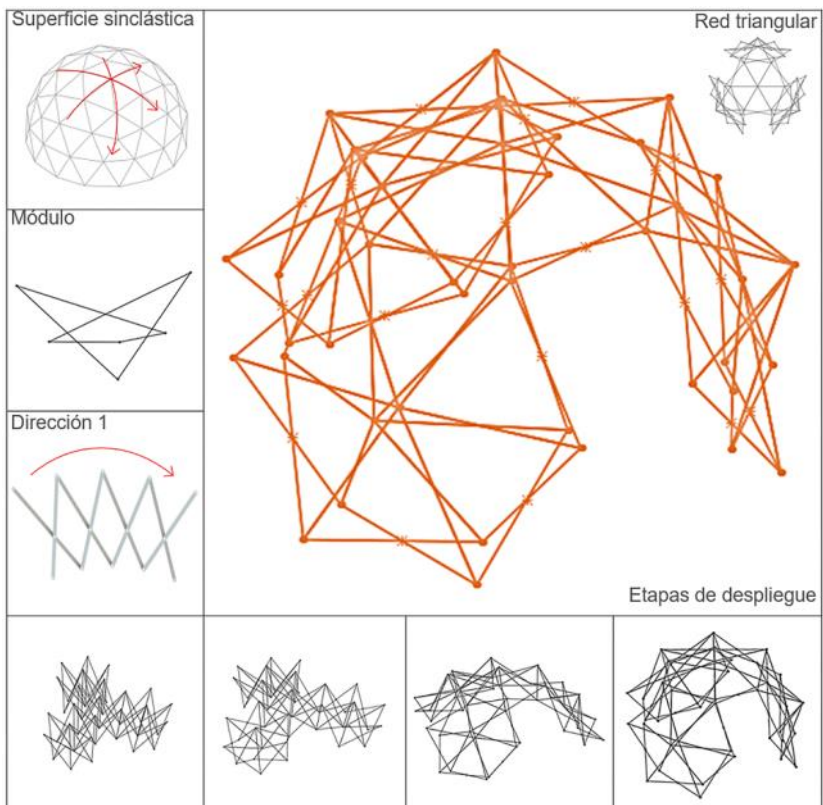


Figura 3.78 Diferentes posibilidades de agrupación de módulos hexagonales, que configuran superficie sinclásticas. Red triangular. Barras de igual longitud. Fuente: Elaboración del autor



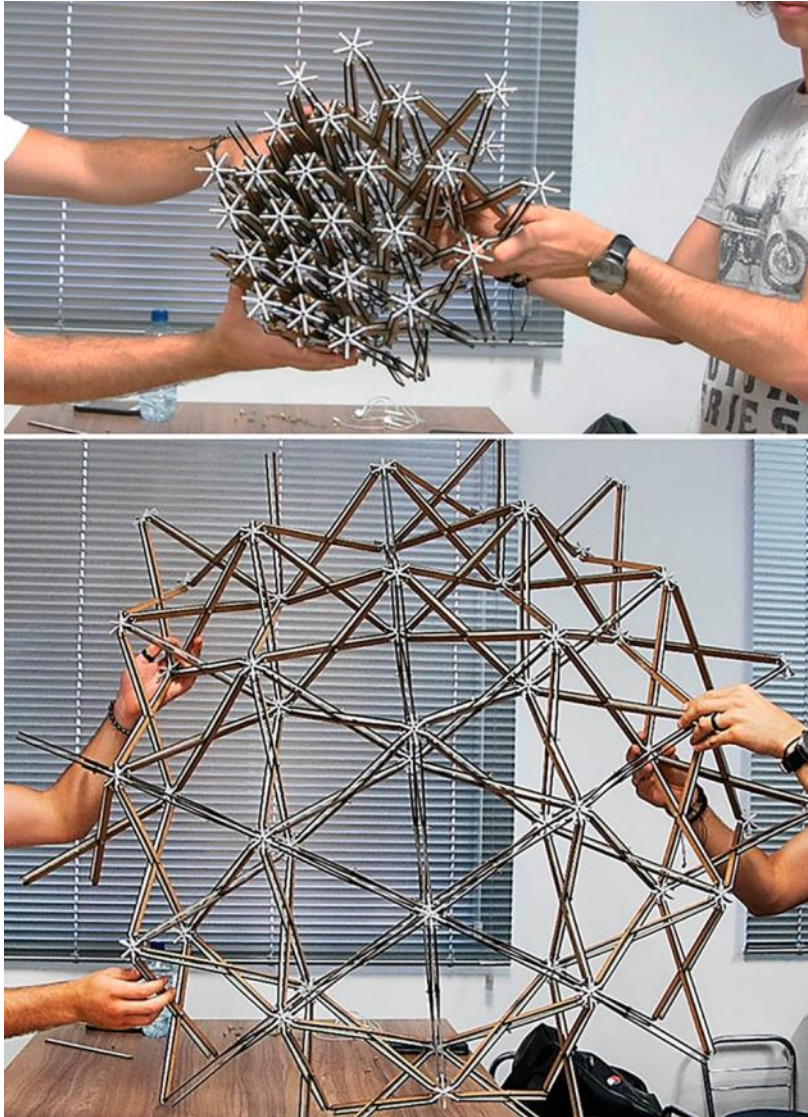


Figura 3.79 Maqueta. Agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica. Red triangular. Superficie sinclástica. Workshop Pontificia Universidad Católica de Minas Gerais, Brasil. 2017. Fuente: Elaboración del autor

A nivel de maqueta y con los materiales mencionados en los anteriores modelos físicos, las incompatibilidades en este tipo de agrupación no son perceptibles a esta escala.

La figura 3.79 corresponde a una agrupación de módulos triangulares con tijeras de articulación excéntrica. Durante su comprobación a nivel funcional, se observa que el movimiento de plegado y despliegue se realiza con facilidad, aunque se ha de señalar que la máxima apertura de la superficie, depende de aquella posición intermedia donde la longitud de las barras admiten el despliegue antes de generarse la torsión en las mismas, por la necesidad de incrementar su longitud en las siguientes etapas de despliegue y porque se genera un bloqueo del movimiento de apertura, al no poder superponerse las barras en el modelo físico.

Algunos ejemplos de experimentación sobre este tipo de superficies refieren a la figura 3.80.

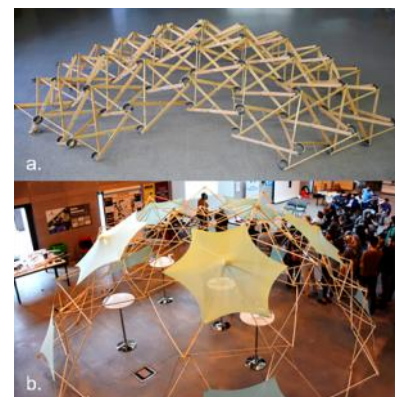
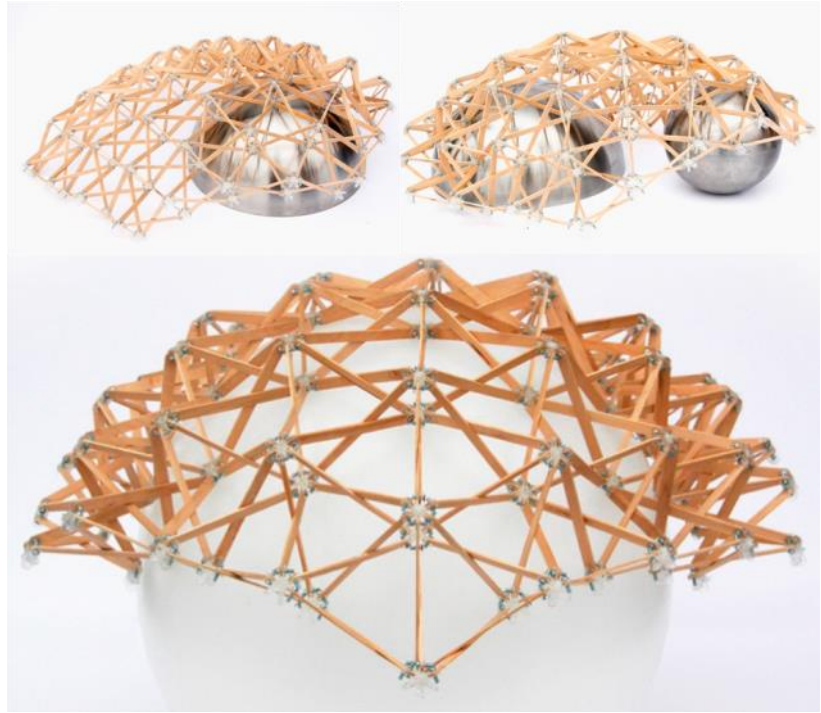


Figura 3.80 a) Pabellón Erizo. Workshop Pontificia Universidad Javeriana 2013. b) Domo desplegable. Workshop Universidad Abdallah Gul. Kayseri. Turquía. 2017. Construcción O. Avellaneda. Fuente: www.smia-experimental.com/ Recuperado [24/01/2019]

Figura 3.81 Maqueta con barras de madera y nodos plásticos (impresión 3d). Configuración superficie sinclástica. Red triangular [6]



La imagen 3.81 expone una versión de maqueta de una superficie sinclástica con agrupación de tijeras rectas, en una red triangular, realizada por Berigistain [6], con barras de madera y nodos plásticos realizados con impresión 3d, pero nuevamente la escala y el material de este tipo de maquetas permite holguras y deformaciones muy diferentes a escala real [6].

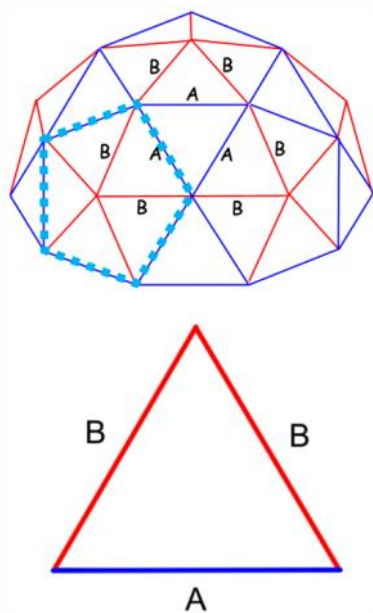


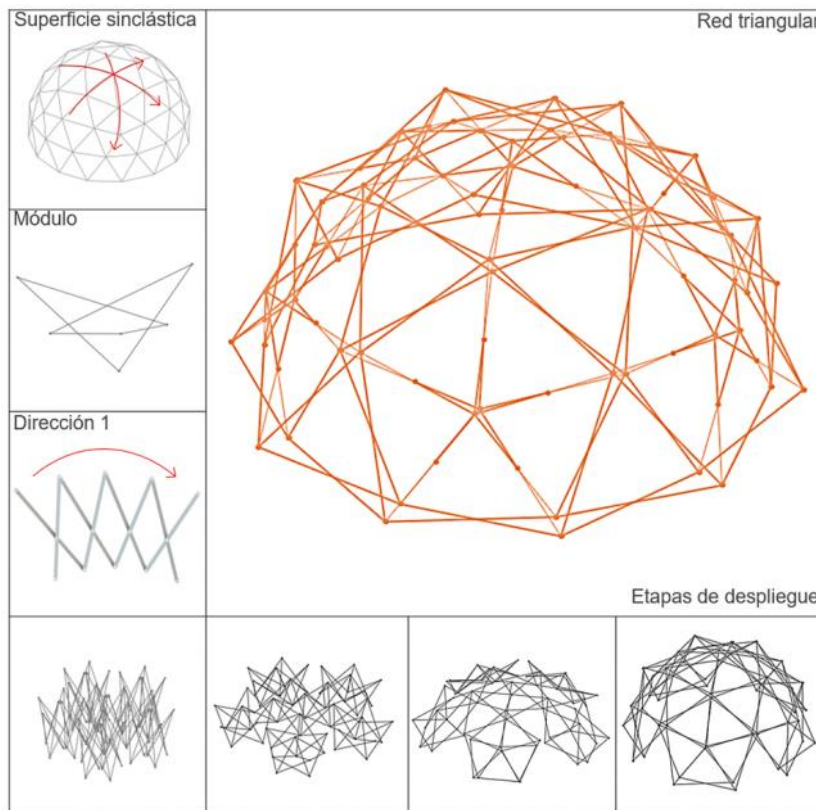
Figura 3.82 Geometría de una geodésica frecuencia 2v. Caracterización de barras.
Fuente: <https://www.ziptiedomes.com/geodesic-dome-calculators/2v-geodesic-dome-calculator.htm>
Recuperado [25/01/2019].

La tabla 3.11 describe la geometría de una geodésica desplegable con frecuencia 2v. Esta geometría consiste en enlazar seis módulos pentagonales, un módulo central como cúspide y los demás articulados alrededor. La agrupación permite generar una superficie sinclástica con una red triangular continua, mucho más estable que el caso anterior (tabla 3.10) y sin aberturas particulares.

La diferencia radica en que la geodésica 2v desplegable, incluye dos tipologías de barras (aristas) de diferente longitud, aquellas que forman el perímetro de los pentágonos y las barras que van al centro de estos pentágonos (figura 3.82).

Para hallar estas longitudes, basta con buscar algún tipo de calculadora on-line para domos geodésicos que se encuentran programadas para este fin y al servicio de cualquier usuario. Se procede a cargar el diámetro deseado o la longitud de barra estimada y el programa arroja las longitudes de barras específicas para cada tipo de geodésica.

Tabla 3.11 Superficie sinclástica. Geodésica desplegable 2v.
Agrupación de tijeras rectas. Tijeras con articulación excéntrica. Red
triangular. Fuente: Elaboración del autor



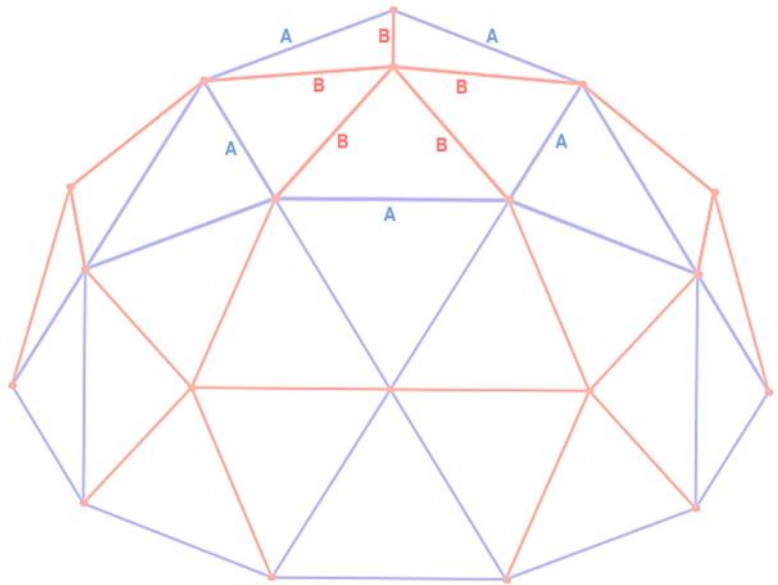
En el esquema de la tabla 3.11 se utiliza la geodésica con el menor número de barras distintas, correspondiente a la de frecuencia $2v$.

Entendiendo que cada tipo de arista de la geodésica corresponde a dos tipos de tijera (figura 3.82), el método geométrico para hallar las longitudes de barra de cada tijera, es reemplazar estas dos tipologías de aristas por trapecios trazados a partir de los ejes radiales del centro de la geodésica y con una altura estimada para simular las tijeras en posición desplegada y que genere un adecuado canto de la estructura total (ver apartado 5.1). Los trapecios son ahora la base geométrica para construir los ejes longitudinales de las barras en cada tipo de tijera, en la posición final de despliegue (figura 3.83).

Al analizar las etapas de despliegue de esta agrupación en el programa de simulación SolidWorks® [135], con las condiciones de mantener la longitud constante de las barras durante todas las etapas del despliegue y evitar que las barras se doblen o sean afectadas por esfuerzos de torsión en las posiciones más críticas durante el despliegue, la simulación puede realizar un proceso de despliegue sin interferencias, el cual consiste en conectar los módulos pentagonales alrededor del módulo central desde sus vértices (figura 3.84).

Figura 3.83 Proceso geométrico para el trazado de tijeras en una geodésica frecuencia 2v.
Fuente: Elaboración del autor

a. Geometría de geodésica 2V tomada de un calculador de domos on-line. Definición de las tipologías de barras (A y B).
Fuente: <https://www.ziptiedomes.com/geodesic-dome-calculators/2v-geodesic-dome-calculator.htm>
Recuperado [25/01/2019].



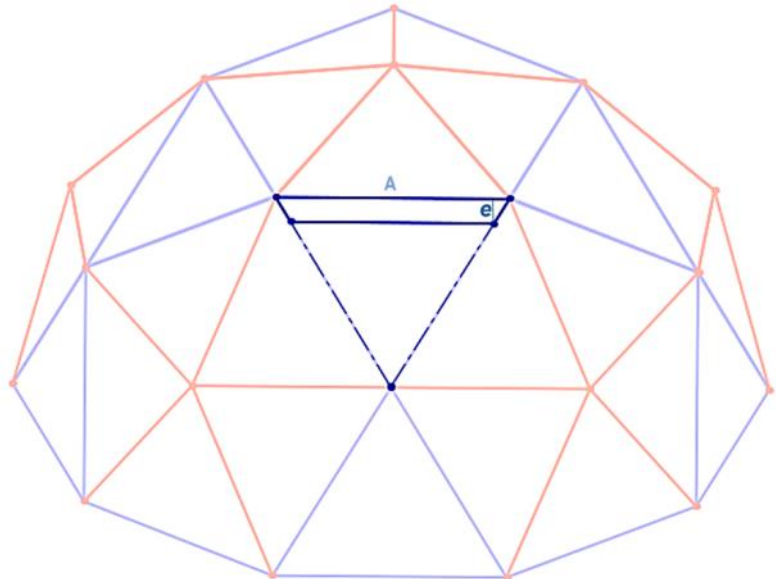
b. Trazado de radios desde el centro de la geodésica para definir el trapecio de la barra tipo A. La altura del trapecio, definido en la imagen como e , corresponde a la relación del espesor de un arco y su radio, definida como :

$$k = e/R$$

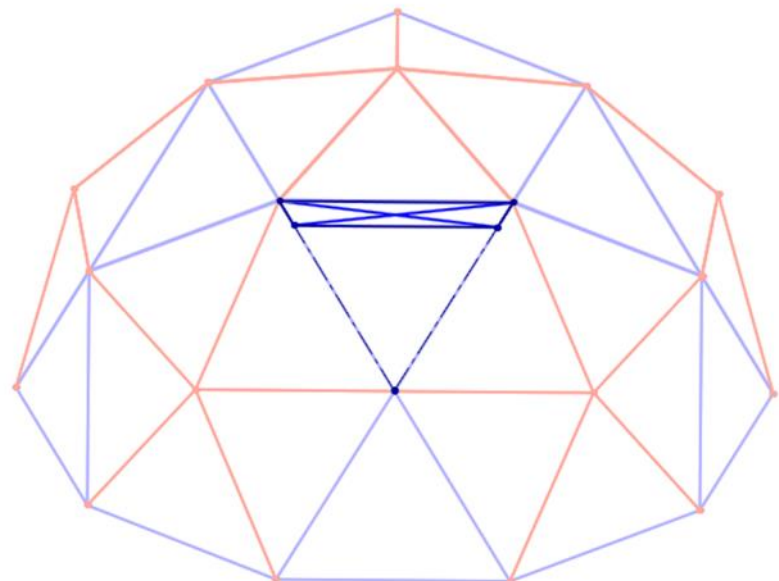
Donde e es el espesor y R el radio medio [44] pp. 95.

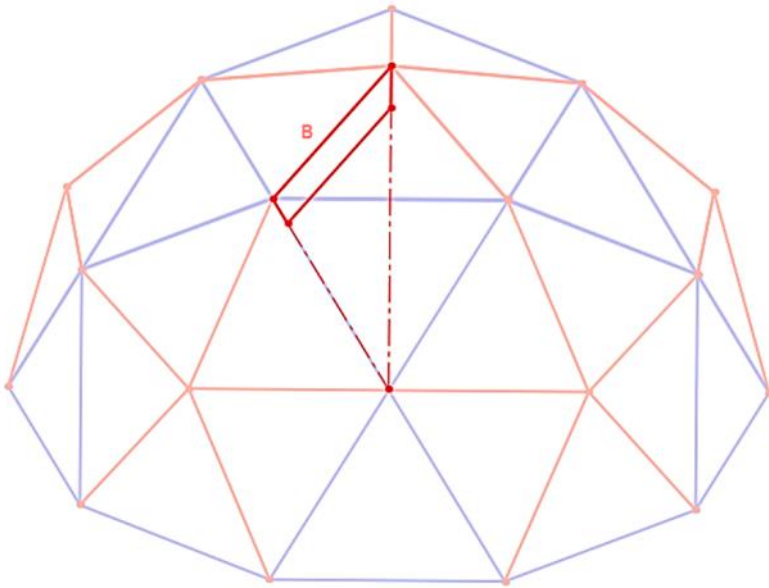
$$k = 0.1$$

Ver apartado 5.1

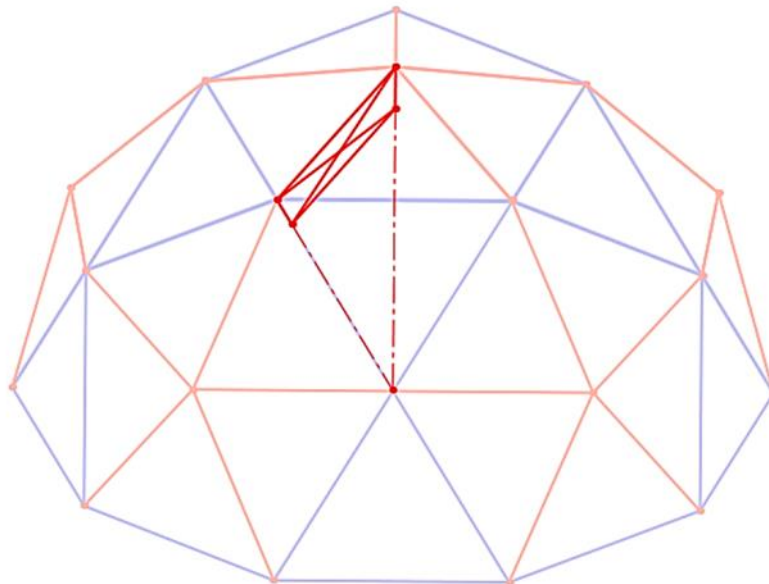


c. Definición de las barras de la tijera tipo A, en posición final de despliegue, las cuales corresponden a las diagonales del trapecio guía.

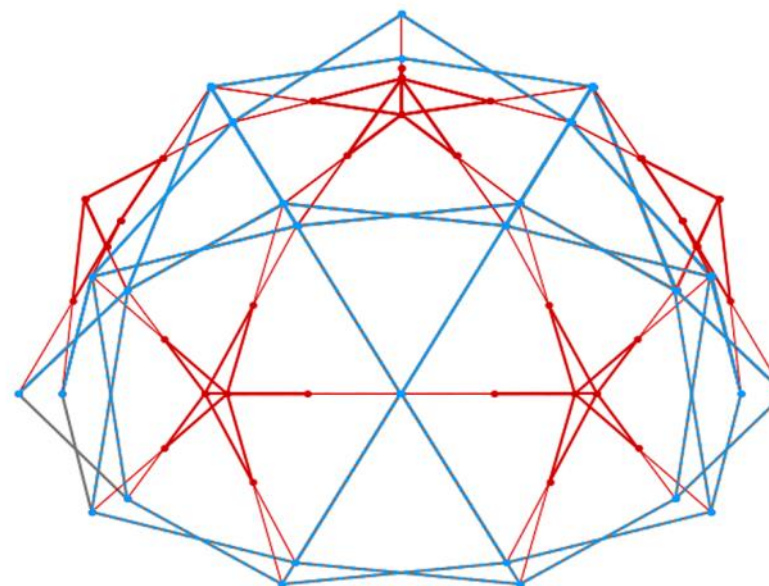




d. Trazado de radios desde el centro de la geodésica para definir el trapecio de la barra tipo B. La altura de los trapecio debe ser igual para todos los tipos de barras.



e. Definición de las barras de la tijera tipo B, en posición final de despliegue, las cuales corresponden a las diagonales del trapecio guía.



f. Geometría de geodésica desplegable 2v, a partir de barras rectas. Agrupación de tijeras con articulación excéntrica .

El despliegue se caracteriza porque no hay una articulación entre módulos consecutivos perimetrales, solo hasta obtener la posición final de despliegue, donde es posible conectar todos los módulos pentagonales y garantizar la estabilidad y forma definitiva de la geodésica resultante (Tabla 3.11 y figura 3.84).

La secuencia de despliegue simulada en el programa con las condiciones anteriormente mencionadas (longitud de barras constante y evitar los esfuerzos de flexión y torsión en las barras) demuestra el comportamiento típico de este tipo de estructuras, se genera un radio variable en las diferentes posiciones de despliegue (figura 3.37 y 3.38), obteniendo su máxima extensión en las etapas intermedias del despliegue y fuera del límite del diámetro establecido por la geodésica determinada, justo antes de posicionarse en su estado final (figura 3.84).

Ahora al llevar este proceso de despliegue a la realidad, probablemente requiere de retos técnicos para desplegar los módulos pentagonales desde los vértices de módulo central, soluciones técnicas como adaptando el nodo en estos puntos para soportar el peso e incorporando cables extensores para garantizar la seguridad de despliegue. También es posible desplegar los módulos por aparte y articularlos en su estado final de despliegue para configurar la geodésica, un proceso ya realizado en los proyectos de Piñero (figura 2.23).

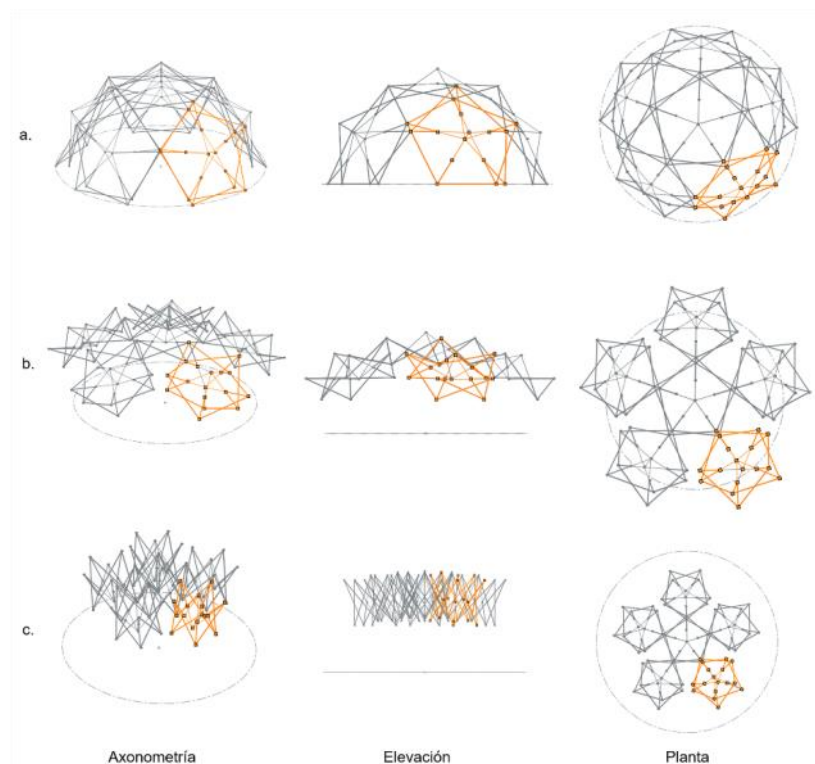


Figura 3.84 Etapas de despliegue geodésica 2v. A partir de módulos pentagonales. Simulación SolidWorks® [135]

a) Etapa final de despliegue. Geodésica formada.

b) Etapa de despliegue intermedia. La agrupación se extiende fuera del diámetro original de la geodésica.

c) Etapa inicial de despliegue, los módulos se despliegan sin interferencias al no estar conectados con el consecutivo.

Fuente: Elaboración del autor

Esta última propuesta de montaje, aprovecha las características de las estructuras desplegables para un proceso de montaje y desmontaje modular y el proceso de plegado para optimizar los procesos de transporte y almacenamiento de la estructura.

Una nueva exploración para el proceso de despliegue de una geodésica desplegable a partir de STT y que surge de la imagen anterior (figura 3.84), consiste en desplegar módulos hexagonales desde el pentágono central articulados a las tijeras/aristas del módulo central (figura 3.85).

Al realizar la simulación de despliegue de esta agrupación, nuevamente el programa proyecta la separación de los módulos y genera medios hexágonos o mejor, módulos triangulares agrupados de a cuatro, que se despliegan hasta su etapa final según la geometría de la geodésica y de esta forma es posible articular todos los módulos con el consecutivo para estabilizar la estructura (figura 3.85).

La maqueta realizada incluye las dos tipologías de barras y se obtiene un proceso de despliegue favorable, esto se debe a la escala de la maqueta y a los materiales empleados (figura 3.86). La combinación de las barras plásticas y los nodos proyectados como anillas metálicas permiten la acomodación de los elementos en cada etapa de despliegue sin interferencias, en la práctica es posible analizar y comprender la agrupación de módulos junto con proceso de despliegue que se realiza con todos los módulos conectados, pero no se visualiza los verdaderos esfuerzos a los que son sometidos los elementos (figura 3.86).

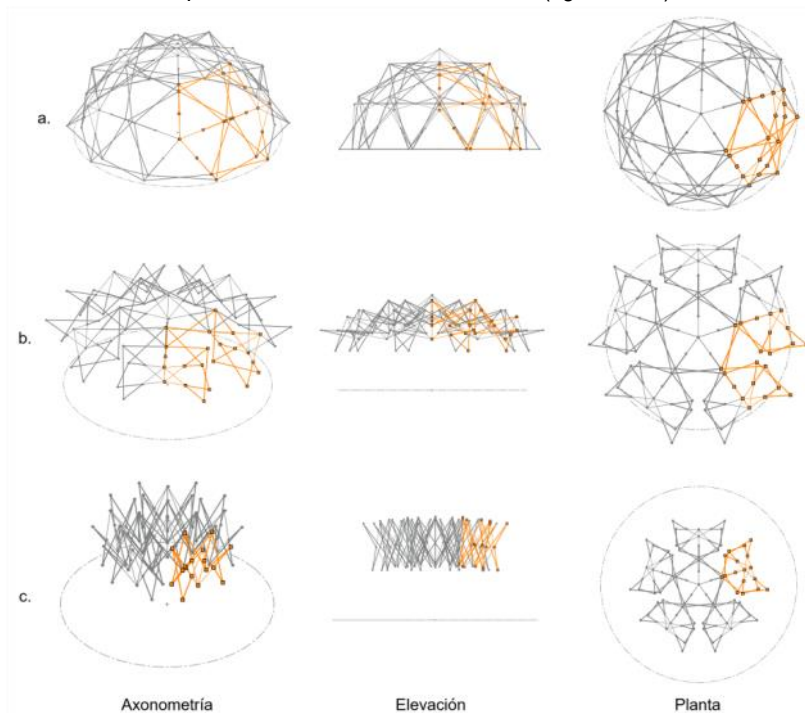


Figura 3.85 Etapas de despliegue geodésica 2v. A partir de módulos hexagonales. Simulación SolidWorks® [135]

- a) Etapa final de despliegue. Geodésica formada.
- b) Etapa de despliegue intermedia. La agrupación se extiende fuera del diámetro original de la geodésica. Los hexágonos se separan en módulos triangulares
- c) Etapa inicial de despliegue, los módulos se despliegan sin interferencias al no estar conectados con el consecutivo.

Fuente: Elaboración del autor

Figura 3.86 Maqueta con barras plásticas y nodos a partir de anillas metálicas. Barras de diferentes longitud. Configuración superficie sinclástica. Geodésica 2v.

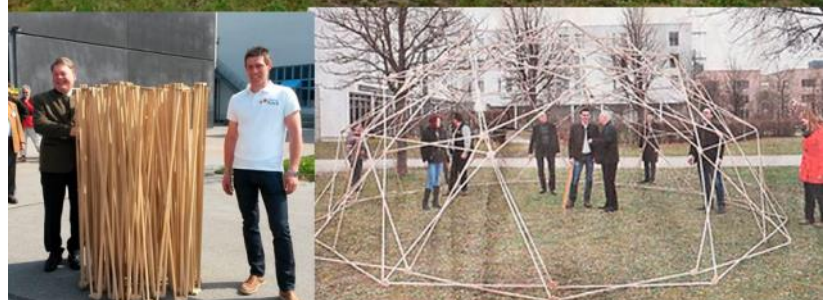
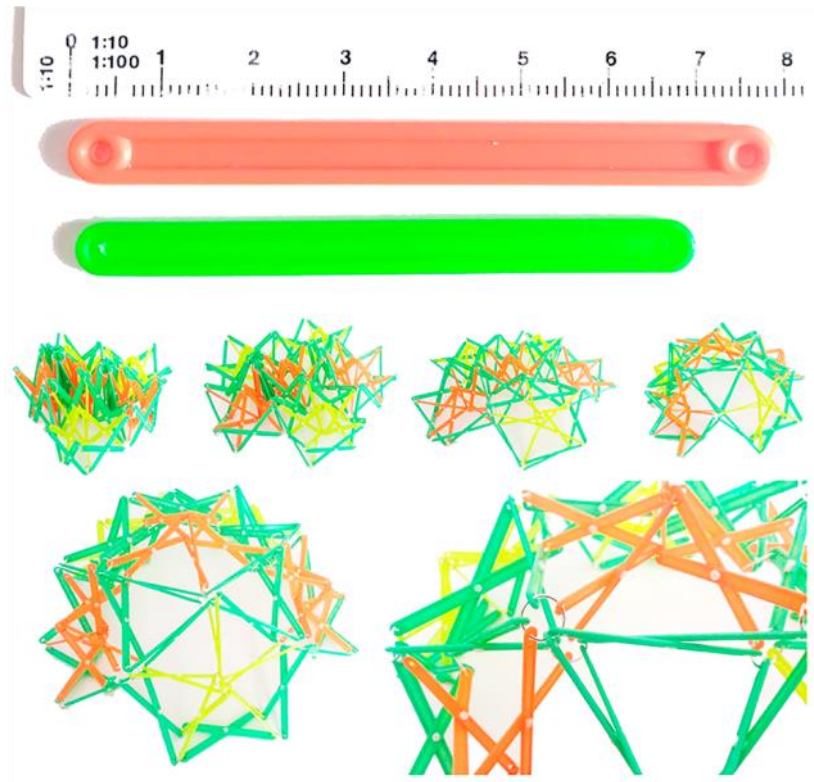
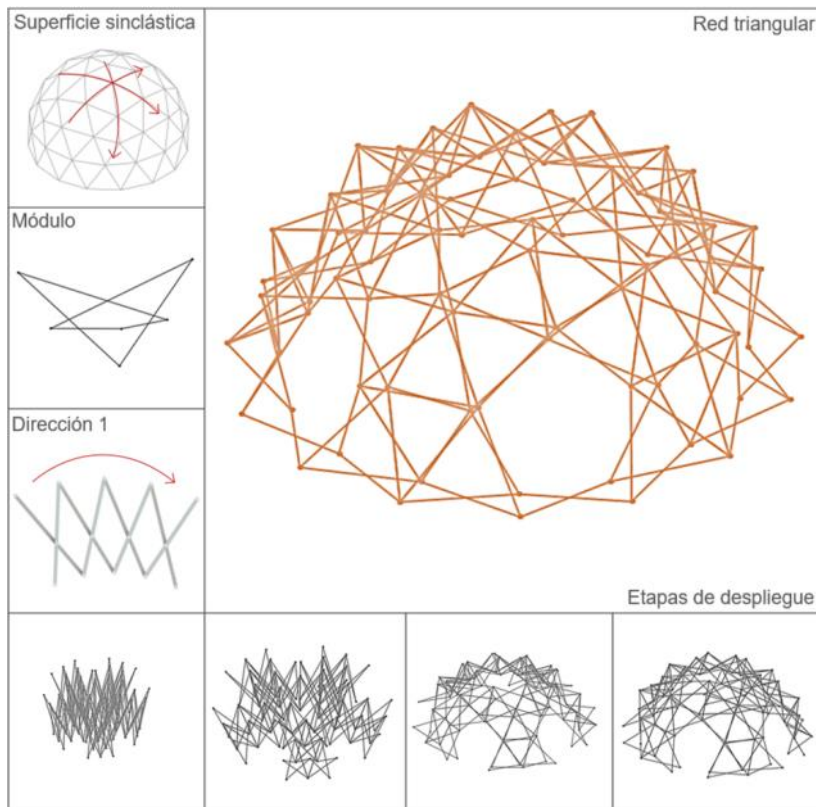


Figura 3.87 Prototipo geodésica 3v 3/5 desplegable [117].

Tabla 3.12 Superficie sinclástica. Geodésica $3v\ 3/8$ desplegable. Agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica. Red triangular. Fuente: Elaboración del autor



La figura 3.87 representa un caso de éxito de domos desplegables configurado a partir de la agrupación de módulos triangulares que forman módulos hexagonales y pentagonales. Este ejemplo construido por Benedikt Köck (2012) descarta módulos de tijeras, configurando los pentágonos como espacios vacíos y elimina la articulación central en las tijeras que llegan en un ángulo semiperpendicular al suelo, para reducir los esfuerzos en las barras y facilitar el proceso de despliegue.

La geometría base proyectada por Köck [117], consiste en una geodésica de frecuencia $3v$ y corresponde a $3/8$ de una esfera, al proceder a distinguir las figuras geométricas que componen esta geodésica para reemplazar las aristas por tijeras, se observa que hay cinco hexágonos articulados alrededor de un pentágono central (cúspide) y en el nivel inferior, medios hexágonos que se conectan a los hexágonos principales. Los espacios que se forman sobre la esfera al enlazar los hexágonos configuran cinco pentágonos más (figura 3.88).

A partir de la geodésica $3v\ 3/8$ surge la tabla 3.12, que representa esta geometría reemplazando las aristas por módulos de tijeras y la tabla 3.13 con la misma frecuencia pero completando los hexágonos inferiores, obteniendo un geodésica de $5/8$ de la esfera (figura 3.89).

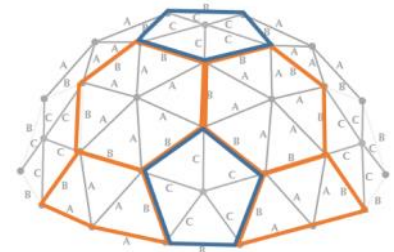


Figura 3.88 Geodésica $3v\ 3/8$ de esfera. Definición de hexágonos y pentágonos. Fuente: Elaboración del autor

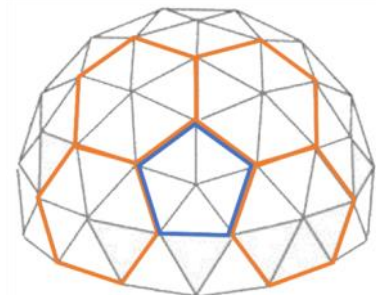
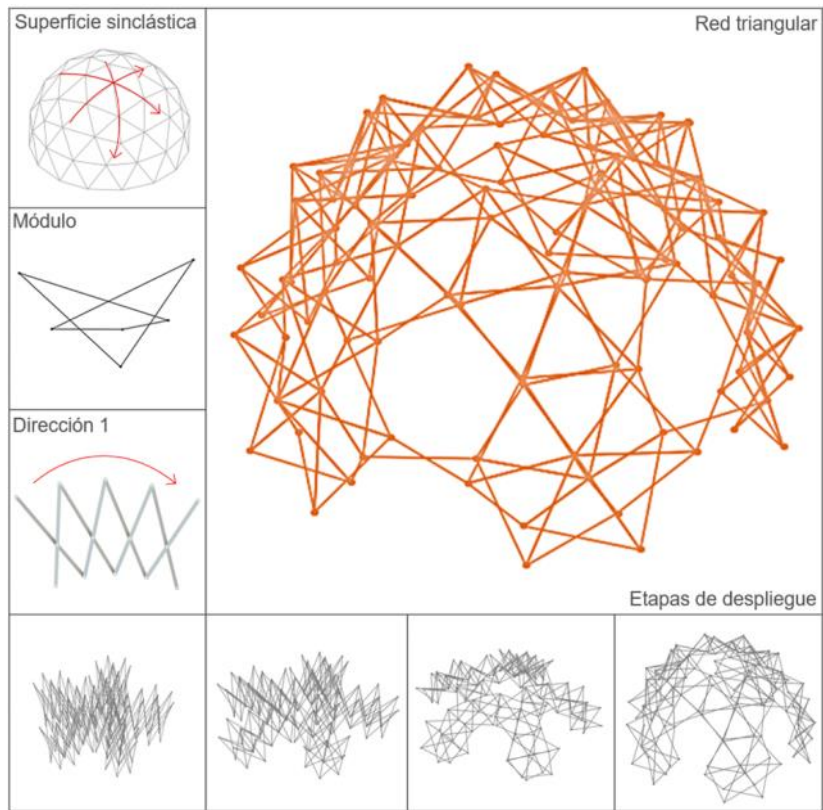


Figura 3.89 Geodésica $3v\ 5/8$ de esfera. Definición de hexágonos y pentágonos. Fuente: Elaboración del autor

Tabla 3.13 Superficie sinclástica. Geodésica 3v 5/8 desplegable. Agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica. Red triangular. Fuente: Elaboración del autor



Los calculadores de domos geodésicos, que se encuentran al servicio del usuario on-line, determinan que esta tipología de geodésica requiere de tres tipos de longitudes distintas (figura 3.90) y es posible proceder a llevar estas longitudes para configurar los módulos de tijeras correspondientes, según el método propuesto en la figura 3.83.

Reiterando que el interés de esta investigación es analizar y proponer superficies sinclásticas con el mayor número de barras de la misma longitud, se determina que para simular el proceso de despliegue del modelo digital de la geodésica desplegable 3v (figura 3.91) en el programa SolidWorks® [135], se ajustan las barras con la misma longitud, con articulación excéntrica y se configuran los módulos hexagonales a partir de la agrupación de submódulos triangulares.

También se descartan las tijeras que configuran los radios concéntricos al interior de los pentágonos, tal como lo propone Benedikt Köck [117], al considerar que no afecta en la estabilidad final de la estructura desplegada y que al eliminarlas facilitan el proceso de despliegue (figura 3.91).

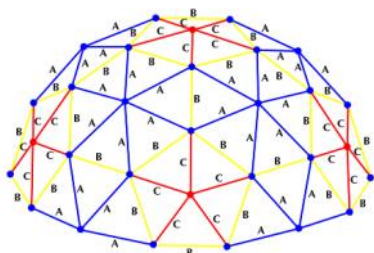


Figura 3.90 Esquema dimensiones de barras geodésica 3v 3/8. Calculado de domos geodésicos. Zip Tie Domes [113].

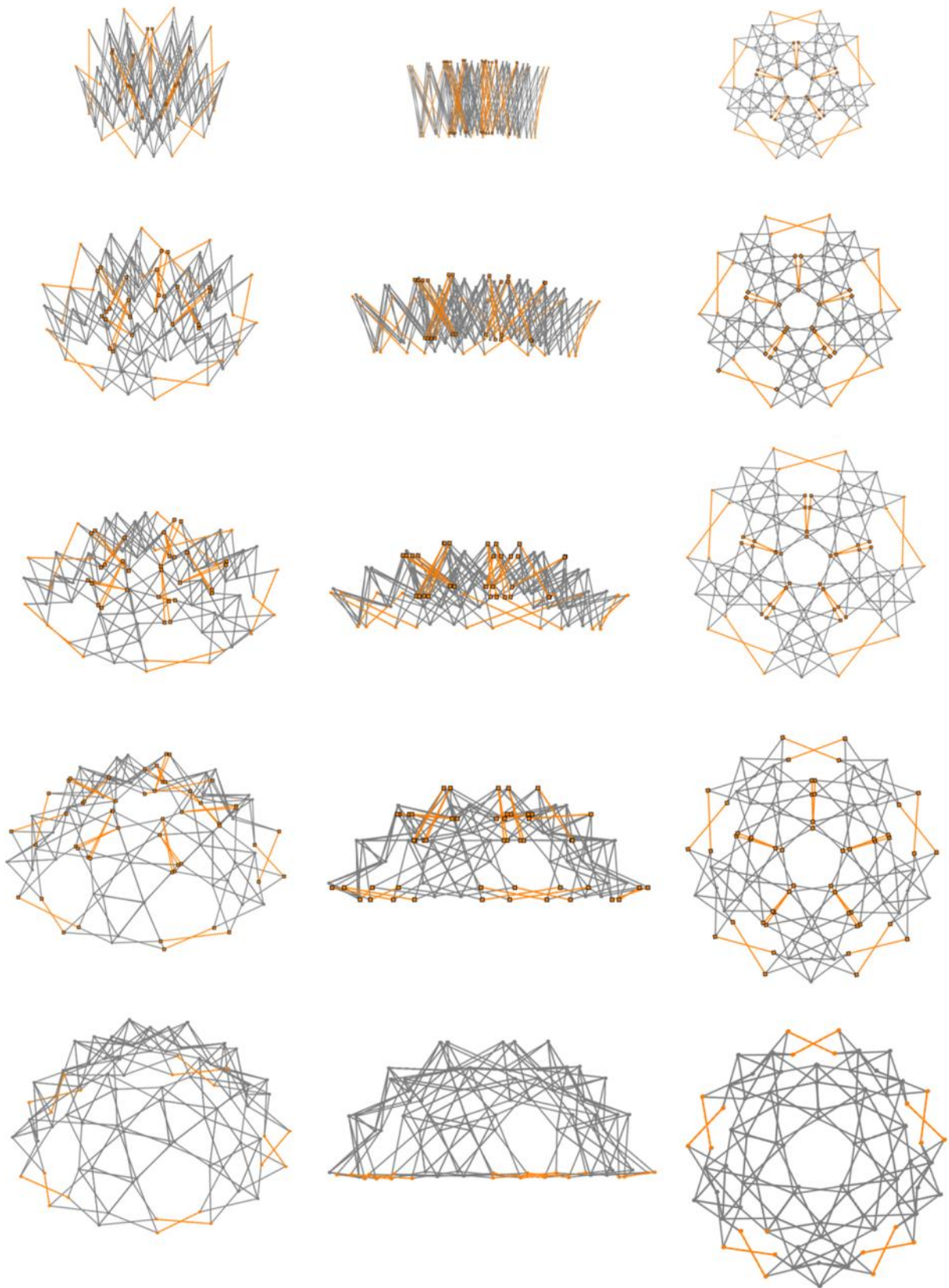
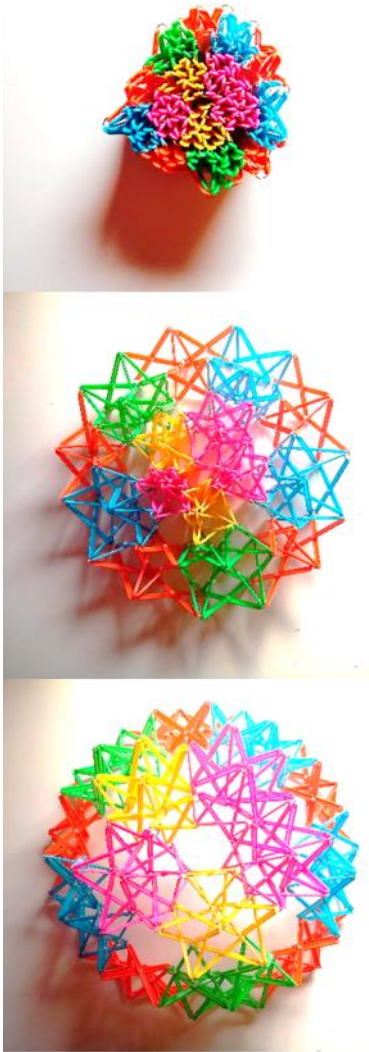


Figura 3.91 Etapas de despliegue geodésica 3v 3/8. Simulación en SolidWorks® [135].
Fuente: Elaboración del autor



Se observa en la figura 3.91 que la primera incompatibilidad, surge en la agrupación de los módulos hexagonales alrededor de un pentágono, generando aberturas entre hexágonos, seguramente debido a que la longitud de las barras que componen el perímetro del hexágono debe ser un poco más largas según el calculador de domos.

Las diferentes etapas de despliegue de esta superficie sinclástica, simuladas con el programa SolidWorks® [135], describen el proceso de despliegue y comportamiento típico de las estructuras desplegadas a partir del STT con barras rectas; la agrupación se expande fuera del diámetro final de la geodésica y se contrae en las últimas etapas de despliegue para posicionarse en su geometría final de despliegue.

Una vez se establece la forma final, es necesario incluir tijeras adicionales para cerrar el anillo perimetral sobre el suelo (tabla 3.12) y anclajes o dispositivos que garanticen la seguridad y el comportamiento adecuado de la estructura cuando esta en uso.

Si se incluye las tijeras faltantes en el modelo digital, algunas de ellas estarían sometidas a esfuerzos de tensión para adaptarse a las etapas de despliegue más críticas, la simulación expone estas barras en color naranja y que cambian su longitud en las diferentes posiciones de despliegue.

Ahora, en la construcción real de prototipos, si no se incluye soluciones técnicas, como barras telescópicas o extensibles, es factible escoger un material adecuado, en el caso de Koch (figura 3.87), las barras de madera resisten la flexión y pueden soportar las etapas de despliegue más críticas, pero generalmente se presenta rotura de las barras.



La representación en maquetas físicas demuestra también este comportamiento, nuevamente la selección de los materiales y la escala, permite la deformación de las barras en todas las etapas de despliegue y se observa que a medida que se despliega la superficie, los módulos de tijeras que enlazan submódulos hexagonales presentan mayor comportamiento de flexión y torsión provocando que las anillas o nodos se giren para responder a estos esfuerzos (figura 3.92)

Figura 3.92 Etapas de despliegue. Maqueta geodésica 3v 5/8. Fuente: Elaboración del autor

Una nueva exploración de una superficie sinclástica configurada a partir de módulos triangulares, surge como una variación de la geodésicas presentadas anteriormente.

La tabla 3.14 representa un domo desplegable configurado a partir de un hexágono central (cúspide) y seis pentágonos alrededor, la geometría resultante describe un anillo perimetral inferior que no llega plano al suelo, lo que podría ser una ventaja al ser aprovechables como accesos pero dificulta las soluciones técnicas para los anclajes en estos puntos.

La maqueta que representa esta agrupación presenta un proceso de despliegue sin dificultades (figura 3.93), pero el proceso de pliegue cuesta realizarlo, hay que forzar la maqueta para cerrarla y se observa que las tijeras perimetrales del hexágono central se flexionan en las posiciones intermedias del despliegue (figura 3.94).

Tabla 3.14 Superficie sinclástica. Geodésica desplegable. Agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica. Red triangular. Hexágono central y cinco pentágonos alrededor.

Fuente: Elaboración del autor

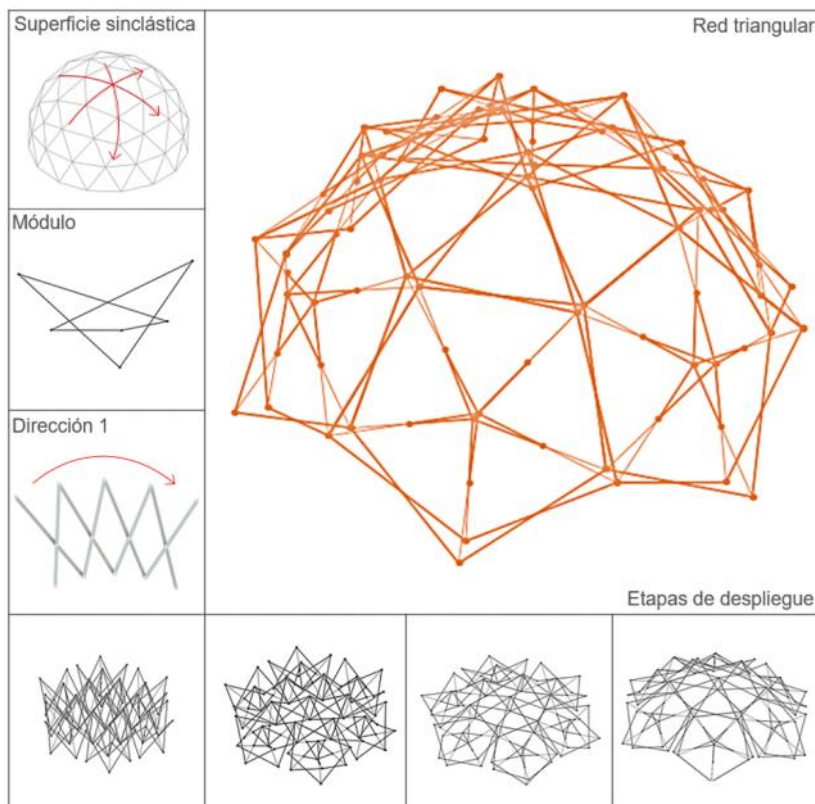


Figura 3.93 Maqueta geodésica desplegable a partir de un módulo hexagonal como cúspide.
Fuente: Elaboración del autor

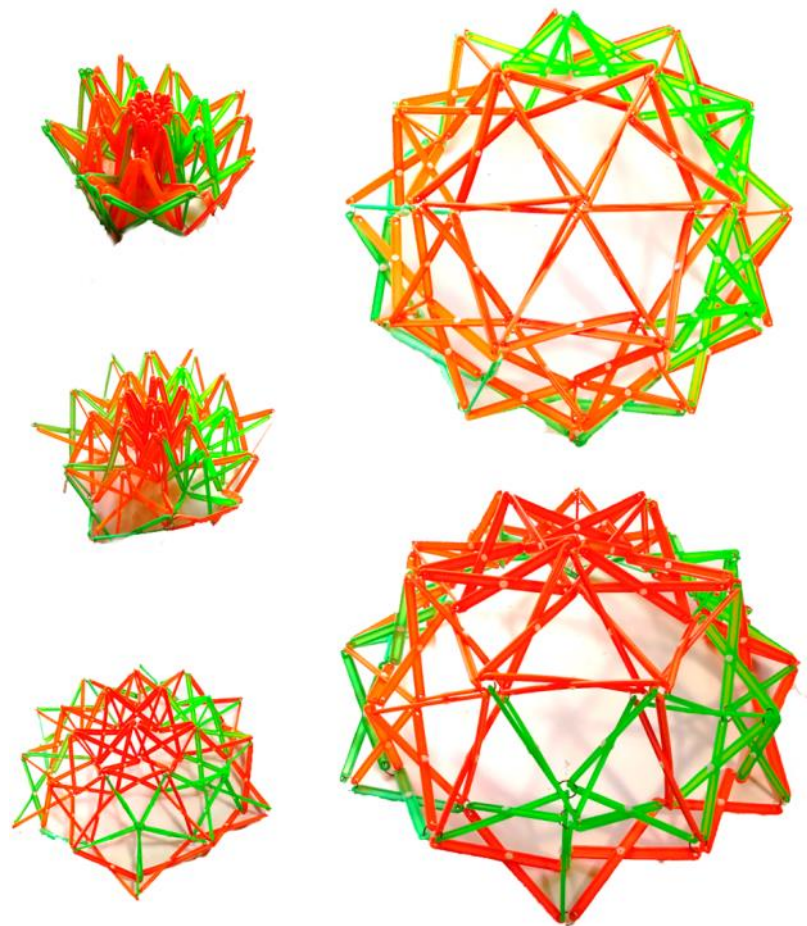
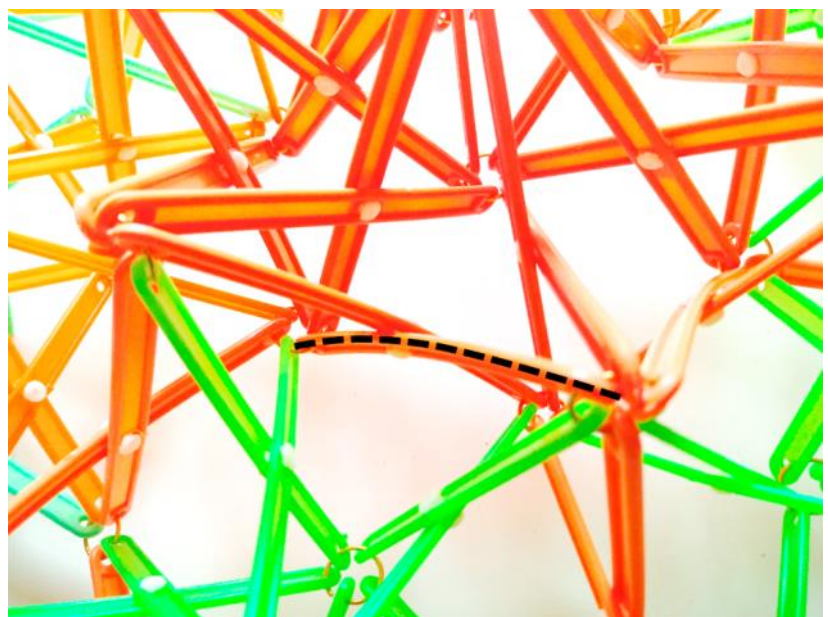


Figura 3.94 Detalle flexión de las barras durante el proceso de despliegue.
Fuente: Elaboración del autor



Bajo el concepto de diseño del anterior ejemplo (Tabla 3.14) que explora configurar geodésicas desplegables incorporando un hexágono como cúspide y punto de partida para tejer los módulos pentagonales alrededor de esta figura geométrica inicial, surge la geodésica de la Tabla 3.15, una geodésica que inicia configurando un cuadrado en la cúspide, que se genera al enlazar cuatro hexágonos desplegables.

En ambos casos la simulación en el modelo digital en el programa SolidWorks® [135], describe un proceso de despliegue que genera las aberturas entre módulos pentagonales y hexagonales durante las etapas intermedias del proceso de despliegue. Se obtiene la configuración final cuando se cierran estas aberturas y se posicionan las tijeras inferiores sobre el suelo.

El comportamiento en las maquetas físicas representa el despliegue sin visualizar estas aberturas, visualizando los esfuerzos a escala que sufren las barras plásticas y los nodos (figura 3.95).

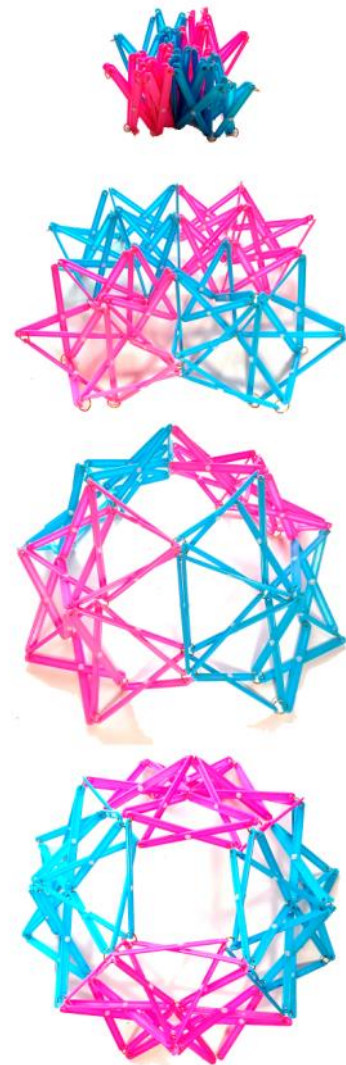


Tabla 3.15 Superficie sinclástica. Geodésica desplegable. Agrupación de tijeras rectas con articulación excéntrica. Red triangular. Cuadrado central y cuatro hexágonos alrededor. Fuente: Elaboración del autor

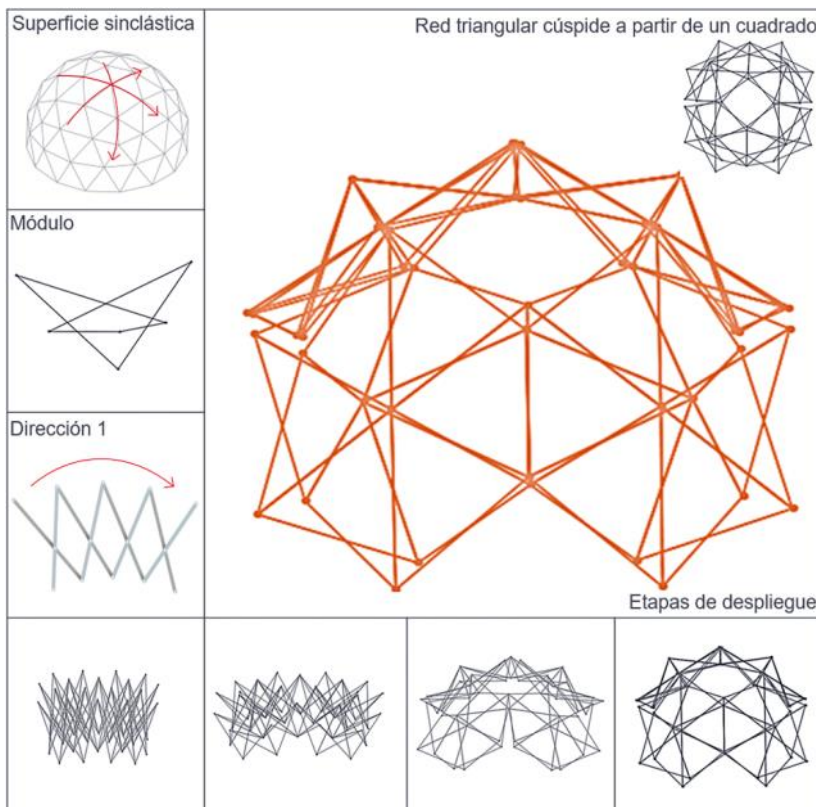


Figura 3.95 Maqueta geodésica desplegable a partir de un módulo cuadrangular como cúspide. Fuente: Elaboración del autor

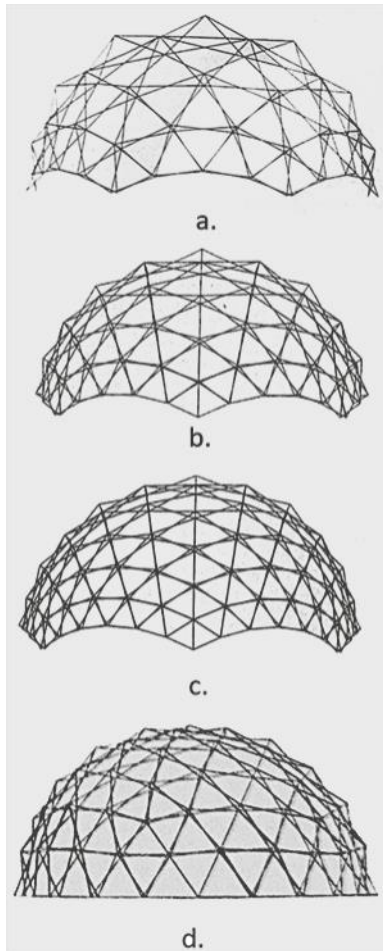


Figura 3.96 Geodésica desplegable STT. b) Frecuencia 5v. c) Frecuencia 6v. d) Medio Icosaedro. Frecuencia 4v [13].

Cabe aclarar que la geometría de las geodésicas extrapolada a la aplicación de geodésicas desplegadas con el STT, no es un campo de estudio específico en esta investigación, pero motiva a continuar su exploración en estudios futuros para analizar su viabilidad en otras frecuencias mayores (4v, 5v, 6v, etc) que, aunque implica mayor número de barras diferentes, la posibilidad de obtener curvaturas más sinuosas, diámetros mayores y barras proporcionales amerita su estudio en profundidad.

Su descripción y exploración general en este apartado, se realiza con el fin de completar y describir las diferentes posibilidades espaciales a partir de la agrupación de tijeras rectas expuestas en el presente capítulo, para ello se incluye las tablas descriptivas junto con la elaboración de maquetas realizadas a escala para visualizar los procesos de despliegue correspondientes y presentar como proyección investigativa la viabilidad constructiva de las superficies desplegadas presentadas.

El análisis e investigación de geodésicas desplegadas se describe más exhaustivamente en las propuestas realizadas por Escrig publicadas en los textos de arquitectura de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, *Arquitectura Transformable* [13], aquí él propone sistemas de geodésicas desplegadas a partir de tijeras con barras rectas y con módulos triangulares (figura 3.96). Su exploración lleva a la construcción de un prototipo a escala que demuestra su viabilidad, la necesidad de adaptar las barras y la existencia de las incompatibilidades ya mencionadas [25] (figura 2.28 y 3.75).

A continuación se presenta la configuración de una superficie sinclástica a partir de módulos triangulares (Tabla 3.15), basada en un prototipo realizado por Escrig [25], esta agrupación se compone de tres brazos desplegables (figura 3.97).

La base geométrica corresponde a remplazar las caras de un tetraedro por semiarcos desplegables configurados a partir de la agrupación de módulos triangulares (figura 3.49), que coincide con la agrupación descrita en la tabla 3.5. Los módulos triangulares están compuestos de una tijera con articulación central y dos tijeras con articulación excéntrica (figura 3.98), pero en este caso, para generar la doble curvatura, los arcos se posicionan en tres direcciones diferentes, similar a un trípode, donde los semiarcos rotan sobre si mismos a través de un eje vertical central a la geometría del tetraedro.

Esta agrupación conduce al estudio de varias estrategias de diseño, que son fundamentales para el desarrollo de bóvedas y domos desplegables a proponer en esta investigación.

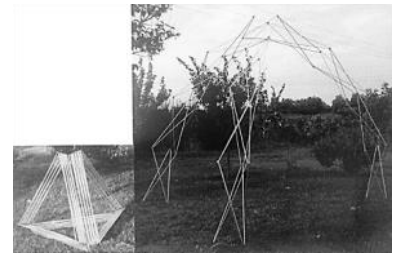


Figura 3.97 Desplegable sobre las caras de un tetraedro [25].

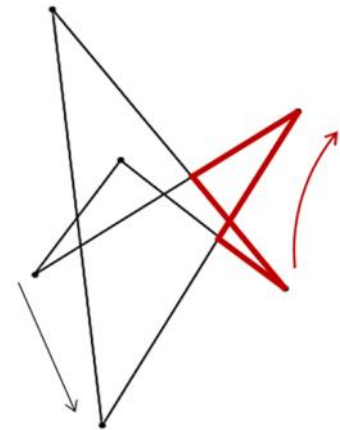
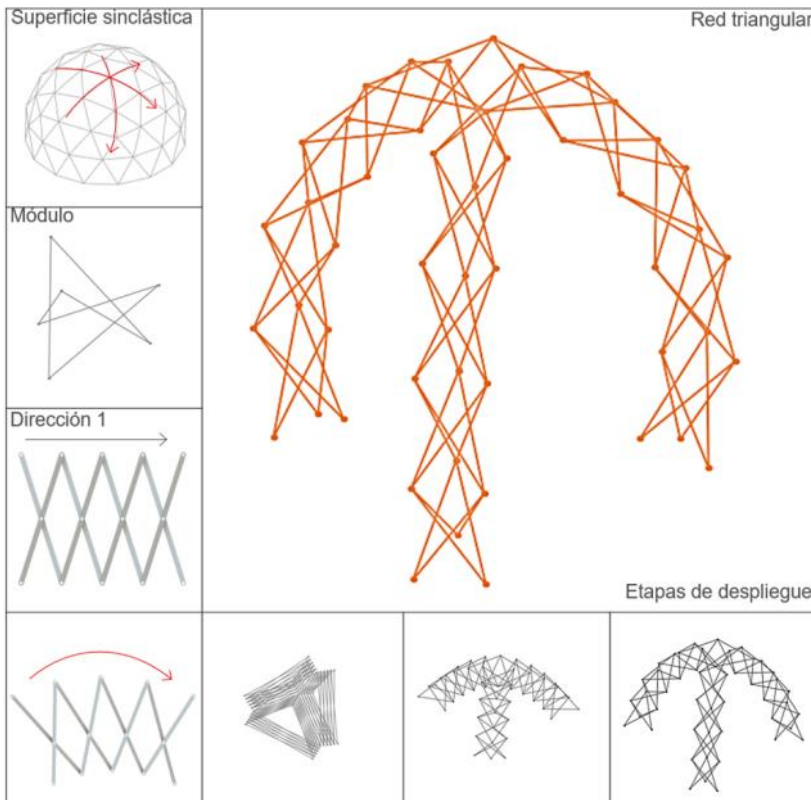


Figura 3.98 Módulo triangular. Una tijera con articulación central y dos tijeras con articulación excéntrica.

Fuente: Elaboración del autor

Tabla 3.15 Superficie sinclástica. Agrupación de tijeras rectas. Tijeras con articulación central y excéntrica. Red triangular.

Fuente: Elaboración del autor



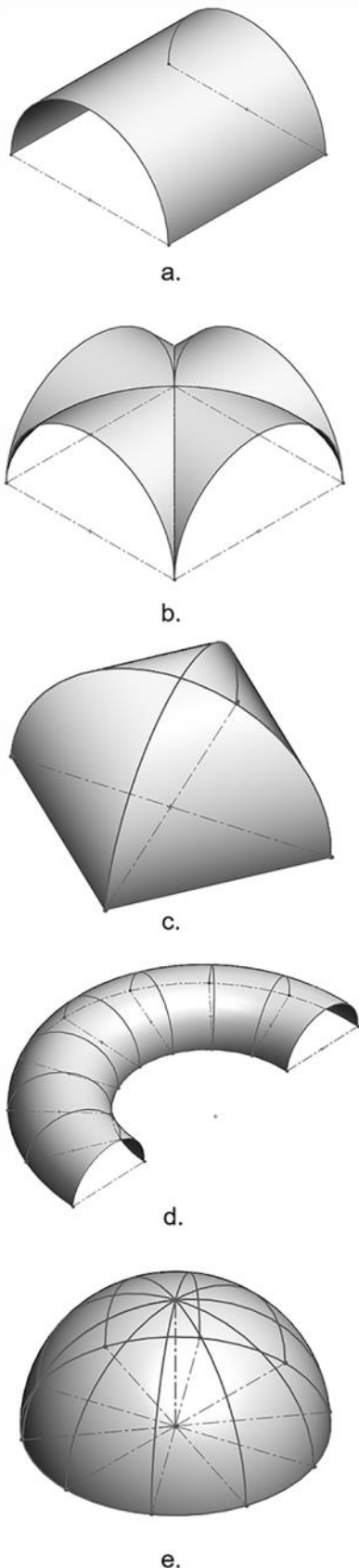


Figura 3.99 Tipos de Bóveda.

- a) Bóveda de cañón
- b) Bóveda de arista
- c) Bóveda esquifada
- d) Bóveda anular
- e) Domo o cúpula

Fuente: Elaboración del autor

Con la definición del arco plano como módulo estructural principal, que se repite a partir de una directriz rotacional o lineal, es posible explorar nuevas alternativas de superficies desplegadas donde la superficie es definida por arcos limitantes y no por la agrupación de múltiples módulos de tijeras.

Si se retoma los principios de la conformación de los diferentes tipos de bóveda, se encuentran otras posibilidades espaciales para extrapolarlas a las superficies desplegadas (figura 3.99).

La figura 3.99 a, analizada y representada en el apartado 3.2.2.1 corresponde a las superficies de simple curvatura, llamada comúnmente bóveda de cañón, esta superficie es generada por una generatriz semicircular y una directriz recta, las superficies faltantes representadas en la figura 3.99, se exponen en las tablas 3.16 a 3.19 para completar el repertorio de las posibles superficies desplegadas a partir del STT, proponiendo como módulos principales arcos planos, pero que también son factibles de remplazarlos por arcos desplegados conformados por agrupación de módulos triangulares o cuadrangulares.

c) Geometría a partir de la configuración de bóvedas

Bóveda de arista

Esta superficie es formada por la intersección perpendicular de dos bóvedas de cañón (figura 3.99 b). Su interpretación como superficie desplegable consiste en remplazar los arcos que definen el perímetro de la superficie por agrupaciones de tijeras con articulación excéntrica que configuran los arcos desplegados (tabla 3.16).

La superficie es definida al incorporar una membrana continua con el correcto patronaje para para generar la geometría deseada.

Bóveda esquifada

Consiste en el cruce perpendicular de dos arcos en la cúspide de los mismos, generando una planta cuadrada y una superficie que genera cuatro triángulos curvos. La propuesta como superficie desplegable consiste en remplazar los dos arcos por la agrupación de módulos de tijeras con articulación excéntrica, enlazados perpendicularmente en la parte central de cada arco, para responder a la geometría de la bóveda esquifada (Tabla 3.17)

Tabla 3.16 Superficie sinclástica. Agrupación de tijeras rectas. Tijeras con articulación excéntrica. Bóveda de arista.

Fuente: Elaboración del autor

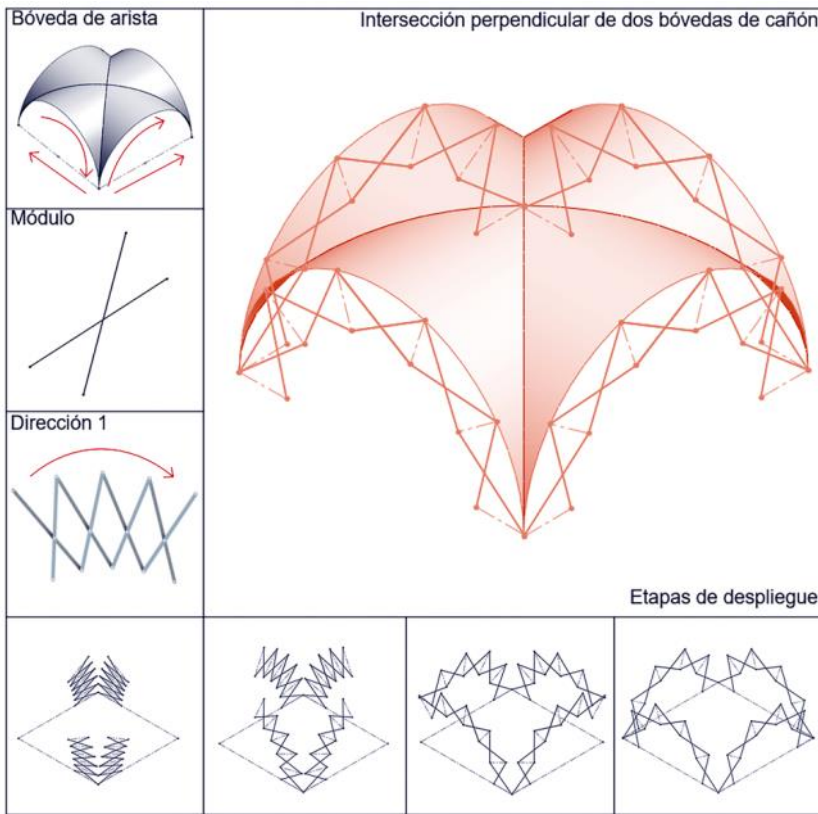
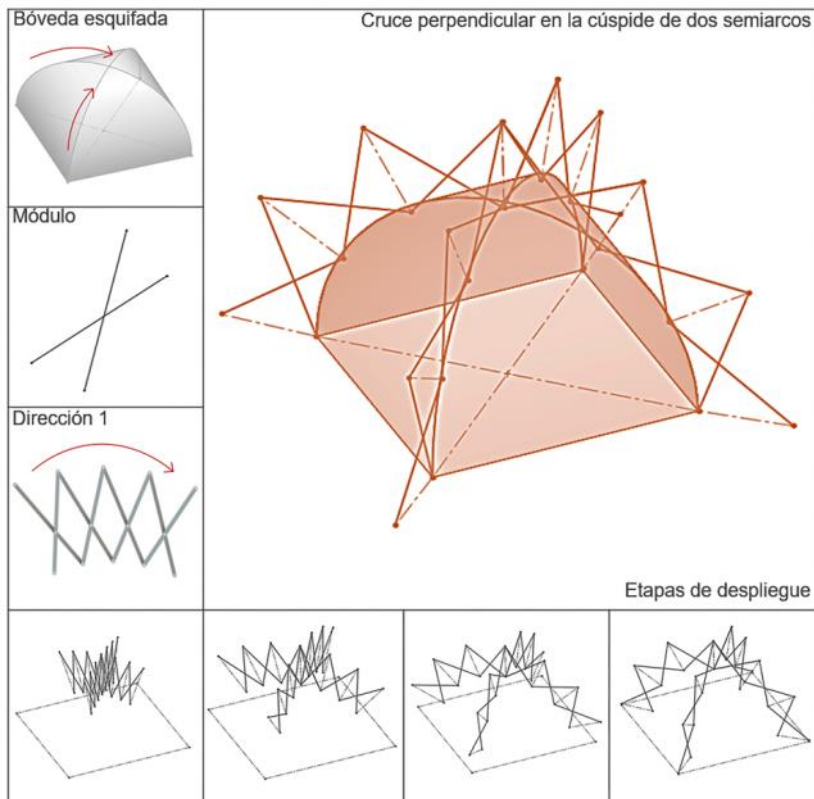


Tabla 3.17 Superficie anticlástica. Agrupación de tijeras rectas. Tijeras con articulación excéntrica. Bóveda esquifada.

Fuente: Elaboración del autor

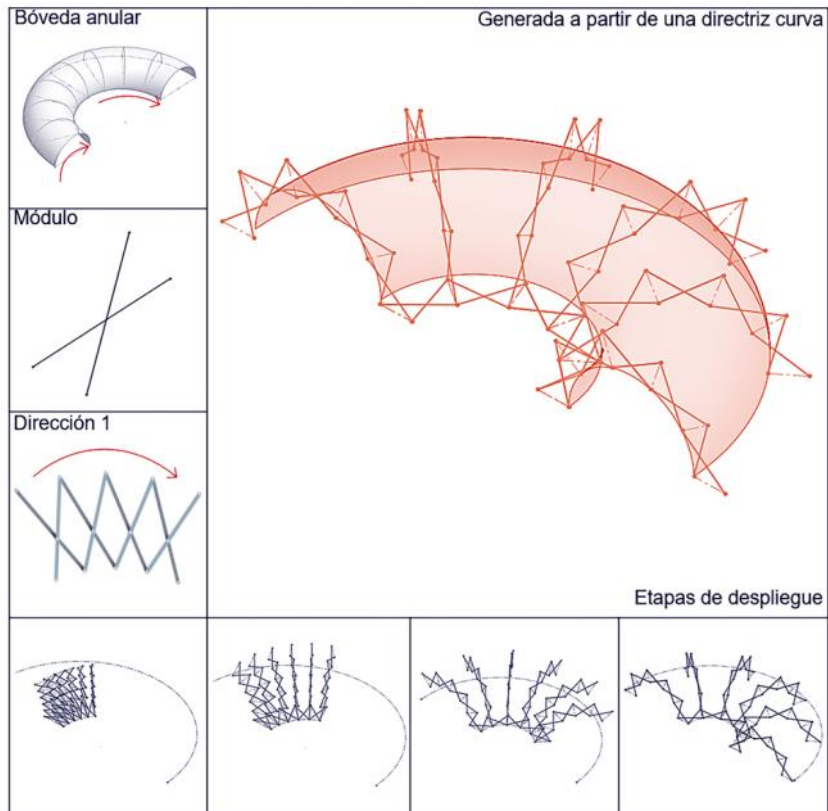


Bóveda anular

Generada a partir de una generatriz de un arco que se desplaza sobre dos directrices curvas concéntricas, la superficies resultantes, según la longitud de las directrices, son secciones de la superficie de revolución correspondiente al toroide.

Para su interpretación como una superficie desplegable, se parte de agrupaciones de módulos de tijera con articulación excéntrica que definan los arcos planos desplegables, simulando la geometría de la generatriz. Cada módulo de arco va enlazado en planta y a su correspondiente base, a un módulo de tijera que hace parte de un arco desplegable, posicionado de tal manera que describa en planta el despliegue según la directrices de la bóveda anular (tabla 3.18).

Tabla 3.18 Superficie anticlástica. Agrupación de tijeras rectas. Tijeras con articulación excéntrica. Bóveda anular. Fuente: Elaboración del autor



Bóveda esférica. Domo

Esta superficie es formada por un arco generatriz que gira alrededor de su eje vertical. Según la geometría de arco es posible obtener superficies de revolución que describan cúpulas semiesféricas, elipsoides o paraboloides. Para el caso de estudio, la proyección como superficie desplegable consiste en semiarcos desplegables, que constituyen los ejes meridionales del domo, tal como se observa que en la agrupación desarrollada por Escrig [25] (tabla 3.15), donde se evita proponer una superficie continua de tijeras, es decir, con menos elementos es posible delimitar un espacio que describa una superficie sinclástica, complementando la espacialidad con cerramientos acordes a las estructuras desplegables como membranas arquitectónicas (figura 2.169).

Partiendo de esta premisa, es posible retomar los arcos planos como ejes meridionales estructurales (figura 3.39 y 3.40), aunque no tendrán la misma estabilidad que proporciona el módulo triangular, si que la estructura será más liviana, ya que se procede a eliminar barras y evitar la complejidad del diseño de los nodos específicos en todos los enlaces de tijeras. También se ha de mencionar que en la mayoría de las superficies sinclásticas vistas en este apartado, simulan un proceso de despliegue donde hay que elevar el centro de la agrupación para proceder a las etapas finales del despliegue y que la estructura, por peso propio, llegue a su posición final.

Precisamente esta agrupación (tabla 3.15) lleva a plantear el proceso inverso de despliegue. En vez de elevar la estructura para que se despliegue, se propone que los arcos se desplieguen desde el suelo y la conexión en la cúspide, corresponde a la posición final de despliegue (figura 3.100), una alternativa que puede optimizar los procesos de montaje y desmontaje.

Esta propuesta se desarrolla a nivel conceptual en el estudio que precede esta investigación, descrita en el apartado 1.6 y que en la presente tesis se enfoca en el desarrollo de propuestas viables para domos desplegables. Pero, para llevar esta investigación al planteamiento de un método geométrico para la búsqueda de la forma, se generan los siguientes cuestionamientos. ¿Cómo se halla la altura estimada en relación con la apertura de los semiarcos plateados? ¿Cuántos módulos de tijeras son necesarios? ¿Qué apertura requieren las tijeras? ¿Cómo se define la posición final del despliegue?.

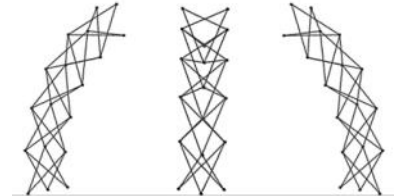
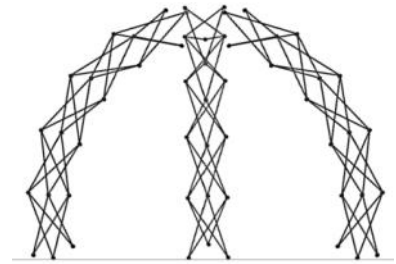


Figura 3.100 Proceso de despliegue agrupación de tijeras con articulación excéntrica. Superficie anticlástica. Fuente: Elaboración del autor

Hasta este momento la investigación se ha centrado en la morfología de superficies desplegadas a partir del STT, señalando el módulo a utilizar y la forma de agrupación, representado en maquetas y modelos digitales, junto con las posibles alternativas de despliegue para disminuir los esfuerzos de flexión y torsión en las barras; pero no se ha detallado en la relación de cantidad y longitud específica de las barras, para obtener una altura libre deseada en las superficies descritas del presente capítulo.

Las tablas descriptivas de superficies curvas (tablas 3.5 a 3.18) exponen las etapas de despliegue de las diferentes configuraciones de superficies de simple curvatura y sinclásticas, a través de una barra estándar y la agrupación básica de módulos para obtener alguna espacialidad, dando a entender que la máxima apertura de las agrupaciones o posición final de despliegue, sucede cuando al desplegar la superficie, los extremos o uno de los extremos de la agrupación llega de forma coplanar al terreno o limita con este y se forma la espacialidad.

De esta forma la tabla 3.19 describe y propone una última agrupación que desarrolla un nuevo concepto de despliegue para configurar superficies sinclásticas. Esta superficie desplegable incorpora arcos planos como ejes meridionales, los cuales se elevan desde el suelo y se juntan en la cúspide, siendo esta, la posición final de despliegue y la posición que garantiza la estabilidad de la estructura total.

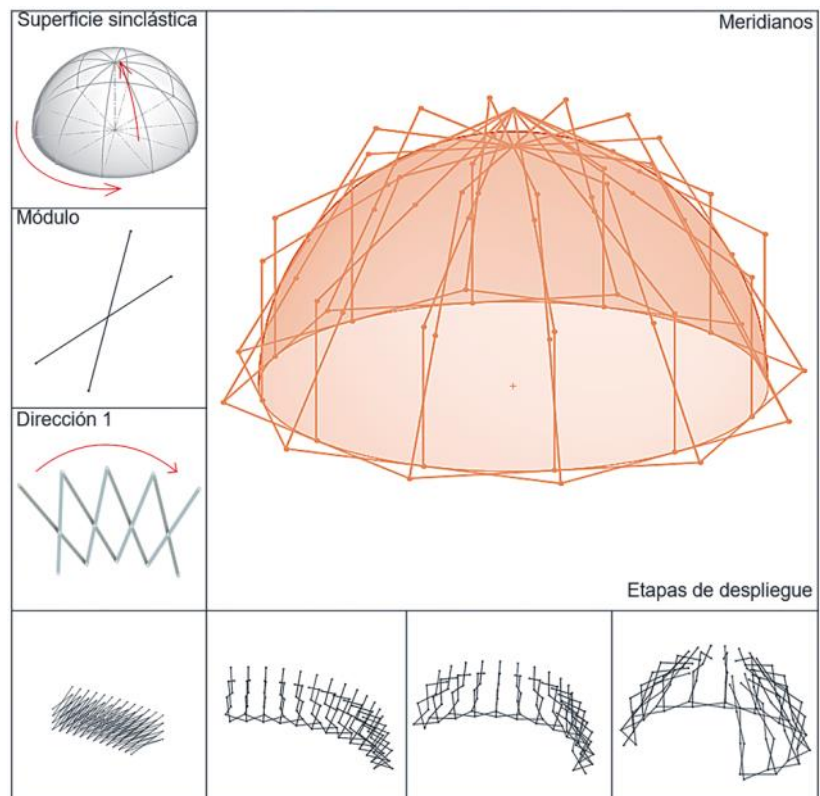


Tabla 3.19 Superficie sinclástica. Agrupación de tijeras rectas. Tijeras con articulación excéntrica. Superficie a partir de la bóveda esférica.

Fuente: Elaboración del autor

3.3 Conclusiones

El presente estudio determina las posibilidades espaciales, para configurar agrupaciones desplegadas a partir del sistema tipo tijera, determinando las superficies a desarrollar (plana, simple, sinclástica y anticlástica) configuradas a partir de redes cuadrangulares y triangulares.

La investigación establece las condiciones de geométricas y posicionamiento entre módulos de tijeras para obtener un despliegue determinado, ya sea despliegue lineal, despliegue con curvatura constante o despliegue con curvatura variable, cumpliendo con la condición indispensable de plegado entre módulos de tijeras, determinada por la ecuación $a + b = c + d$, relacionada con los tramos de barras generados a partir de la articulación central y el enlace con el módulo de tijera adyacente (figura 3.3).

El estudio se limita solo a la aplicación y análisis de tijeras con barras rectas procurando que sean de la misma longitud, descartando las tijeras anguladas. De esta forma se procede a exponer los resultados de la exploración geométrica y fabricación de modelos a escala de superficies desplegadas, a través de tablas descriptivas que sintetizan la información básica para comprender y desarrollo una superficie específica: Tipo de superficie, tipo de módulo tijera, tipo de despliegue en la dirección (x) y tipo de despliegue en la dirección (y).

Los resultados obtenidos de las superficies, básicamente dependen del posicionamiento de la articulación entre barras de una tijera. De esta forma es posible configurar una agrupación plana de tijeras con un despliegue lineal, cuando la articulación entre barras se posiciona en el centro del eje longitudinal.

En cambio, cuando la articulación se posiciona sobre el eje longitudinal pero descentrada, se denomina articulación excéntrica. Agrupando los módulos de tijera de tal manera que se posicionen los tramos cortos resultantes de la articulación excéntrica, apuntando hacia el centro de la curvatura a trazar, se obtiene un despliegue con curvatura variable.

Se determina que para configurar superficies planas desplegadas, ambas directrices, se componen de agrupaciones de módulos de tijeras con articulación central, lo que genera un despliegue lineal en ambas direcciones. Son superficies que no presentan incompatibilidad en su proceso de despliegue.

Las superficies desplegadas de curvatura simple, se determinan a través de la agrupaciones tijeras rectas con articulación central que generan un despliegue lineal en una dirección. Y el enlace en la segunda dirección, con agrupaciones de tijeras con articulación excéntrica posicionando los tramos cortos generados hacia el mismo sentido, correspondiente hacia el interior de la curva generada. Son superficies que no generan incompatibilidades en su proceso de despliegue, si se garantiza la correcta posición entre módulos para obtener la curvatura, además la tipología de recorrido del despliegue describe una curvatura variable, una extensión a tener en cuenta, si la superficie se realiza en espacios reducidos.

Las superficies anticlásticas, conformadas con agrupaciones de tijeras con articulación excéntrica en ambas direcciones, se configuran al posicionar en sentido contrario, las dos curvaturas generadas. Se concluye que este tipo de superficies desplegadas generan incompatibilidades en su proceso de despliegue, ya que la extensión descrita como curvatura variable, es bloqueada por la agrupación de tijeras del otro sentido.

El comportamiento es similar en las superficies sinclásticas, donde las agrupaciones de tijeras con articulación excéntrica se posiciona de tal manera para obtener el trazado de la curvatura en el mismo sentido. El proceso de despliegue presenta nuevamente incompatibilidades, representadas en las simulaciones resultantes como alargamiento de la barras, sobreposición entre barras y flexión de barras.

Aunque estudios referentes realizados con anterioridad por diversos autores, ya han dado a conocer este comportamiento en este tipo de superficies desplegadas y se han propuesto soluciones técnicas como eliminación de módulos de tijera, barras telescópicas y conexiones complejas con varias articulaciones, la investigación propone la configuración de nuevas superficies desplegadas con curvatura a través de la generación de arcos planos desplegados, que se repiten a partir de una directriz rotacional o lineal, donde la superficie es definida por arcos limitantes y no por la agrupación de múltiples módulos de tijeras.

Se representa en la figura 3.101 el resumen de las superficies desplegadas analizadas en el presente capítulo, tomando como componente principal la agrupación de módulos cuadrangulares, módulos triangulares y módulos de arcos planos como generatriz que se desplazan sobre directrices rectas o curvas, para formar distintas espacialidades a través del STT, incorporando barras de la misma longitud o con el menor número de barras de diferente longitud; resaltando en rojo, la superficie a desarrollar y analizar en los siguientes capítulos.

Es importante mencionar que esta interpretación y clasificación de superficies resultantes esta abierta a nuevas aportaciones y continúa en proceso de exploración de nuevas y múltiples configuraciones que seguramente generará más alternativas de superficies desplegadas.

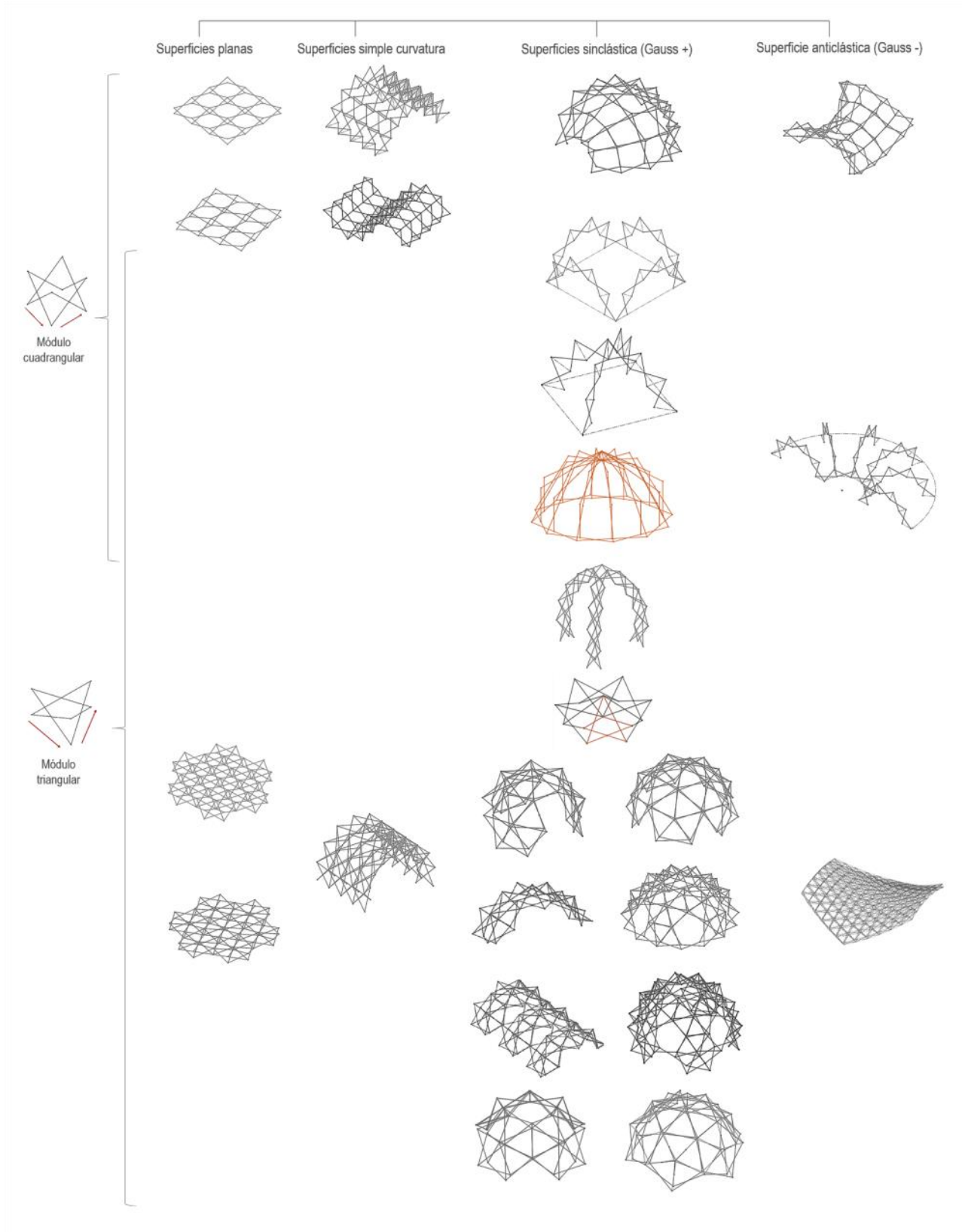


Figura 3.101 Clasificación superficies desplegables STT. Fuente: Elaboración del autor



4

CAPÍTULO

MÉTODOS EXISTENTES PARA CONFIGURAR ARCOS Y SUPERFICIES DESPLEGABLES

El presente capítulo describe los métodos geométricos más representativos para generar superficies curvas utilizados por los principales autores en estructuras desplegadas, los cuales han desarrollado aplicaciones utilizando el sistema tipo tijera e incorporando únicamente barras rectas para proponer espacialidades como domos, geodésicas, bóvedas de cañón o similares.

Cada uno de los autores analizados interpreta la búsqueda de la forma de la superficie a desarrollar a través de métodos geométricos distintos que se exponen a continuación, dando a conocer los diferentes procesos de diseño que se consideran en cada caso y puedan aportar a la investigación.

El objetivo es analizar los procedimientos que son referentes para proponer y justificar una metodología de diseño que pueda definir la cantidad de módulos requeridos, la longitud de la barra y posicionamiento de la articulación central necesario para configurar arcos desplegados específicos.

Capítulo basado en el artículo *Deployable Arches Based on Regular Polygon Geometry* [92].

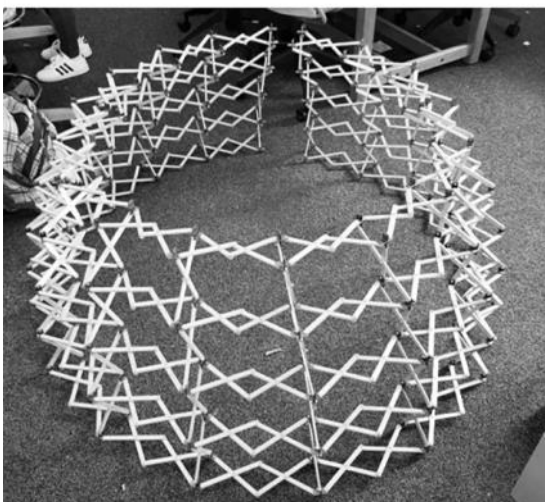
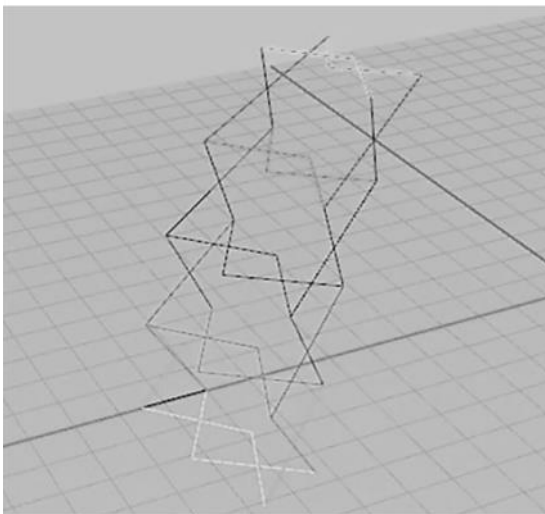
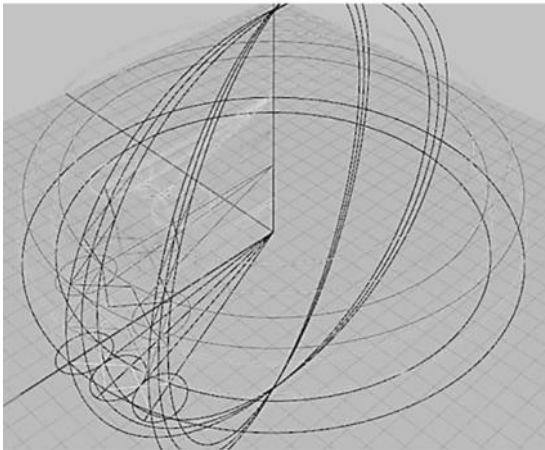
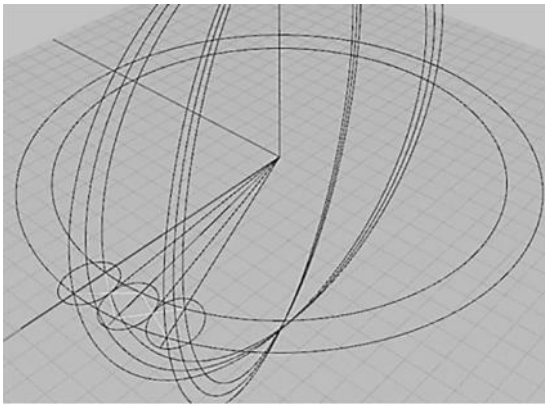


Figura 4.29 Definición de tijeras de un casquete de esfera a partir del trazado geométrico de elipses [114].

Contenido capítulo

4.1 Método Emilio Pérez Piñero.....	194
4.2 Método Félix Escrig	196
4.3 Método Gantes	200
4.4 Método Sánchez Cuenca.....	201
4.5 Método Temmerman	203
4.6 Método Negar Kalantar	206
4.7 Método Babaei	208
4.8 Conclusiones	209

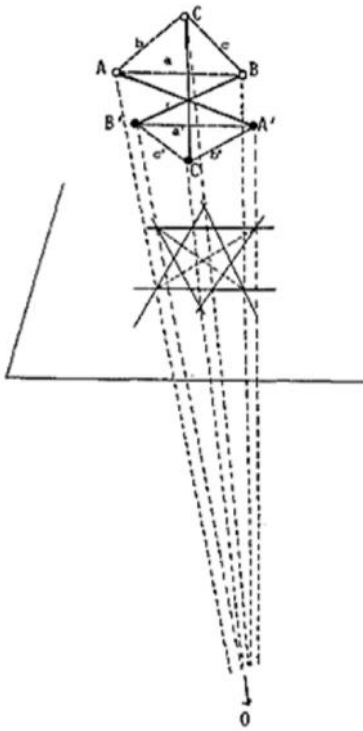


Figura 4.1 Proyección de redes triangulares. Configuración módulo de haces Emilio Pérez Piñero [71].

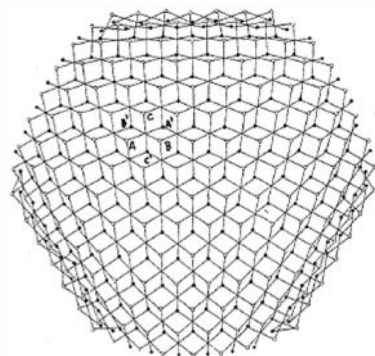


Figura 4.2 Arriba. Esquema planta agrupación de módulos de aspas.

Abajo. Maqueta a escala [71].

4.1 Método Emilio Pérez Piñero

Como primer referente a los métodos de diseño para la búsqueda de la forma en superficies desplegadas con curvatura, Emilio Pérez Piñero, pionero en la aplicación de las estructuras desplegadas en la arquitectura, desarrolla metodologías de diseño basadas en la proyección de retículas para formar módulos de aspas.

Puertas del Río [71] describe los diferentes procedimientos estudiados y aplicados por EPP, su análisis permite retomar conceptos básicos para la formulación de superficies desplegadas.

Retícula de doble triángulo

Consiste en la proyección de dos redes triangulares a la superficie de dos esferas concéntricas a través de rectas que parten de un único polo. El módulo de aspas se visualiza como dos pirámides, una de ellas invertida, que coinciden en un vértice, el cual corresponde a la articulación central y las barras corresponden a las aristas de dichas pirámides (figura 4.1).

En los primeros esquemas se generan barras de diferentes longitudes y un complejo diseño de nodos específicos para su correcto funcionamiento. La longitud de la barra depende del tamaño de la red inicial de triángulos y así mismo dependerá la localización de la articulación central entre barras.

La apertura del módulo depende de la distancia entre superficies y se intuye que EPP propone esta distancia en la posición final del despliegue, ya que en sus modelos construidos se observa que el módulo de aspas alcanza una apertura similar o igual a los esquemas iniciales (figura 4.2).

El amplio desarrollo técnico de este sistema, con barras más homogéneas y nodos idóneos, genera aun hoy en día, uno de los principales aportes en el desarrollo de cubiertas desplegadas.

Otros procedimientos relacionados con el sistema tipo tijera de EPP refieren al mismo método de proyección de retículas cuadradas y triangulares.

Redícula de cuadrados

Al igual que el método anterior se parte de la proyección de una redícula, en este caso de cuadrados a dos superficies esféricas concéntricas. El módulo de tijeras se forma al proyectar rectas que parten de un único punto central y cruzan en los vértices de dos planos paralelos trasladados a las superficies. La unidad de tijera se define al trazar las diagonales de los trapecios resultantes y la articulación central corresponde al punto de intersección entre diagonales y la curva establecida (figura 4.3 a)

Redícula de triángulos rectángulos

Se basa en la misma proyección de una redícula cuadrada a dos superficies esféricas concéntricas, pero se proyecta adicionalmente un plano que marca la diagonal en el módulo tridimensional, este se reemplaza por dos módulos de tijera, articuladas entre ella por sus tramos cortos. En este caso la unidad tendrá más barras de diferentes longitudes (figura 4.3 b)

Redícula de triángulos equiláteros

Aquí utiliza uno de los métodos más usuales para generar geodésicas patentado por Fuller [29], que parte de la subdivisión de los triángulos y apoyado con el mismo proceso que los casos anteriores, Piñero traslada los vértices de los triángulos equiláteros a las superficies esféricas generando la unidad base con tres módulos de tijeras logrando mayor uniformidad entre barras y estabilidad estructural (figura 4.3 c)

En el desarrollo del mecanismo, EPP se encuentra con las incompatibilidades descritas anteriormente en la agrupación de módulos triangulares (figura 3.74 y 3.75), se reitera en la necesidad de incorporar estrategias técnicas para el correcto proceso de despliegue en este tipo de estructuras (barras extensibles o telescópicas, nudos deslizantes, posible eliminación de barras o flexión de barras) [71].

Cabe mencionar un último procedimiento más sencillo, que consiste en dividir la generatriz de curvas equidistantes en partes iguales, a través de radios que parten de un punto central. El resultado es un módulo cuadrangular de tijeras que se puede adaptar con tijeras de articulación central o excéntrica para obtener el despliegue requerido (figura 4.4) (Ver capítulo 3).

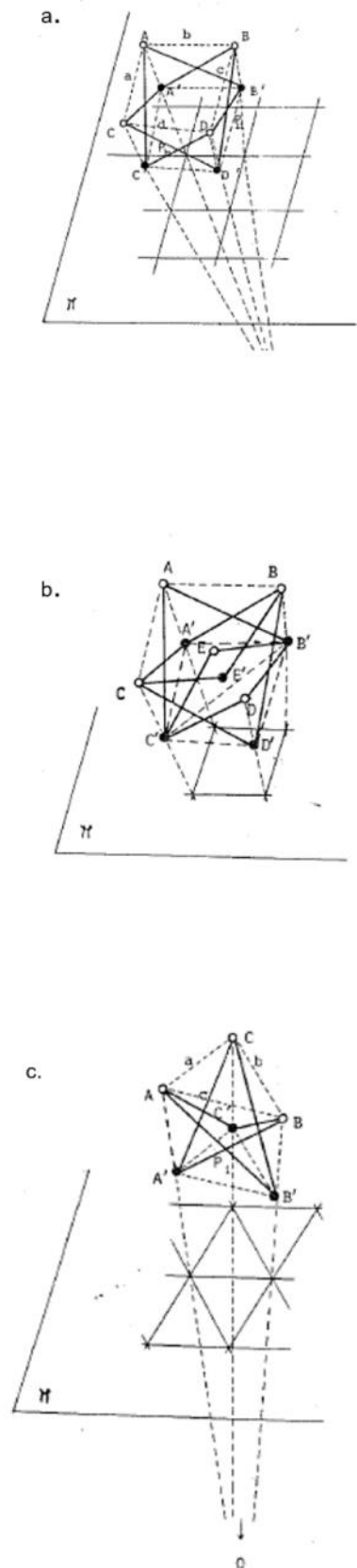
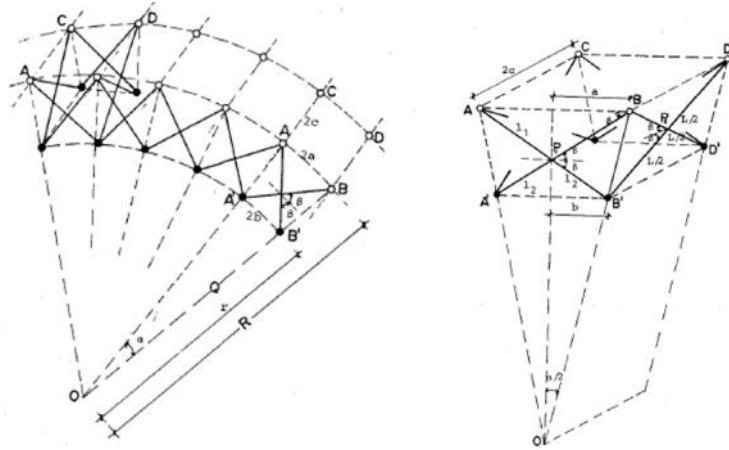


Figura 4.3 Método geométricos EPP.
a) Redícula de cuadrados.
b) Redícula de triángulos rectángulos.
c) Redícula de triángulos equiláteros [71]

Figura 4.4 Método EPP.
División de curvas equidistantes en partes iguales [71].



En todos los casos, la determinación geométrica de la estructura general y de las características de la barra, depende de la dimensión de la retícula que define la longitud de la barra, la posición de la articulación central y la disposición de las tijeras en el estado final de despliegue.

4.2 Método Félix Escrig

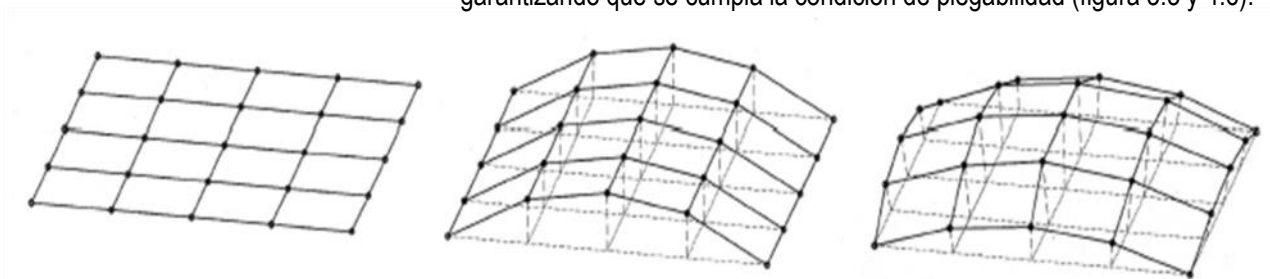
Félix Escrig junto con José Sánchez y Juan Pérez Valcárcel desarrollaron propuestas con estructuras desplegables principalmente en la aplicación de cubiertas. Los procedimientos utilizados para obtener superficies curvas y definir la longitud de la barra fueron cambiando según la experiencia de cada propuesta.

Un primer procedimiento consiste en trazar una red cuadrangular ficticia y con líneas perpendiculares que varían en altura, según las curvas generatriz trazadas en cada uno de los sentidos de despliegue (figura 4.5). Para dibujar las tijeras, se establece los siguientes criterios para su generación [24]:

Los puntos "C", serán los puntos de articulación central de la tijera y se localizan sobre la superficie generatriz trazada arbitrariamente.

A partir de un centro proyecta radios que se cruzan con los puntos "D", que son los puntos de cruce de la retícula. Sobre esta línea radial se posicionan los puntos de articulación extrema de las barras de las tijeras, garantizando que se cumpla la condición de plegabilidad (figura 3.3 y 4.6).

Figura 4.5 Método Félix Escrig.
Proyección de red cuadrangular a una curva generatriz [24].



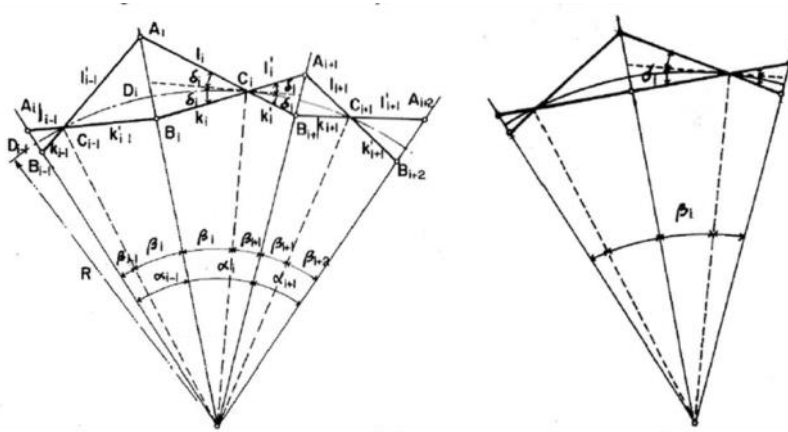


Figura 4.6 Método Félix Escrig. Configuración de tijeras sobre una curva generatriz [24]

Otro método consiste en proyectar puntos sobre la esfera desde un polo arbitrario y generando la tijera como en el caso anterior. Escrig señala un punto estratégico, cerca del polo inferior de la circunferencia, donde la geometría resultante de cúpulas rebajadas contiene barras con longitudes similares [25] (figura 4.7).

Un siguiente método es a partir de la geometría de los poliedros regulares. Es este caso corresponde al diseño de un pabellón portátil que parte de un rombicuboctaedro y que se adapta al uso de un stand. La geometría permite reemplazar cada arista por una tijera, logrando un conjunto perfectamente plegable y ligero, con barras de la misma longitud (figura 4.8).

Figura 4.7 Método Félix Escrig. Proyección de mallas planas sobre una superficie esférica para configurar geodésicas desplegables [25]

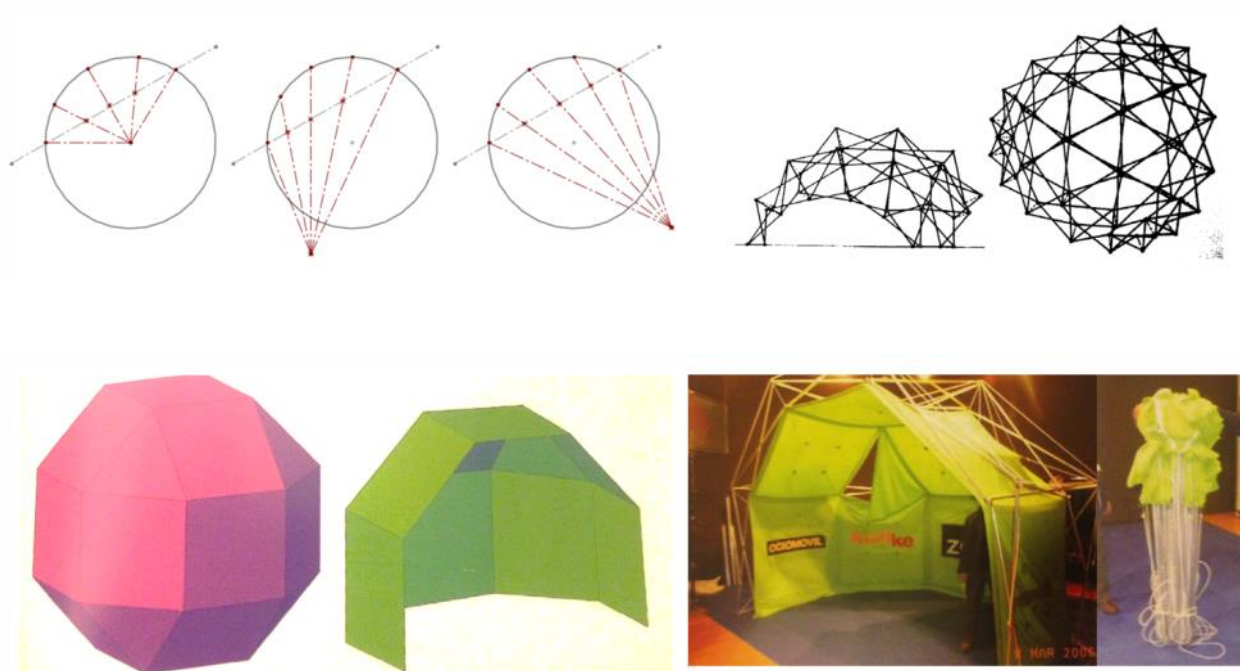


Figura 4.8 Método Félix Escrig. Pabellón portátil de exposiciones a partir de la geometría del rombicuboctaedro [25]

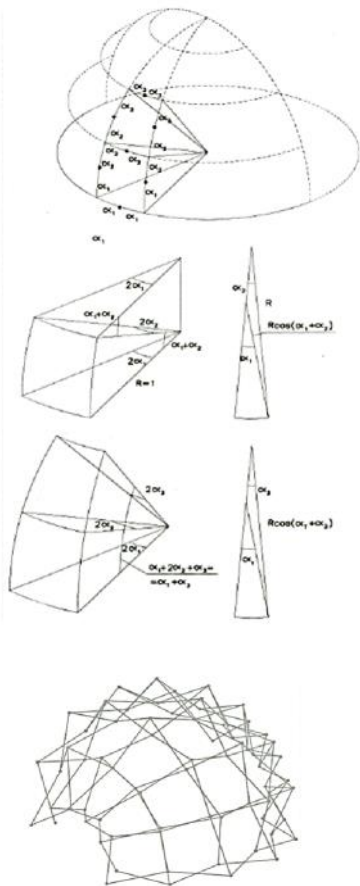


Figura 4.9 Método Escrig. División de la esfera por paralelos y meridianos. Esquema para la proyección de tijeras [23].

Un nuevo planteamiento, descrito en el capítulo anterior para configurar superficies desplegables con curvatura, corresponde a la división de la esfera en meridianos y paralelos (figura 3.39). Las condiciones geométricas proyectadas por Escrig para esta propuesta se visualizan en la figura 4.9, el objetivo es resolver en cada nudo las correctas condiciones de plegabilidad entre tijeras, en cada etapa del despliegue, implementando barras de diferentes longitud.

Llevado a la práctica, la construcción de esta agrupación resulto en un prototipo construido con una estabilidad estructural favorable [25] (figura 4.10)

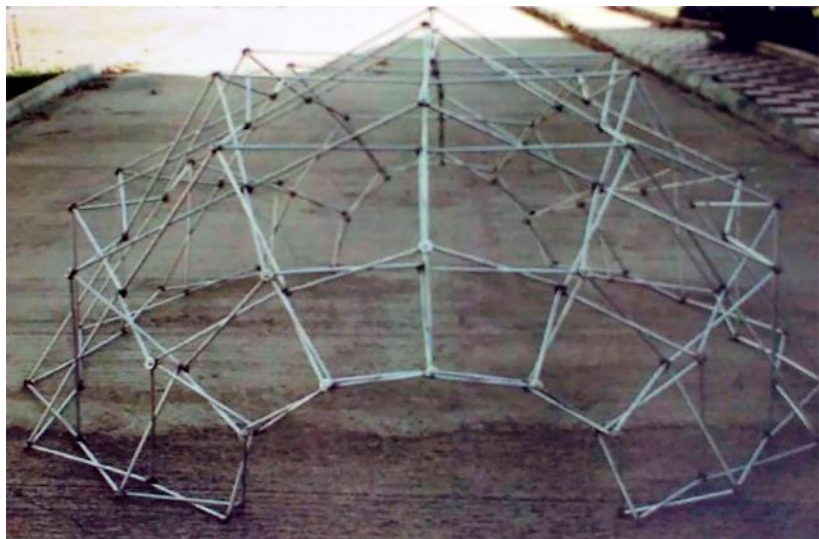


Figura 4.10 Prototipo en aluminio. División de la esfera por paralelos y meridianos [25]

Referente a la configuración de superficies con simple curvatura o superficies cilíndricas, Escrig enfatiza en la ventaja de poder utilizar barras de la misma dimensión para proyectar arcos desplegables, además esta tipología de agrupación permite generar cantos más reducidos, sin afectar los procesos de pliegue o despliegue de la estructura (figura 4.12), a diferencia de las superficies sinclásticas donde se debe cumplir la relación $\alpha=\beta$, si se sobrepasa esta relación la estructura ya no podrá plegarse [23] (figura 4.13).

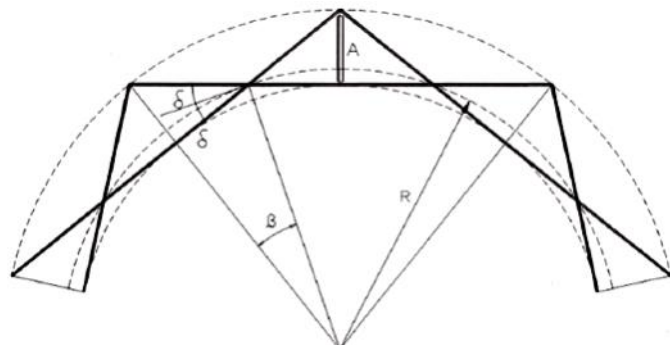


Figura 4.13 Condición geométrica de los ángulos para la etapa final de despliegue en superficies sinclásticas $\alpha=\beta$ [23].

Figura 4.12 Superficie desplegable con simple curvatura [23].



Un detalle que llama la atención en la geometría final representada en la figura 4.12, es la posición en horizontal de las barras inferiores, en las tijeras centrales que coinciden en la clave del arco. El número de módulos de tijeras, la excentricidad utilizada y ángulo de apertura, genera que el arco coincida en el punto más alto en un trazado similar a las cerchas tradicionales y a la configuración de una dovela central triangular.

En el capítulo cinco se retoma este concepto para definir la posición final de despliegue de arcos plegables, correlacionado con la cantidad de módulos de tijeras, posición de la articulación central y ángulo de apertura para obtener una geometría que mantenga dicha horizontalidad en los módulos de tijeras centrales del arco y la clave configure la forma geométrica de un triángulo isósceles al enlazarse dos módulos de tijeras en este punto (figura 4.14 b).

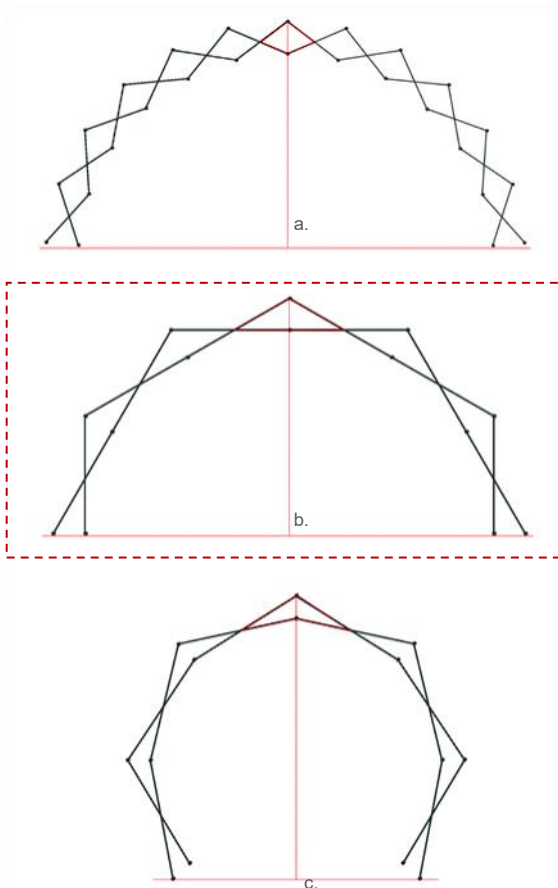


Figura 4.14 Alternativas de arcos desplegados. Definición de la geometría de la clave.
 a) Rombo.
 b) Triángulo isósceles.
 c) Deltoide cóncavo.
 Fuente: Elaboración del autor

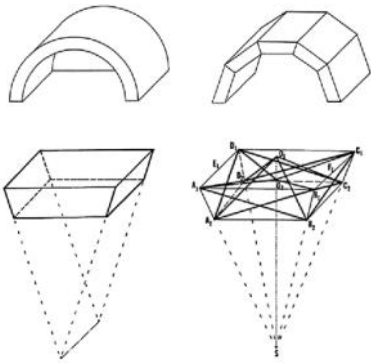


Figura 4.15 Arcos desplegables. División por dovelas [30].

4.3 Método Gantes

En su tesis doctoral [30], el autor proyecta una bóveda de cañón, seccionada en cinco dovelas, en cada sección de dovela representada geoméricamente como una pirámide truncada, reemplaza las caras laterales por módulos de tijera e incorpora adicionalmente dos tijeras en la diagonal de la unidad (figura 4.15). La exploración en la agrupación de estas unidades genera la configuración de arcos consecutivos linealmente que forman bóvedas de cañón y domos desplegables al conectar dos arcos perpendicularmente (figura 4.16)

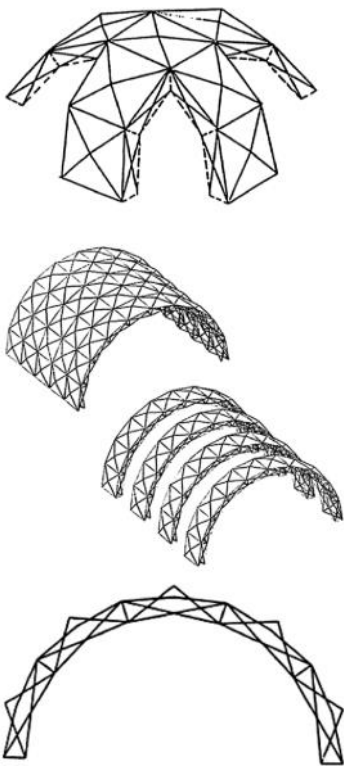
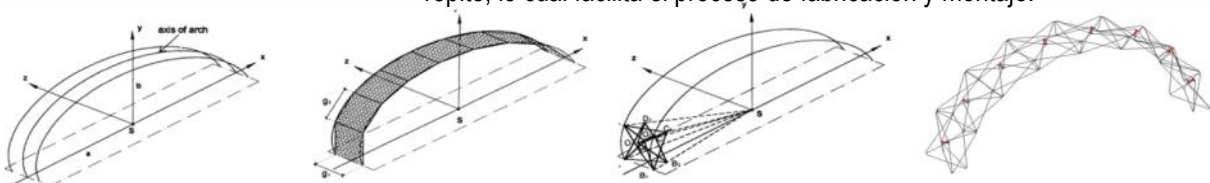


Figura 4.16 Agrupación de arcos desplegables. Configuración de domos y bóvedas de cañón [30].

La posición final del arco desplegable contiene las cinco unidades de dovelas iniciales, siendo la unidad central la que funciona como clave y el ángulo de apertura de las tijeras o etapa final de despliegue, debe coincidir con la llegada coplanar al terreno de una de las caras laterales del prisma truncado.

Un nuevo planteamiento de Gantes y Konitopoulou [31] desarrolla una metodología de diseño geométrico de arcos de despliegue de curvatura arbitraria, el procedimiento es aplicado en un arco semielíptico donde genera el diseño de unidades individuales, similares al caso anterior. El método parte de proyectar una elipse, la cual será el eje del arco. A continuación considera dos elipses equidistantes de la elipse-eje y crea una superficie superior arqueada que divide en ocho segmentos iguales (figura 4.17). La unidad de tijeras se define a partir del cruce de las líneas que parten del centro de la elipse y cruzan con los puntos de inicio de las elipses equidistantes y el punto de unión entre el siguiente segmento adyacente, que marca la posición de la siguiente dovela. La distancia que utiliza para las dos elipses equidistantes, define la apertura máxima de las tijeras.

Figura 4.17 Arco semielíptico desplegable [31].



El estudio permitió generar una aplicación que propone nuevas geometrías de arcos desplegables a partir de curvas elípticas, la construcción del prototipo a escala confirma su adecuado comportamiento estructural y las ecuaciones planteadas, aunque se implementan barras de diferente longitud, el diseño cuenta con la unidad modular que se repite, lo cual facilita el proceso de fabricación y montaje.

4.4 Método Sánchez-Cuenca

Luis Sánchez-Cuenca propone modelos geométricos en el STT para asegurar un proceso de despliegue adecuado y compatible en todas las etapas de despliegue. Sus procedimientos consisten en expresar gráficamente una sucesión de tijeras que se relacionan según el trazado de círculos y elipses, siempre garantizando la condición de plegabilidad entre módulos de tijeras [74] (figura 3.3).

La figura 4.18 representa cuatro posibilidades de agrupación, configurando los módulos de tijeras a partir de la agrupación de círculos o elipses posicionados tangencialmente, sobre un eje guía (lineal o curvo).

En el primer caso (figura 4.18 a) el despliegue es lineal, cada tijera se traza a partir de la geometría de un círculo, el punto de la articulación central de dos tijeras consecutivas corresponde al centro de dos círculos que están posicionados tangencialmente y sobre un eje lineal horizontal. Y los extremos de la barras, se posicionan sobre la circunferencia del círculo correspondiente.

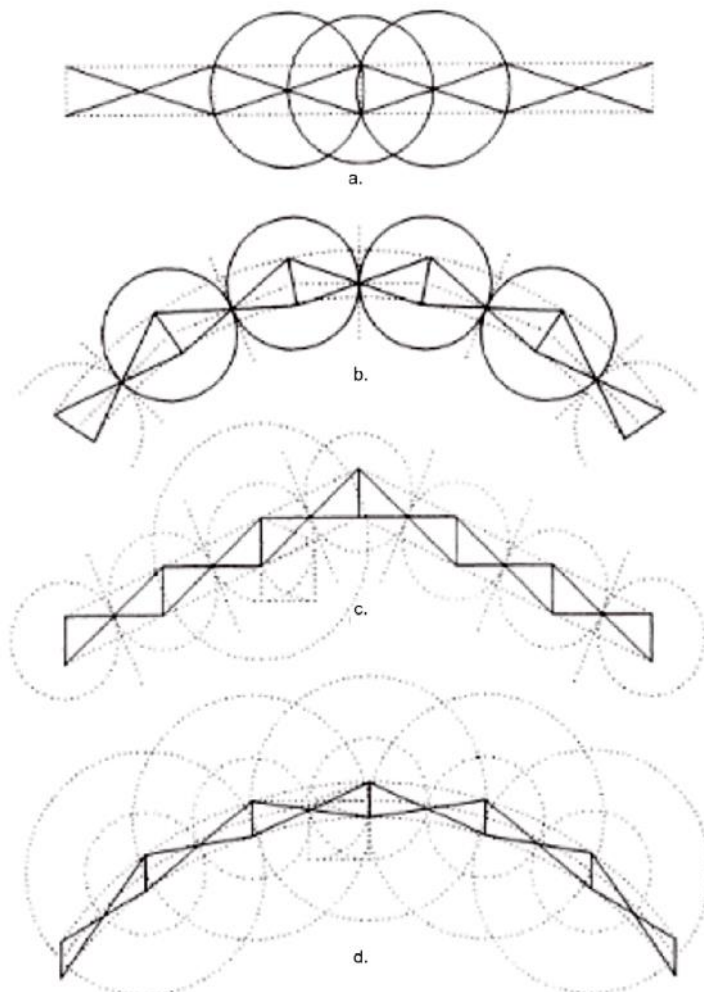


Figura 4.18 Método Sánchez-Cuenca. Configuración de tijeras a partir de círculos y elipses [74].

En el segundo caso (figura 4.18 b), corresponde a la agrupación de tijeras con articulación excéntrica, se mantiene el trazado de círculos tangenciales posicionados sobre un eje-arco, pero en este caso la articulación central se posiciona sobre el cruce del eje con el punto tangencial entre dos círculos consecutivos. Y los extremos de las barras se relacionan con su adyacente con una línea radial que se posiciona sobre el eje de cada círculo.

El siguiente esquema (figura 4.18 c) es trazado a partir de elipses posicionadas sobre un eje inclinado, la articulación central de las tijeras corresponde al punto de enlace tangencial entre dos elipses consecutivas pequeñas. Los focos de cada elipse trazan una línea vertical que establece los extremos de las barras. Se visualiza una elipse más grande, donde el eje, es el doble de la elipse pequeña, la intersección de la elipse grande con el segmento vertical consecutivo, establece el centro de la línea vertical que une los extremos de las barras de las tijeras consecutivas.

La figura 4.18 d, representa el procedimiento anterior pero utilizando la geometría de círculos en vez de elipses.

En los dos últimos casos, Sánchez-Cuenca denomina a esta tipología de tijeras como tijera traslacional e implica la utilización de barras de diferente longitud.

El proceso geométrico descrito es proyectado a una curva con tres centros y radios diferentes, garantizando la condición de plegabilidad, el resultado son dos curvas sinuosas plegables trazadas a partir de la relación de círculos tangenciales y otra versión a partir de elipses tangenciales (figura 4.19).

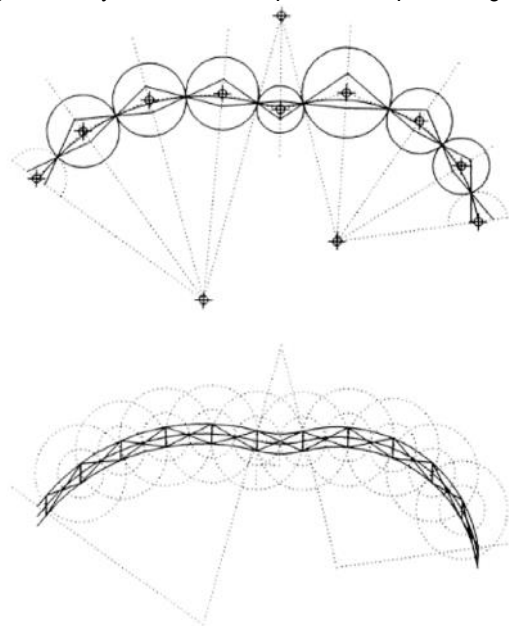


Figura 4.19 Configuración de una curva desplegable STT, con centros y radios diferentes a partir de círculos (superior) y elipses (inferior) [74].

4.5 Método Temmerman

De Temmerman [19] estudia dos tipologías de tijeras y sus posibles agrupaciones para configurar arcos desplegables, definidas como unidad de tijera polar y unidad de tijera traslacional formulada anteriormente por Sánchez-Cuenca [74] (figura 4.20).

En el caso de la unidad de tijera polar, el método geométrico para trazar esta tijera consiste en dividir una curva en segmentos iguales, a través de líneas radiales que parten del centro de la circunferencia base que define la curva inicial (figura 4.21).

Se procede a trazar una línea tangente a la curva y perpendicular a la bisectriz del ángulo que define el segmento (CM) y que determina el punto (C) como la articulación central de la tijera, siempre posicionado sobre la curva base. Los puntos (M) corresponden a los centros de los círculos que se posicionan tangencialmente para hallar la posición de la siguiente articulación central, correspondiente a la tijera adyacente, la apertura de la tijera es definida por la una distancia (t) proporcional a un canto de arco aceptable. El procedimiento se repite para seguir enlazando los siguientes módulos de tijeras y configurar la totalidad del arco desplegable (figura 4.21). También es posible configurar arcos desplegables con tijeras de diferente tamaños, si se divide la curva base en segmentos definidos por radios con ángulos diferentes (figura 4.22).

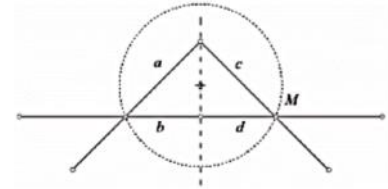
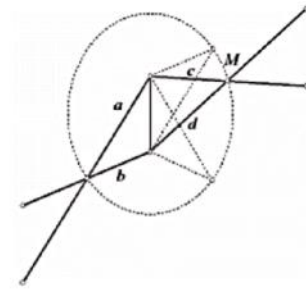


Figura 4.20 Tipologías de tijeras: Traslacional y polar [19]

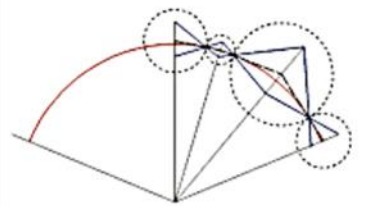
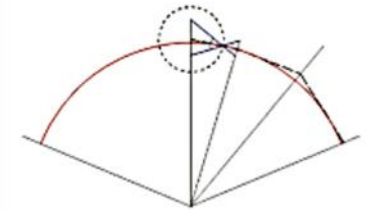
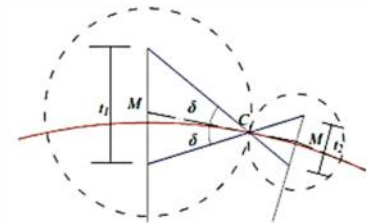


Figura 4.22 Método geométrico a partir de circunferencias tangenciales de diferente radio para configurar unidades de tijera polar con distintas dimensiones [19]

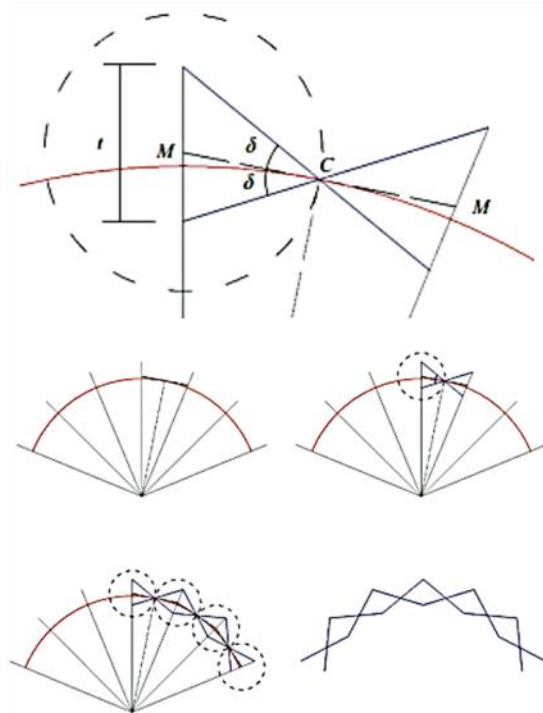


Figura 4.21 Método geométrico a partir de circunferencias tangenciales para configurar la unidad de tijera polar [19].

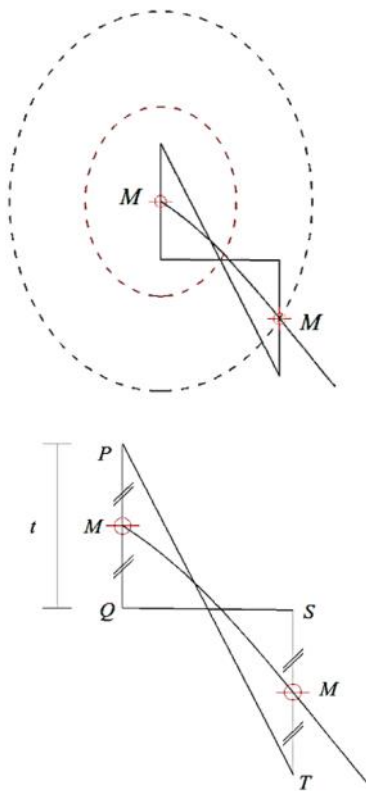


Figura 4.23 Método geométrico a partir de elipses para configurar la unidad de tijera traslacional [19].

Para el caso de la tijera traslacional, su aplicación es posible en el trazado de cualquier curva arbitraria, a diferencia de la unidad de tijera polar que generalmente se definen en curvas de radio constante.

El método geométrico describe el mismo procedimiento utilizado por Sánchez-Cuenca [74] descrito en el apartado anterior. Se define una curva base arbitrariamente y se traza un segmento vertical (PQ) con distancia (t) y punto medio (M), que determina los focos y centro de una primera elipse. La intersección de una segunda elipse (del doble de tamaño y concéntrica de la primera elipse) con la curva base, establece la distancia que va a ocupar la tijera en su posición final de desplegué, definido en el segmento (MM') (figura 4.23). Se procede a trazar el segmento vertical ($ST= PQ$) con el punto medio sobre la curva base (M') y así, las barras de tijeras son definidas por los puntos (PT) y (QS) respectivamente.

La repetición del método, partiendo de una elipse adyacente y posicionada tangencialmente con el punto (M'), configura la agrupación de tijeras traslacionales según el trazado de una curva específica (figura 4.24).

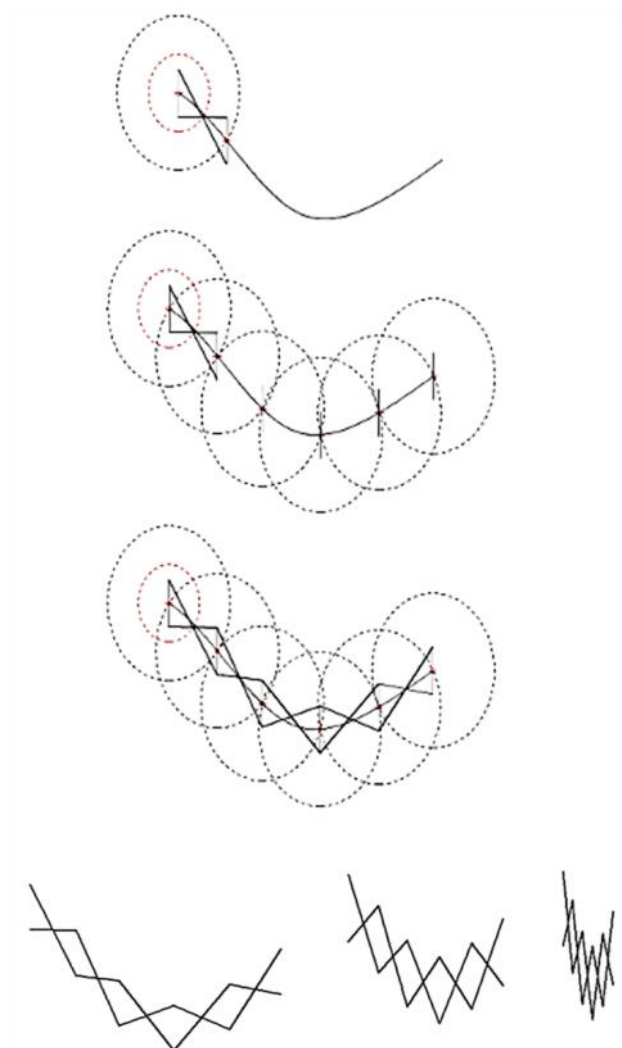


Figura 4.24 Agrupación de tijeras traslacionales sobre una curva arbitraria [19].

De Temmerman también explora la posibilidad de incorporar tijeras de diferentes tamaños, esto se obtiene al proponer que la distancia (t) sea variable, de tal manera que genere diversos tamaños de elipses que configuran la tijeras finales y un espesor de arco variable (figura 4.25), pero siempre la máxima amplitud de la tijera y así mismo el canto del arco configurado, estará determinado por esta distancia (t) que se propone con un valor arbitrario.

Un método final consiste en trazar dos curvas concéntricas, es decir se mantiene una equidistancia constante entre ambas curvas, se procede a dividir las en segmentos iguales a partir de radios que parten del único centro. El módulo de tijera es configurado gracias a las diagonales que unen los puntos superior en inferior en una sección definida por dos radios y las dos curvas concéntricas, el procedimiento se repite en cada sección para formar la totalidad del arco desplegable (figura 4.26).

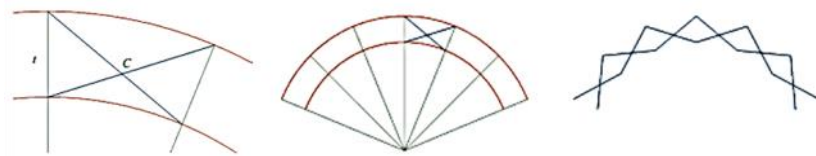


Figura 4.26 Método geométrico a partir de curvas concéntricas . Unidad de tijera polar [19].

El análisis de los métodos geométricos propuesto por Temmerman llevan a la realización de propuestas conceptuales a nivel arquitectónico, proponiendo agrupaciones en tres dimensiones con características de proceso de plegado y desplegado satisfactorias y posibilidades de viabilidad constructiva (figura 4.27).

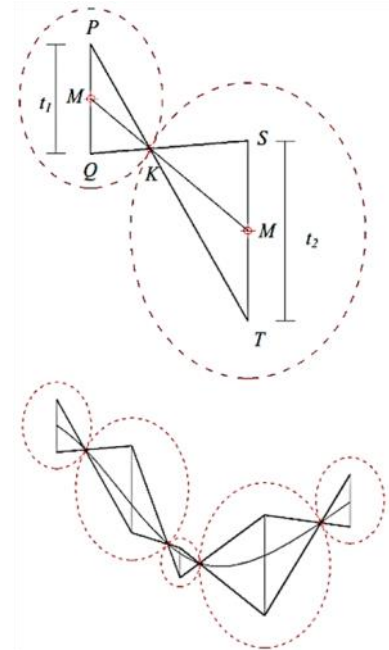
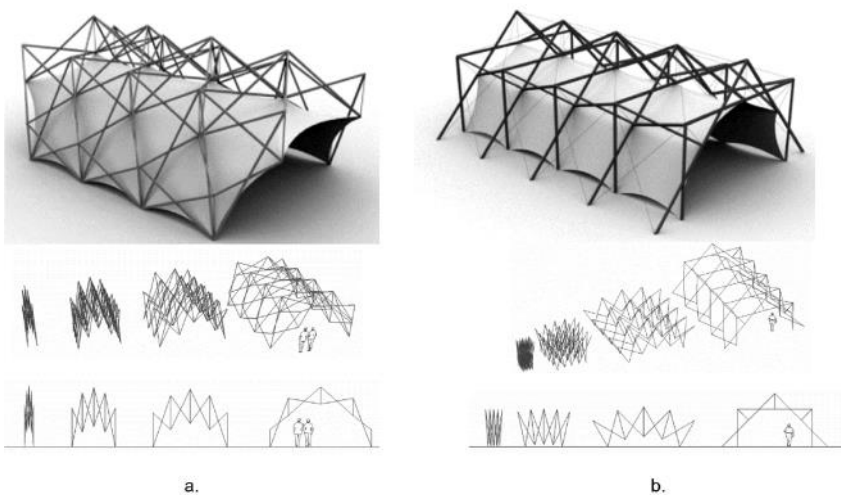


Figura 4.25 Método geométrico tijera traslacional. Tijeras con dimensiones diferentes [19].

Figura 4.27 Propuestas de albergues desplegables.
a) Configuración espacial a partir de tijeras traslacionales.
b) Configuración espacial a partir de tijeras polares [19].

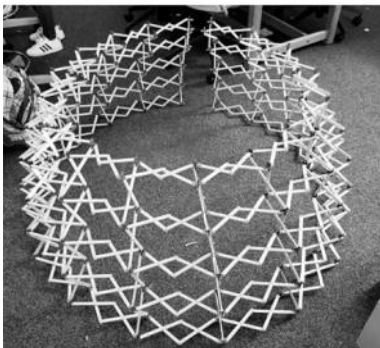
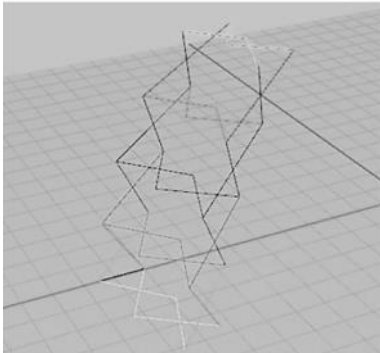
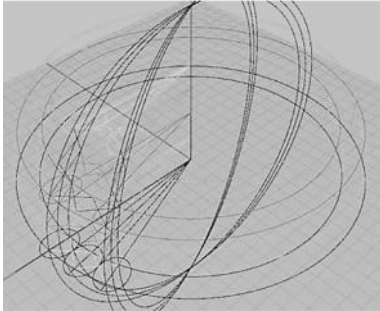
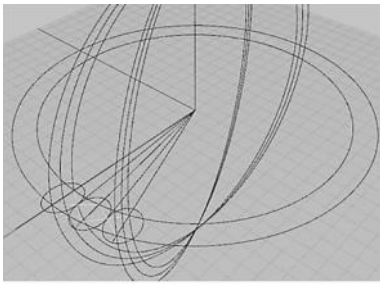


Figura 4.29 Definición de tijeras de un casquete de esfera a partir del trazado geométrico de elipses [115].

Figura 4.28 Método a partir de la sucesión de círculos de diferentes tamaños para configurar una superficie orgánica desplegable [115].

4.6 Negar Kalantar - tranSTUDIO

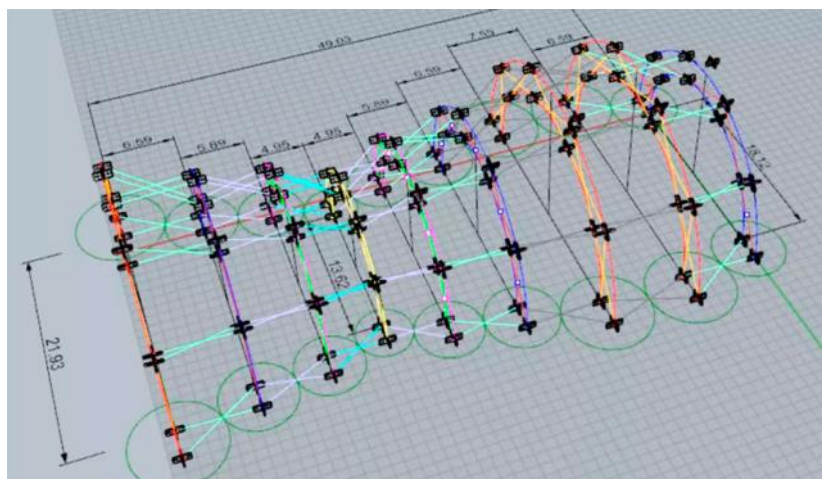
Negar Kalantar es arquitecta, investigadora y profesora en la Universidad de Texas A&M. Con el objetivo de desarrollar e innovar en el tema de diseños adaptables a creado tranSTUDIO 2018, una plataforma digital que explora a nivel académico estructuras transformables.

Dentro de las propuestas desarrolladas por los estudiantes bajo la coordinación de Kalantar, resaltan superficies desplegables configuradas a partir de los métodos geométricos de sucesión de elipses y circunferencias, descritas en el apartado anterior.

Las superficies resultantes son superficies con formas orgánicas que incluye arcos de diferentes dimensión, lo que implica el uso de barras de diferente longitud (figura 4.28), aunque el reto de esta investigación esta en minimizar el número de elementos diferentes para facilitar su fabricación, ensamble y montaje, es un buen referente a tomar en cuenta.

Las figuras 4.28 y 4.29 describen el método geométrico utilizado, adaptando la proporción de la tijera a la superficie a desarrollar, cumpliendo siempre la condición de plegabilidad y la correlación con el trazado geométrico de las elipses o círculos, desarrolladas por previamente por De Temmerman y Luis Sánchez-Cuenca.

Los prototipos elaborados a escala demuestran la efectividad del método geométrico para definir las tijeras, las estructuras presentadas logran un perfecto paquete plegado y el proceso de despliegue se realiza sin dificultad, además son formas innovadoras que permiten ver los alcances de las estructuras desplegables con el STT en el diseño de espacios temporales (figura 4.30).



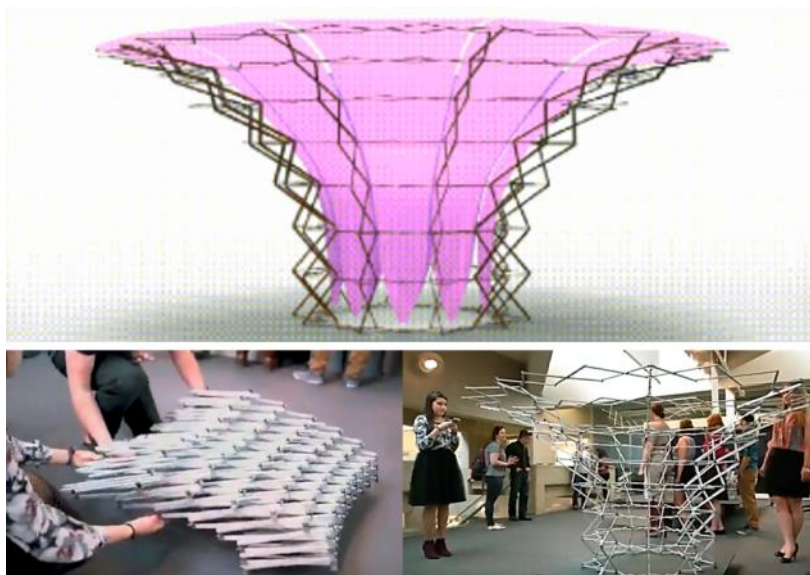
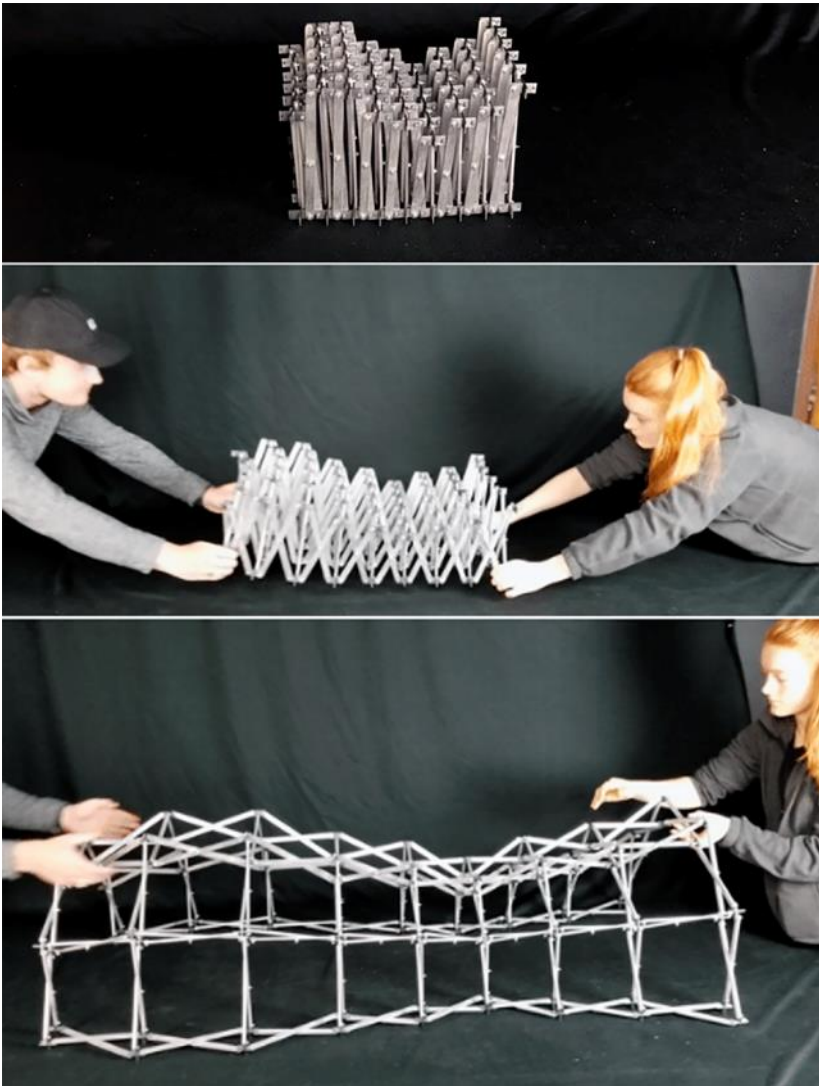


Figura 4.30 Maquetas superficie orgánica desplegable. [Archivo de video] [115].

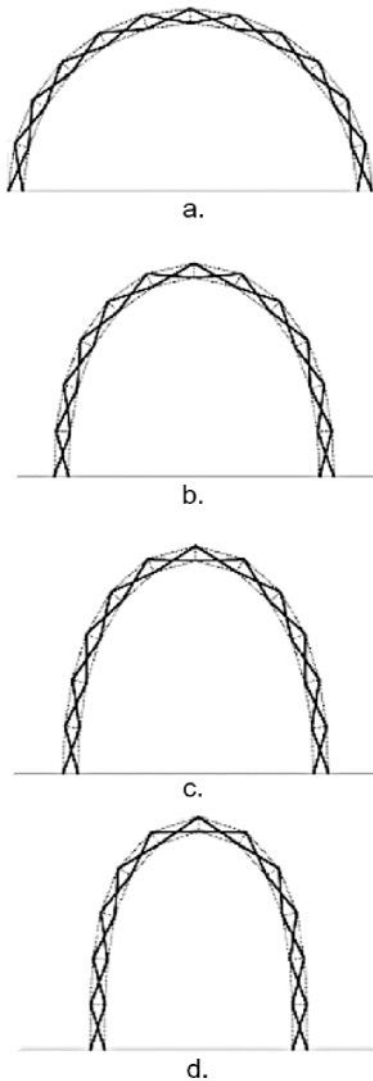


Figura 4.31 Método Babaei para configurar arcos STT.

- a) Arco dividido equitativamente.
 - b) Progresión aritmética.
 - c) Progresión geométrica.
 - d) Ecuación algebraica.
- Elongación vertical [3].

4.7 Método Babaei

El estudio realizado por Babaei [3] expone diferentes geometrías de arcos desplegados generados a partir de progresiones aritméticas, progresiones geométricas y ecuaciones algebraicas aplicadas sobre el valor del ángulo interno de un módulo de tijera.

En una primera exploración Babaei propone un arco dividido en partes iguales, agrupando módulos de tijeras hasta determinar como ápice una línea vertical entre los extremos de la última tijera conectada, luego procede a aplicar las progresiones y ecuaciones correspondientes para modificar el arco, obteniendo una elongación en vertical de la geometría inicial del arco, manteniendo la misma cantidad de módulos de tijera (figura 4.31).

Y un segundo caso donde la exploración corresponde a la elongación en horizontal de la geometría inicial del arco planteado (figura 4.32).

Las geometrías resultantes de los arcos de Babaei son de gran interés ya que proyecta diferentes geometrías de estructuras desplegadas a partir de STT, incorporando tijeras con longitudes muy similares, pero variando la geometría de la curva a desarrollar con relaciones matemáticas entre los ángulos de conexión entre tijeras consecutivas.

Su estudio motiva a la proyección de nuevas estructuras espaciales que incorporen nuevos análisis y búsqueda de la forma a partir de variables matemáticas expresadas en progresiones aritméticas y geométricas que pueden generar múltiples formas de arcos desplegados.

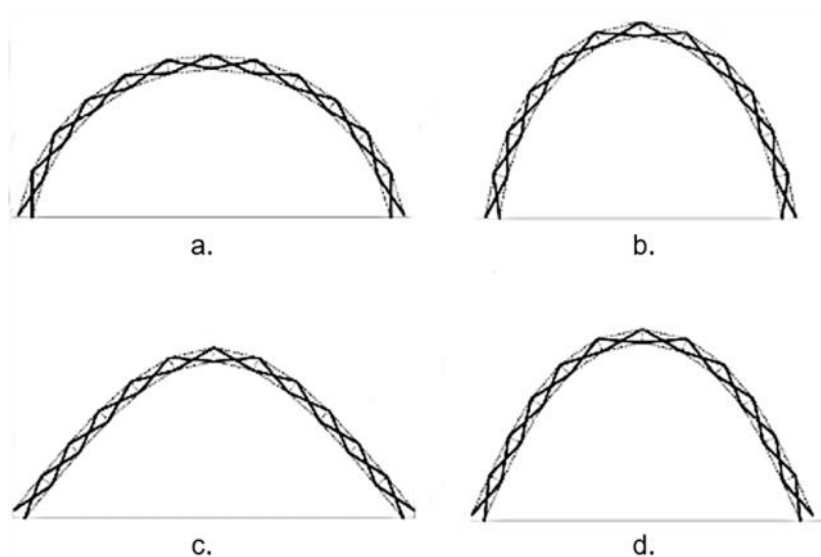
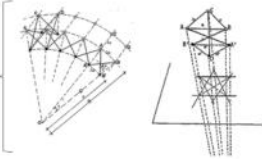
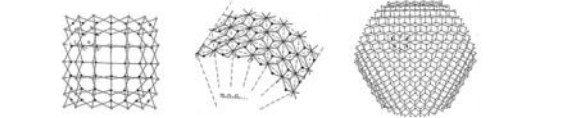
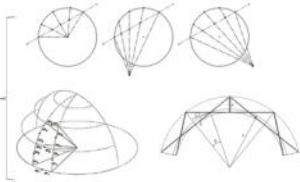

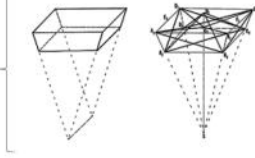

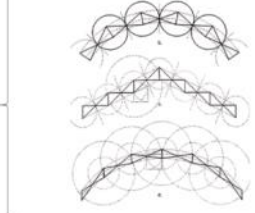
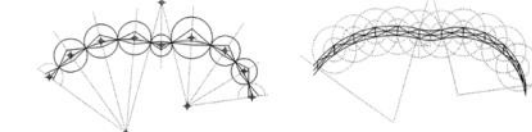
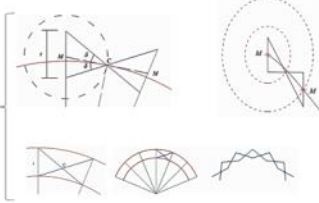
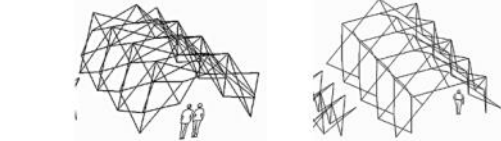
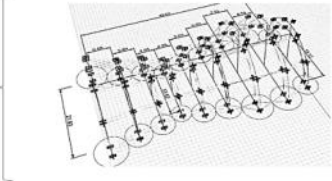


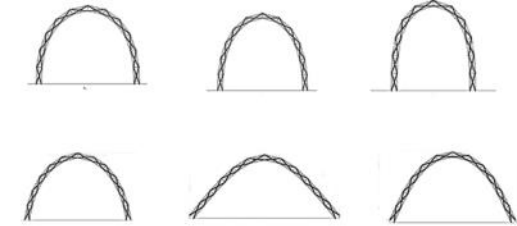


Figura 4.32 Método Babaei para configurar arcos STT.

- a) Arco radio de curvatura igual.
 - b) Progresión aritmética.
 - c) Progresión geométrica.
 - d) Ecuación algebraica.
- Elongación horizontal [3].

4.8 Conclusiones

Tabla 4.1 Resumen métodos geométricos referentes. Estructuras desplegables STT.

Autores	Método Geométrico	Geometrías resultantes
Emilio Pérez Piñero		
Félix Escrig		
Chaius J. Gantes		
Luis Sánchez Cuenca		
Niels De Temmerman		
Negar Kalantar		
Mehdi Babaei		

Las características de los métodos analizados por otros autores demuestran la importancia de tener una base geometría inicial como guía para proyectar y trazar los módulos de tijera sobre una superficie o curva inicial, ambos elementos dispuestos arbitrariamente se van ajustando según la espacialidad que se quiera obtener, con la mínima cantidad de módulos para generar la curvatura, siempre buscando el mínimo número de barras de diferente longitud y sobretodo cumpliendo las correctas condiciones de plegabilidad.

El método más práctico y más utilizado analizado en los anteriores apartados, consiste en dividir dos curvas concéntricas iniciales en radios. La intersección de líneas (radios y curvas iniciales), posiciona los puntos de articulación en los extremos de las barras y el punto de la articulación central, estimando una apertura de tijera en la posición final de despliegue, que genere una proporción adecuada del canto del arco propuesto.

También resulta de interés la proyección de agrupaciones del STT a partir del poliedros, ya que las aristas generan la directriz y base geometría para generar la agrupación espacial de módulos de tijeras de iguales dimensiones.

La cantidad de módulos de tijeras dependerá del número de divisiones que se realice sobre la curva o sobre la red triangular o cuadrangular inicial que determina la geometría base de la agrupación, pero la longitud de barra de cada módulo de tijera se determina por la distancia vertical entre articulaciones extremas, en la posición final de despliegue. Esta distancia en la mayoría de los casos es aleatoria, buscando un valor acertado y proporcional a un canto adecuado al arco o superficie proyectada.

En conclusión y como ya se ha mencionado anteriormente, la clave para obtener superficies desplegadas con curvatura, se basa en la posición de la articulación excéntrica y la correcta posición de las barras con su módulo adyacente (ver apartado 3.2.2).

De esta forma la investigación se centra en proponer un método geométrico simplificado que pueda arrojar resultados como la posición final de la articulación excéntrica y cantidad de módulos necesarios, según los parámetros variables de una longitud de barra o la luz necesaria a cubrir en un caso específico.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

DOMOS DESPLEGABLES

MÉTODO GEOMÉTRICO A PARTIR DE POLÍGONOS REGULARES

Natalia Paola Torres Londoño

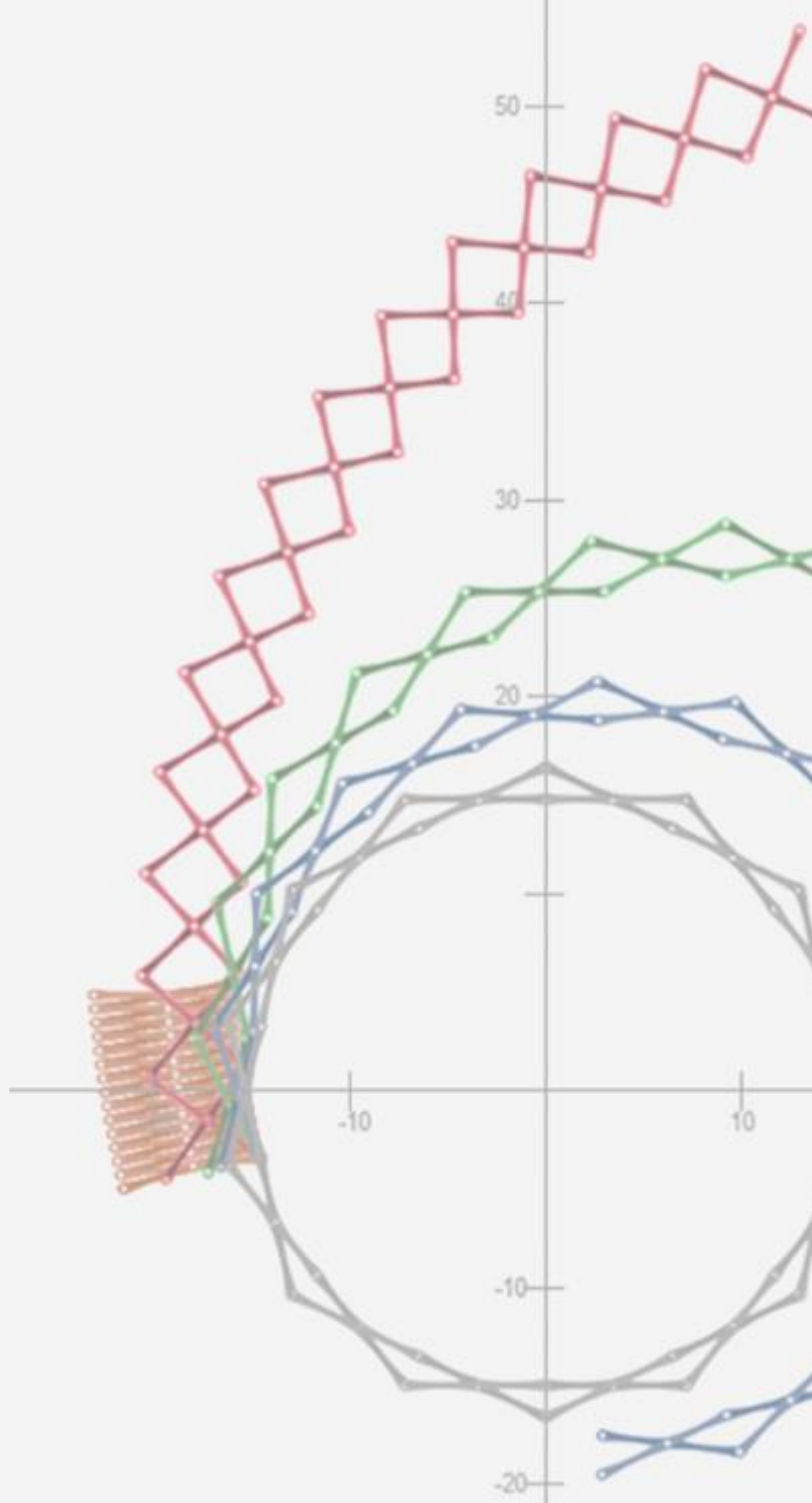
Tesis doctoral dirigida por:

Dr. Ramon Sastre Sastre

Tutor: Xavier Gimferrer Vilaplana

SEGUNDA PARTE. EXPERIMENTACIÓN

Universidad Politécnica de Catalunya
Doctorado en Tecnología de la Arquitectura, de la Edificación y del Urbanismo
Departamento de Tecnología de la Arquitectura
Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés
Barcelona, 2021

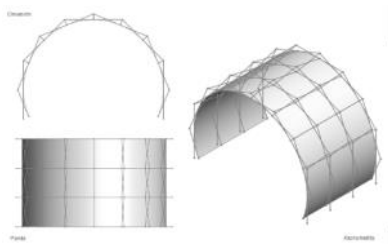


CAPÍTULO 5

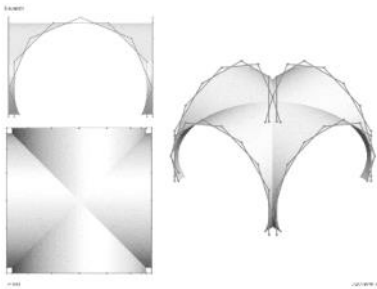
MÉTODO A PARTIR DE POLÍGONOS REGULARES PARA CONFIGURAR ARCOS DESPLEGABLES

Desarrollo de un método geométrico que permite configurar arcos desplegados a partir del sistema tipo tijera. El capítulo describe los determinantes y pasos a seguir para generar la geometría de arcos a partir de la superposición de polígonos regulares inscritos en una circunferencia.

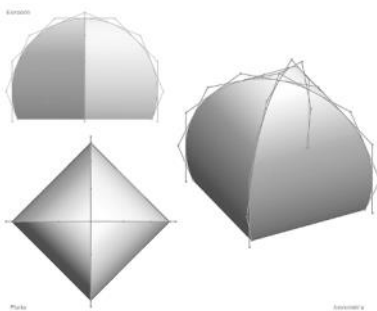
Las geometrías resultantes del método y su aplicación en la configuración de superficies desplegadas se exponen en tablas descriptivas, junto con la propuesta de tablas interactivas realizadas en hojas de cálculo en Excel [132], como herramientas informáticas que optimizan el proceso de diseño y búsqueda de la forma, generando los valores de la longitud de barra y posicionamiento de la articulación excéntrica ante un diseño específico.



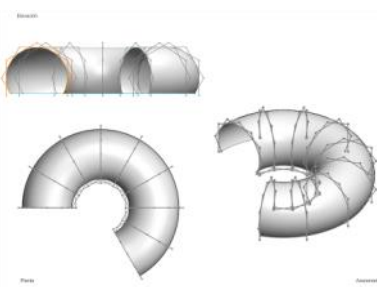
a.



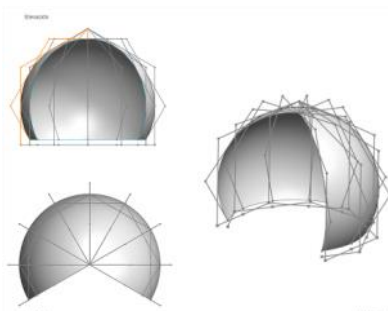
b.



c.



d.



e.

Figura 5.27 Tipos de bóvedas a configurar según polígono y arcos. Alzado, planta y axonometría.
 a) Bóveda de cañón. b) Bóveda de arista. c) Bóveda esquifada.
 d) Bóveda anular. e) Domo.
 Fuente: Elaboración del autor.

Contenido capítulo

5.1 Análisis sobre la posición de la articulación central	216
5.2 Método geométrico a partir de polígonos regulares	219
5.2.1 Polígonos estrellados	219
5.2.2 Descripción del método geométrico a partir de polígonos regulares	220
5.3 Análisis etapas de despliegue polígonos seleccionados	225
5.4 Geometrías resultantes método propuesto	231
5.4.1 Configuración arcos desplegados	231
5.4.2 Configuración de bóvedas. desplegadas	235
5.5 Cálculo longitud de barra y posicionamiento de articulación excéntrica ...	241
5.5.1 Cálculo de la barra a partir de la longitud requerida	244
5.5.2 Cálculo de la barra a partir del diámetro requerido.....	246
5.5.3 Cálculo altura libre, flecha y canto	249
5.6 Conclusiones	251

5.1 Análisis sobre la posición de la articulación central

Para obtener un despliegue con curvatura a partir del STT y configurar arcos desplegados, las barras rectas de cada tijera deben articularse sobre el eje longitudinal en un punto desfasado del centro. La posición de este punto específico se denomina articulación excéntrica (Ver apartado 3.1.2, figuras 3.8 y 3.10).

En el presente apartado se compara tres posibilidades de barras de la misma longitud, con diferente ubicación de la articulación excéntrica para formar tres tipologías de arcos desplegados (figura 5.1). El objetivo es analizar geoméricamente, que sucede en las diferentes etapas de despliegue según se aumenta la distancia de la articulación excéntrica desde el centro de la barra (figura 5.2).

Para su análisis gráfico se establecen los siguientes parámetros

Las barras tienen una longitud total de 100 mm

Cada arco está compuesto por seis módulos de tijeras.

El desplazamiento de la articulación excéntrica en cada caso se define según la figura 5.1.

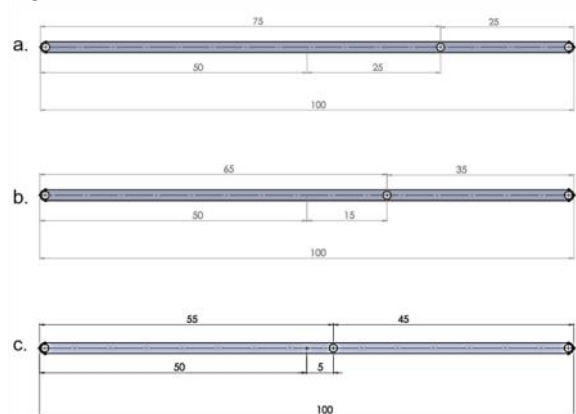


Figura 5.1 Tres diferentes posiciones de la articulación excéntrica en una barra de tijera. Longitud total de la barra.

$L = 100 \text{ mm}$

a) Distancia al centro.
 $50 \text{ mm} + 25 \text{ mm} = 75 \text{ mm}$

c) Distancia al centro.
 $50 \text{ mm} + 15 \text{ mm} = 65 \text{ mm}$

b) Distancia al centro.
 $50 \text{ mm} + 5 \text{ mm} = 55 \text{ mm}$

Fuente: Elaboración del autor

En los gráficos de la figura 5.2 se observa las diferentes posiciones de las tijeras a medida que se despliega la agrupación en cada caso, generando la configuración aproximada de arcos planos que se obtienen al momento de acercarse a la geometría de arcos de medio punto, para simular un espacio cubierto.

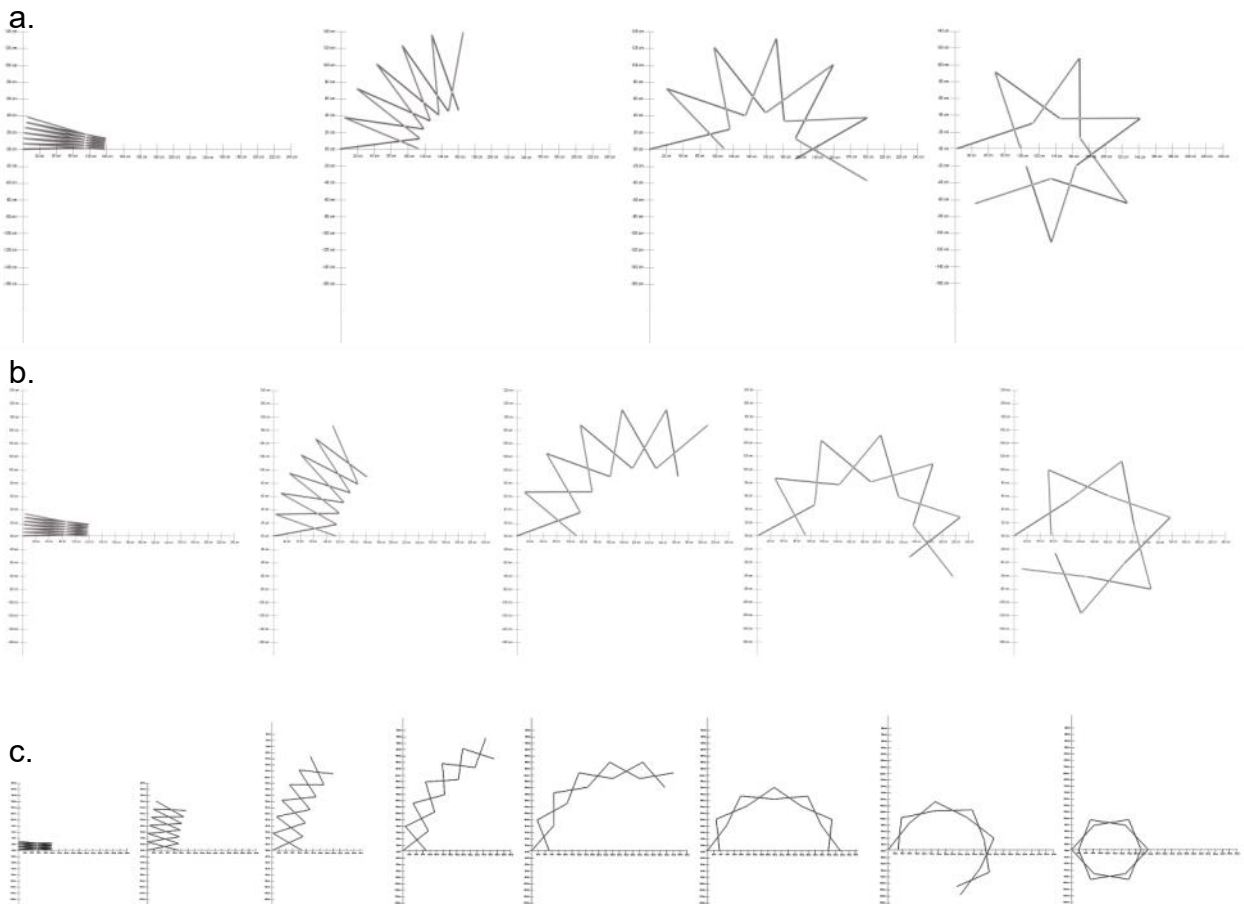
A partir de estos gráficos se establecen cuatro criterios de comparación: el diámetro resultante en arcos de medio punto, la altura máxima que se visualiza en las etapas intermedias del despliegue, el espesor del arco y la geometría resultante al desplegar por completo la agrupación.

Se compara el diámetro resultante en la posición de despliegue que se acerca a la configuración de arcos de medio punto. Se observa que a medida que la excentricidad aumenta, es decir, la distancia de la articulación excéntrica al punto central es mayor y se genera una mayor proporción entre el tramo largo y el tramo corto en la barra. Los arcos cubren menor distancia, resultando un diámetro interior menor que genera un espacio útil reducido (figura 5.2 a).

La longitudes de despliegue que describen mayor altura en las etapas intermedias del despliegue, refieren a la agrupación de tijeras donde la excentricidad se acerca al centro de la barra, la proporción entre el tramo largo y el tramo corto es menor (figura 5.2 c). Por lo tanto, se ha de considerar y prever el espacio suficiente en altura, así como andamios o escaleras adicionales para el montaje y desmontaje real de este tipo de estructuras en espacios interiores y exteriores.

El espesor o canto del arco va relacionado directamente con las distancia de la articulación excéntrica al centro, entre mayor es la distancia, mayor espesor de arco. Se considera que una proporción acertada entre espesor del arco y el diámetro cubierto es el arco de medio punto que corresponde a la figura 5.2 c.

Figura 5.2 Etapas de despliegue de arcos configurados con seis módulos de tijeras. Posición de la articulación excéntrica según figura 5.1.
Fuente: Elaboración del autor



Existen ecuaciones ya establecidas sobre la relación del espesor del arco y su radio, definida como :

$$k = e/R$$

Donde e es el espesor y R el radio medio. (Couplet, 1730, como se cito en Huerta [44] pp. 95)

Varios autores a lo largo del tiempo han establecido diferentes proporciones sobre el espesor ideal, que coinciden en $k = 0.1$

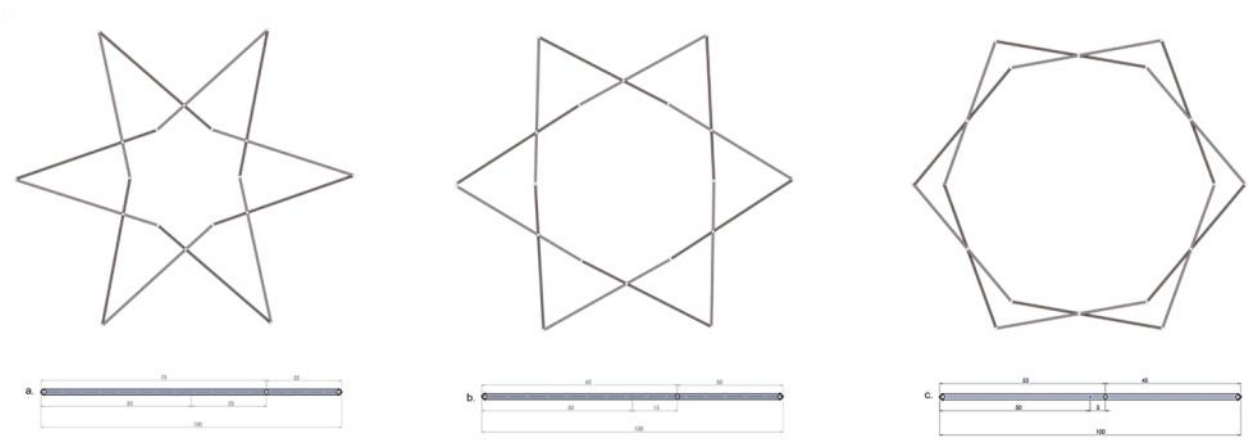
Por ejemplo Rondelet (1802) establece que un arco de medio punto no se sostendrá si su espesor es menor de $1/18$ de la luz, lo que conduce a $k = 0,1053$. Más reciente Milankovitch (1907) y Ochsendorf (2002) llegan a un valor similar de $k = 0,1075$, como se cito en Huerta [44] pp. 95.

En el apartado 5.5, se analiza si con el método propuesto para configurar arcos desplegados, es posible obtener espesores de acuerdo con los valores de k establecidos.

Ahora, si se analiza las geometrías resultantes de los arcos desplegados, al expandir por completo cada una de las agrupaciones, el proceso de despliegue se detiene cuando la última tijera se enlaza con la tijera inicial.

En esta posición de despliegue, la apertura de las tijeras es similar a la geometría de polígonos estrellados, que será el punto de partida para la configuración de arcos desplegados (figura 5.3).

Figura 5.3 Máxima a apertura de arcos desplegados. La geometría resultante es similar a la configuración de polígonos estrellados.
Fuente: Elaboración del autor



5.2 Método geométrico a partir de polígonos regulares.

5.2.1 Polígonos estrellados

Los polígonos estrellados son polígonos cóncavos configurados a partir de la unión de vértices no consecutivos dispuestos sobre una circunferencia (figura 5.4).

Es decir:

Si se parte de una circunferencia dividida en n partes iguales, al proceder a unir cada división con la siguiente, obtenemos el polígono convexo, los polígonos regulares convencionales; pero si se salta dos, tres... k divisiones, de manera que se retorna al punto inicial después de pasar por todas las divisiones, el polígono se denomina estrellado. El número k de divisiones que salta para ir de un vértice al siguiente se denomina paso del polígono estrellado [126] p. 27 (figura 5.4).

Las posibilidades de polígonos estrellados genera una infinidad de geometrías a considerar para relacionarlo con el planteamiento de agrupación de tijeras rectas que forman arcos despleables, para facilitar el proceso de búsqueda de la forma en superficies despleables y proponer un método geométrico sencillo, solo se consideran en esta investigación aquellos polígonos estrellados que consisten en la **superposición de polígonos regulares**, resaltados con recuadros rojos en la figura 5.5.

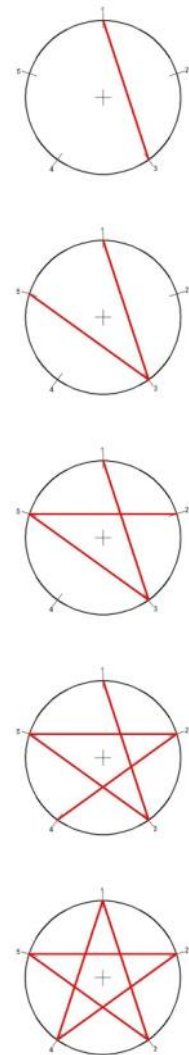


Figura 5.4 Proceso geométrico para trazar un polígono estrellado.

Fuente: Elaboración del autor

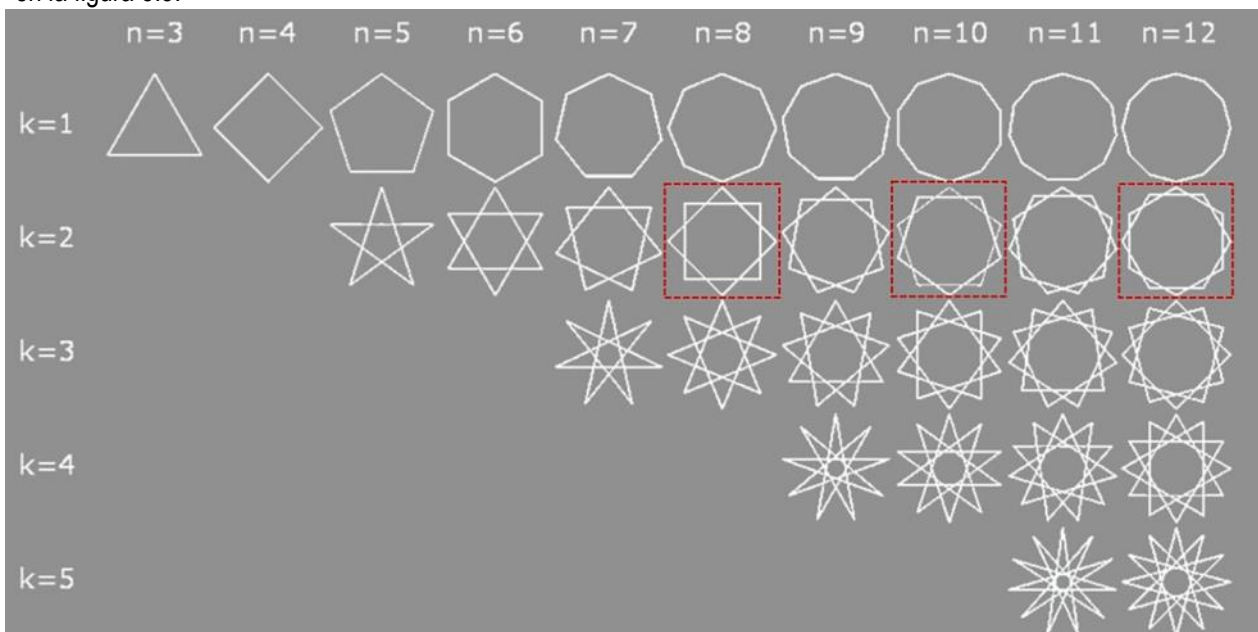
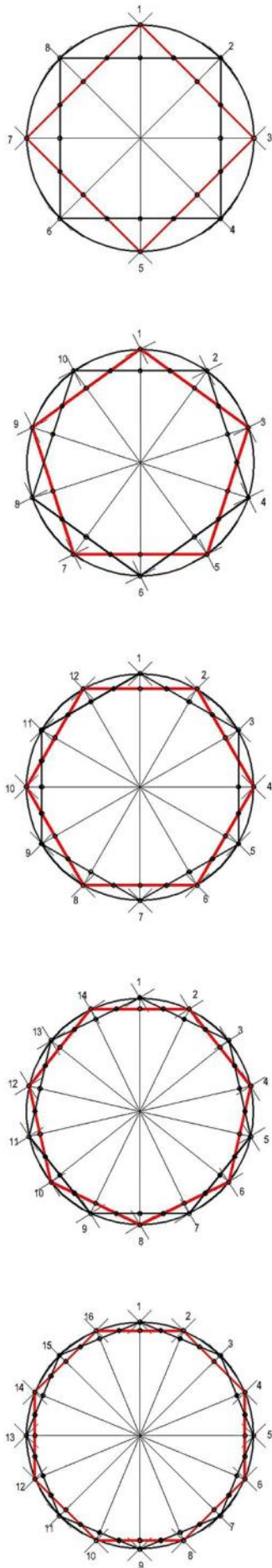


Figura 5.5 Configuración de polígonos estrellados. En recuadros rojos se diferencian los polígonos estrellados basados en la superposición de polígonos regulares.

Fuente: <https://help.geogebra.org/topic/regular-star-polygons> Recuperado [15/02/2019]



5.2.2 Descripción del método geométrico a partir de polígonos regulares.

Definida la categoría de polígonos estrellados a analizar, que consisten en la superposición de polígonos regulares y la relación geométrica que existe entre el trazado de estos polígonos con la definición de agrupaciones de tijeras rectas, que representan la configuración de arcos desplegables, se describe en el presente apartado los pasos a seguir del método geométrico propuesto en esta investigación.

De esta forma, se inicia el proceso de diseño a partir de una circunferencia dividida en partes iguales, estableciendo las primeras variables a considerar en la búsqueda de la forma en arcos desplegables con el STT, como el diámetro requerido o en cuantas partes iguales se divide la circunferencia.

Para este estudio, se inicia la exploración a partir de ocho divisiones que configura dos cuadrados superpuestos como la unidad mínima para visualizar una agrupación de tijeras que forman un arco en media circunferencia, hasta un máximo de 16 divisiones que representan dos octágonos superpuestos (figura 5.6).

El objetivo es que las geometrías resultantes (figura 5.6), demuestren que el método geométrico a partir de polígonos regulares permitan visualizar un trazado de segmentos que forma una agrupación de tijeras inscritas en una circunferencia, y para el caso específico arcos compuestos de segmentos que se pueden traducir a barras articuladas. Si se establece el diámetro de la circunferencia base, se obtiene una longitud de la barra determinada y el posicionamiento exacto de la articulación central, que permite obtener la curvatura específica en la etapa final de despliegue.

Para la descripción paso a paso del método geométrico a proponer, se debe tener en cuenta que el trazado de las líneas se realiza uniendo vértices intercalados, la división de la circunferencia siempre será en números pares (correspondiente a dos polígonos regulares superpuestos de n lados) y finalmente para el ejemplo explicativo de los pasos a seguir, se establece el hexágono como la geometría a desarrollar.

Figura 5.6 Polígonos estrellados a partir de polígonos regulares superpuestos. De arriba hacia abajo: Cuadrado, pentágono, hexágono, heptágono y octágono estrellados. Fuente: Elaboración del autor

Pasos

1. Dibujar una circunferencia y dividirla con ejes radiales en la cantidad de lados del polígono seleccionado multiplicado por dos ($2n$). Si se toma el hexágono como polígono de ejemplo, el número de lados es:

$$n=6.$$

La circunferencia se divide en $2n = 12$ segmentos.

Siempre la división de la circunferencia debe corresponder a un número par (figura 5.7).

2. En la división de la circunferencia, el primer radio trazado debe coincidir con una línea vertical, del centro al vértice correspondiente sobre la circunferencia. Esta determinante se realiza con el fin de que cuando se junten dos semiarcos en la cúspide, la posición final de despliegue del arco coincida en este punto con una línea horizontal (figura 5.8).

3. Se traza el primer hexágono partiendo del primer vértice que coincide con el radio vertical. Cada lado del polígono corresponde a la unión en orden y en un solo sentido, de dos vértices no consecutivos hasta cerrar el polígono (figura 5.9).

4. Se traza el segundo hexágono superpuesto uniendo los vértices faltantes (figura 5.10).

5. Se indican los puntos de intersección entre los radios y los lados de los polígonos que definen los segmentos de las barras de las tijeras (figura 5.11).

6. Se indican los puntos de intersección entre los lados de ambos polígonos que definen la posición de la articulación excéntrica de cada tijera (figura 5.12).

Todos los arcos configurados establecen módulos de tijeras con barras de la misma longitud ya que la base geométrica se basa en polígonos regulares inscritos en una circunferencia dividida en partes iguales.

Las geometrías resultantes analizadas a partir del cuadrado estrellado hasta el octágono estrellado se representan en la figura 5.13, así como su representación en modelos a escala y digitales (figuras 5.16 a 5.20), donde:

n es el número de lados del polígono regular seleccionado

Y v es el número de vértices a posicionar sobre la circunferencia a distancias iguales $v = 2n$

Figura 5.7

Paso 1.
División de circunferencia en n partes,
según polígono seleccionado.

Hexágono: $n = 6$ $v = 2n$ $v = 12$

Fuente: Elaboración del autor

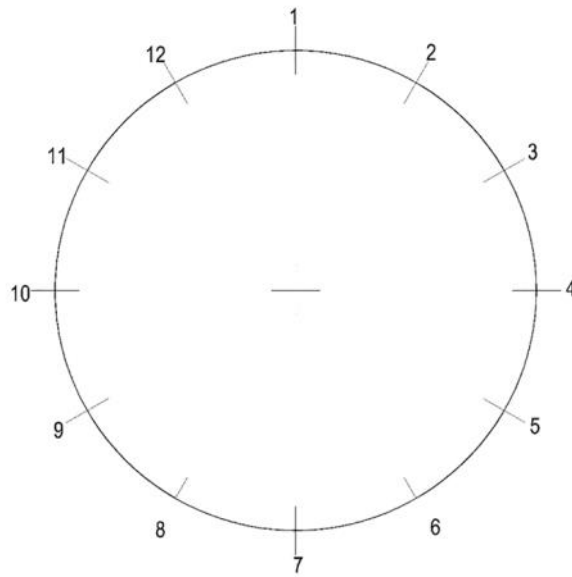


Figura 5.8

Paso 2.
Trazado de los radios

Fuente: Elaboración del autor

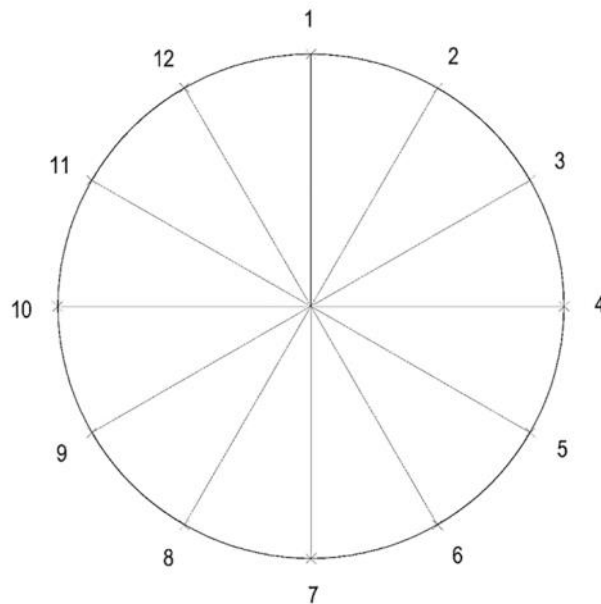
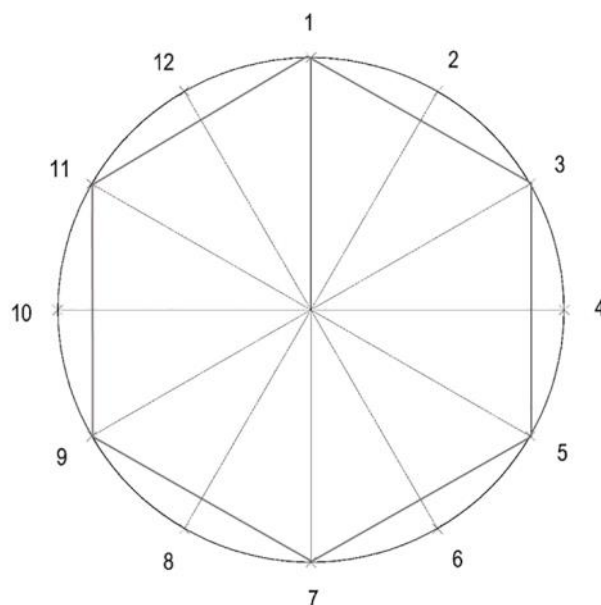


Figura 5.9

Paso 3.
Configuración primer polígono.
Hexágono.

Fuente: Elaboración del autor



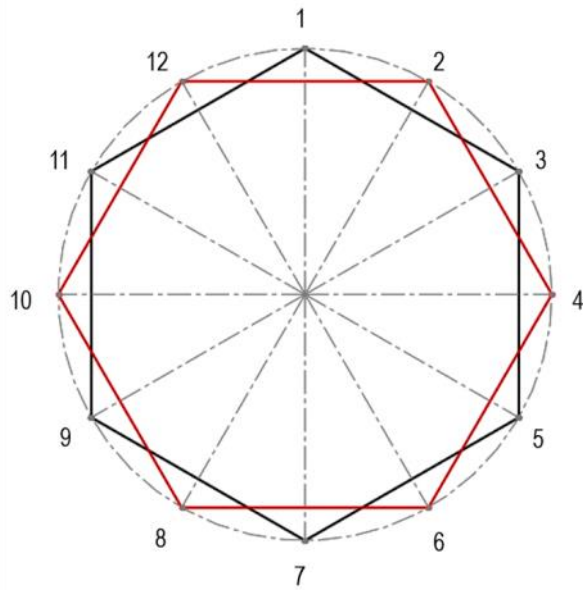


Figura 5.10

Paso 4.

Configuración segundo polígono superpuesto.

Fuente: Elaboración del autor

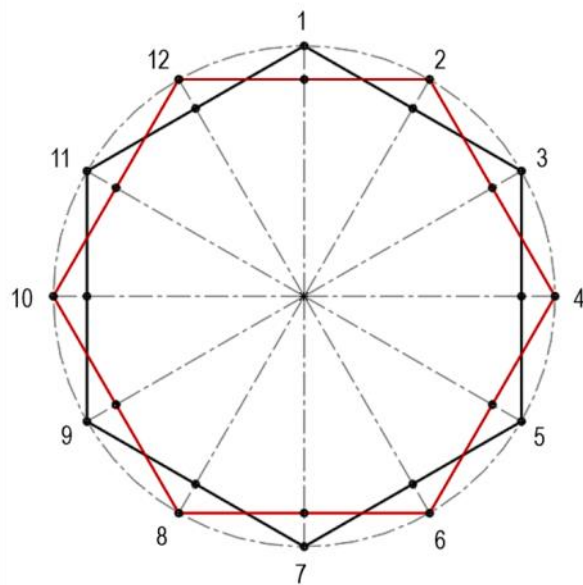


Figura 5.11

Paso 5.

Especificar los puntos de intersección entre los radios y los polígonos. Definición de tijeras.

Fuente: Elaboración del autor

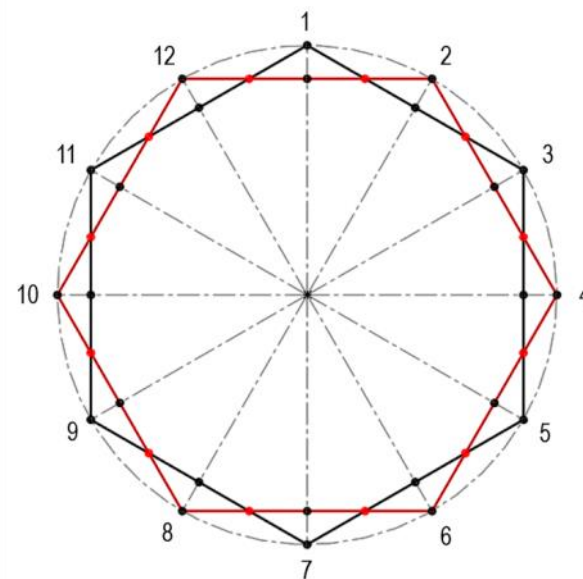


Figura 5.12

Paso 6.

Especificar los puntos de intersección entre los polígonos. Definición de la articulación excéntrica.

Fuente: Elaboración del autor

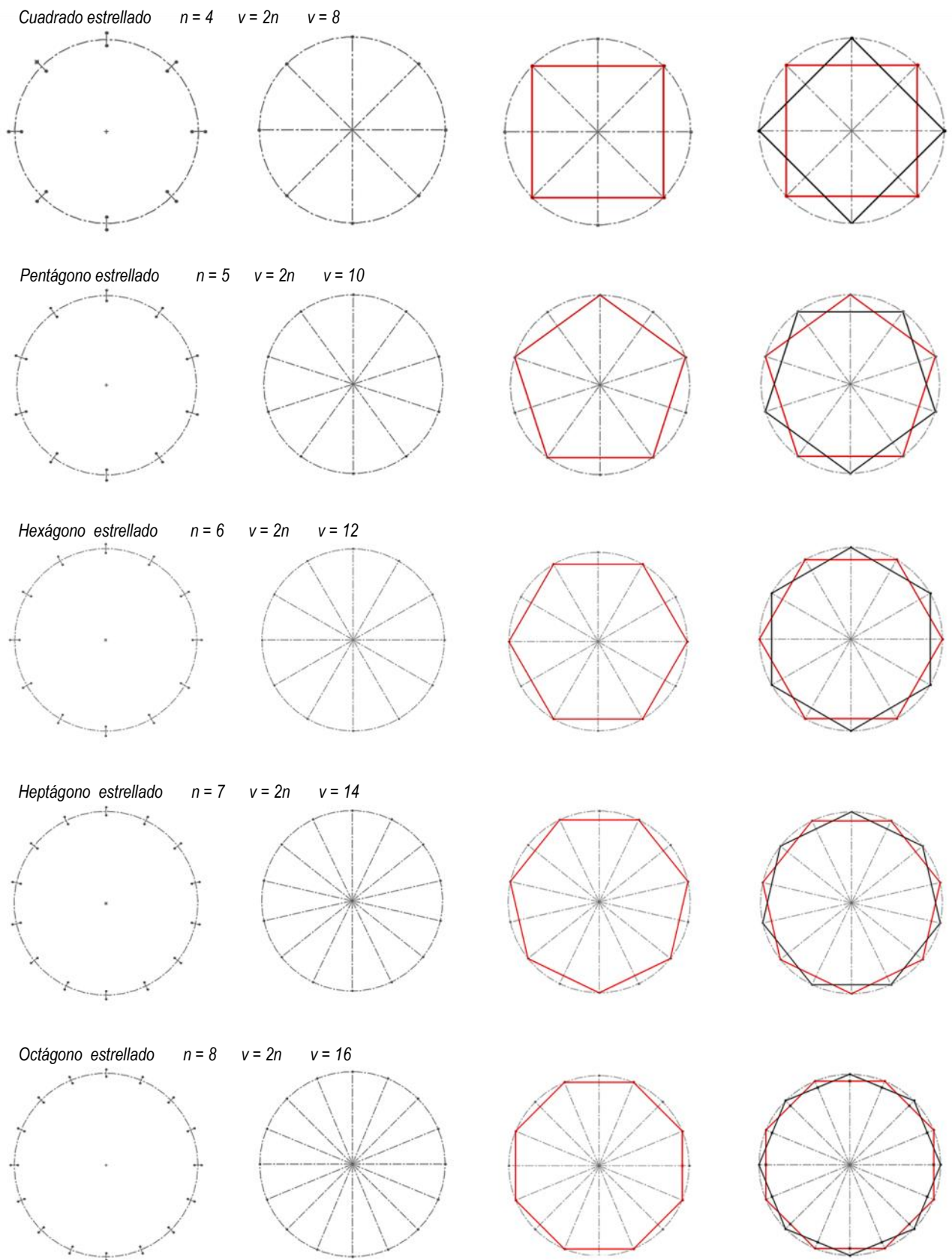


Figura 5.13 Geometrías resultantes polígonos estrellados a partir de la superposición de polígonos regulares. Donde n = número de lados del polígono y $v = 2n$ número de vértices en que se divide la circunferencia.
Fuente: Elaboración del autor

5.3 Análisis etapas de despliegue polígonos seleccionados

Para continuar con el análisis del planteamiento de polígonos estrellados hacia la configuración de agrupaciones de tijeras rectas que forman arcos planos desplegables, se realizan una exploración de maquetas a escala que permiten visualizar y comprender los procesos de despliegue.

Para ello se utilizan barras plásticas comerciales, comúnmente utilizadas para manualidades, que incorporan agujeros en los extremos. Se procede a dibujar el polígono correspondiente para definir la posición de la articulación excéntrica según el método geométrico propuesto, con la condición de que la longitud de la barra en el esquema gráfico debe coincidir con la longitud de la barra plástica entre ejes de los agujeros, correspondiente a 72 mm (figura 5.14).

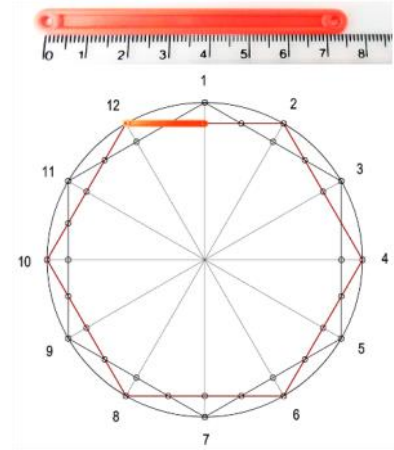


Figura 5.14 Armado de maquetas de polígonos estrellados a partir de barras plásticas.

Fuente: Elaboración del autor.

Una vez determinada gráficamente la posición de la articulación excéntrica para cada caso (del cuadrado al octágono), se procede a armar los módulos de tijera y agruparlos. A continuación se expone el resultado de los diferentes modelos armados para este apartado, complementados con un análisis gráfico de las diferentes etapas de despliegue donde se representan cinco posiciones caracterizadas por colores, que resultan de importancia para la comprensión de los procesos de despliegue y el desarrollo de la investigación.

Las posiciones de despliegue a señalar mediante convenciones por colores son:

Gris: Posición abierta (Polígono estrellado configurado) (figura 5.15 a).

Azul: Máxima posición de despliegue en vertical negativo (figura 5.15 b).

Verde: Posición de despliegue que configura un arco de medio punto o similar (figura 5.15 c).

Rosa: Máxima posición de despliegue en vertical positivo (figura 5.15 d).

Naranja: Posición plegada (figura 5.15 e).

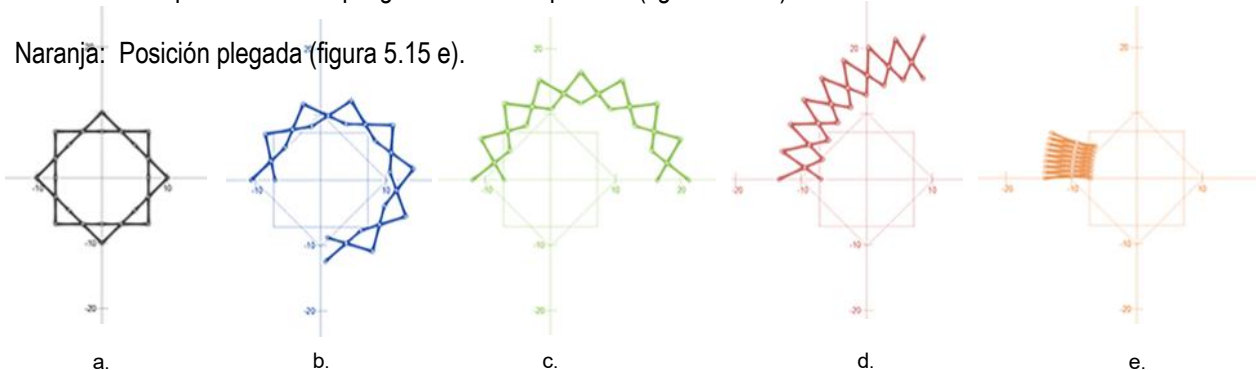


Figura 5.15 Etapas de despliegue analizadas en polígonos estrellados. Convenciones por colores.

Fuente: Elaboración del autor.

Figura 5.16 Etapas de despliegue. Cuadrado estrellado.
Fuente: Elaboración del autor.

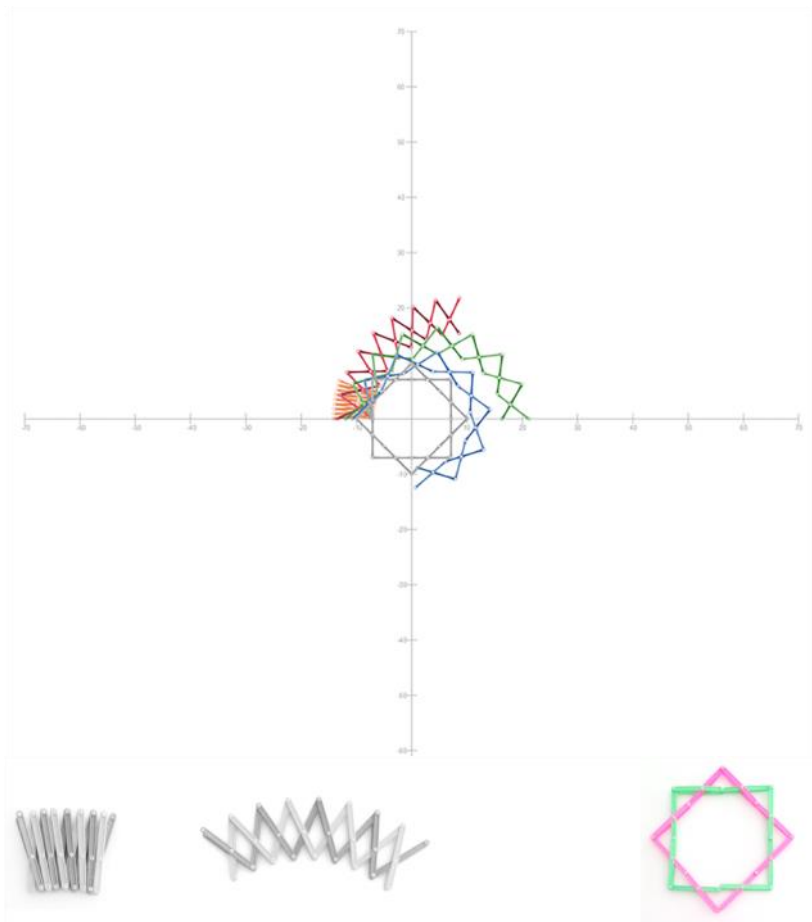
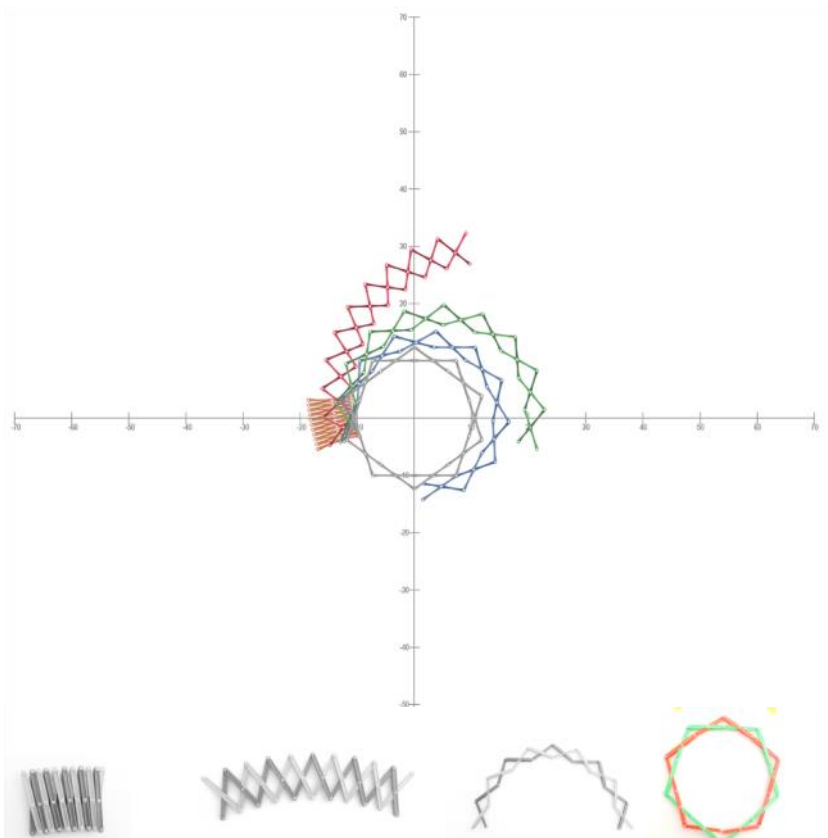


Figura 5.17 Etapas de despliegue. Pentágono estrellado.
Fuente: Elaboración del autor.



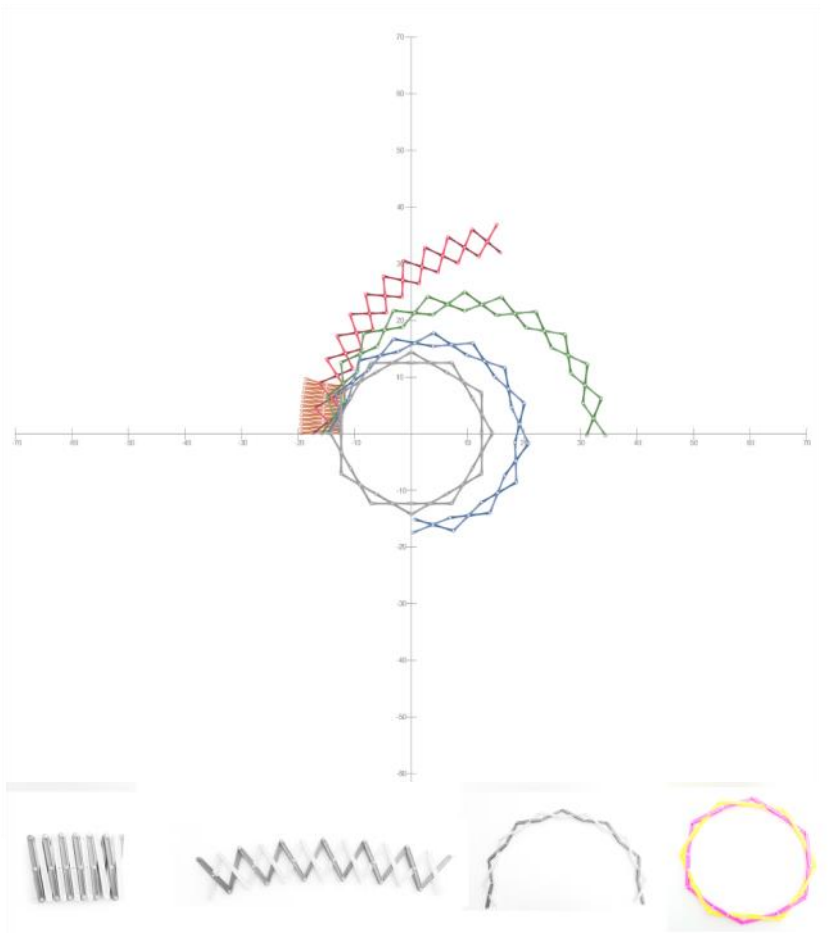


Figura 5.18 Etapas de despliegue. Hexágono estrellado.
Fuente: Elaboración del autor.

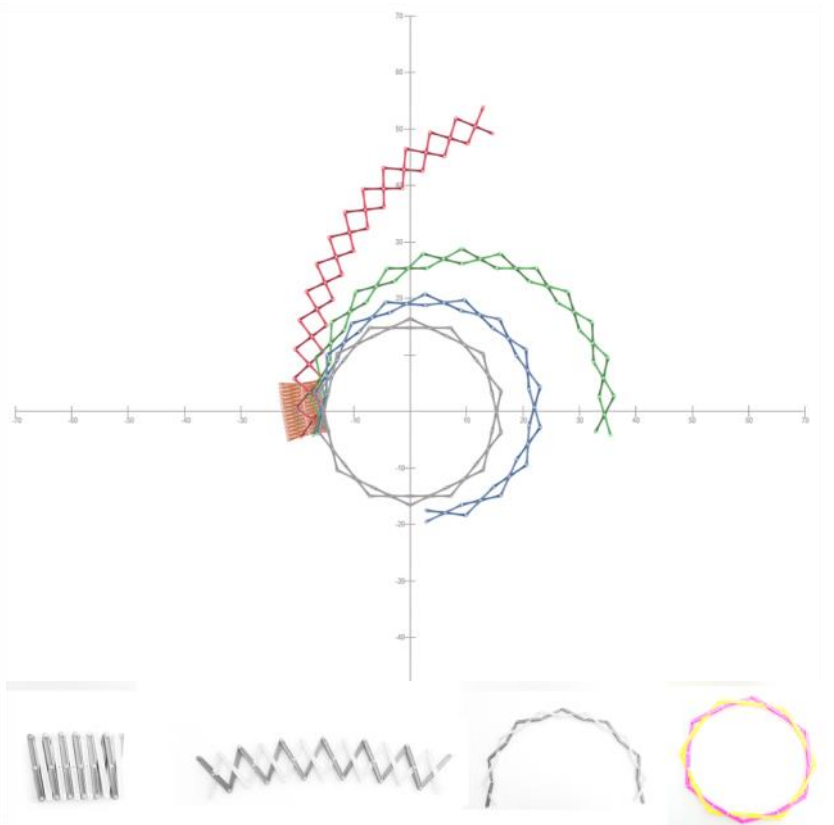
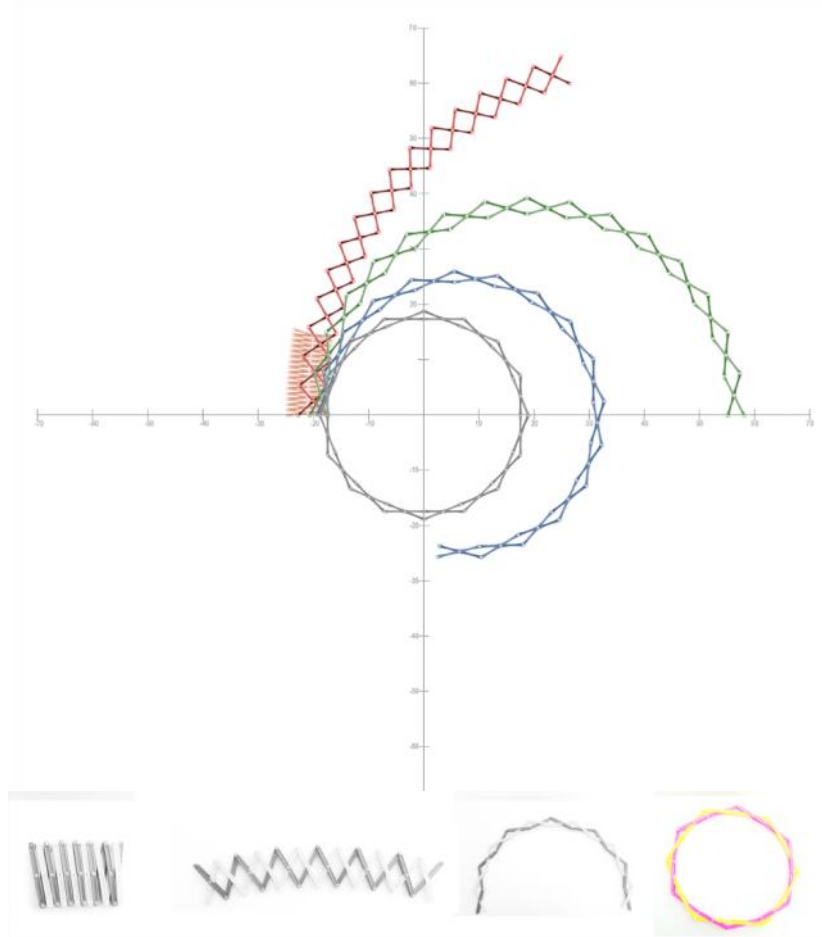


Figura 5.19 Etapas de despliegue. Heptágono estrellado.
Fuente: Elaboración del autor.

Figura 5.20 Etapas de despliegue. Octágono estrellado.
Fuente: Elaboración del autor.



El resultado de esta exploración a nivel de modelos físicos básicos y esquemas gráficos basados en la geometría de polígonos estrellados, es la comprobación de que el método se puede interpretar como la agrupaciones tijeras rectas que se pliegan y despliegan acertadamente, cumpliendo las condiciones de plegabilidad.

Además la posición de la articulación excéntrica define una geometría establecida y una posición de despliegue final, en el caso de los polígonos estrellados, esta sucede cuando el primer módulo de tijera se enlaza con la última tijera de la agrupación.

Se observa que la longitud máxima de extensión vertical positiva en los diferentes polígonos siempre excede el diámetro del polígono a desarrollar y va directamente relacionada con el número de módulos de tijera que incorpora el polígono. Por ejemplo, en el caso del octágono estrellado en esta etapa de despliegue, la posición de despliegue más crítica que se representa en la figura 5.15 color rosa, la longitud de extensión del arco desplegable, en este punto puede sobrepasar $1\frac{1}{2}$ del diámetro del polígono base.

Esta longitud se ha de tener en cuenta para el cálculo de las fuerzas y potencias a la hora de desplegar este tipo de estructuras y así mismo el espacio a considerar en los procesos de montaje y seguridad pertinente.

En cuando a la posición de despliegue que configura geometrías similares a arcos de medios puntos (arcos de color verde) se observa que el espesor o canto del arco es inversamente proporcional al número de módulos de tijeras que se incluyen en cada polígono, siendo el cuadrado estrellado el que representa un arco con mayor canto y el octágono estrellado con menor canto.

El cuestionamiento sobre el canto adecuado según la proporción del arco y comportamiento estructural, permiten definir la longitud de las barras de bloqueo del movimiento para garantizar la seguridad y estabilidad del arco en su posición final de despliegue.

En la posición plegada (arcos plegados de color naranja) el paquete compacto espacialmente equivale aproximadamente a menos de $\frac{1}{2}$ diámetro del polígono correspondiente, el grado de plegabilidad dependerá de la sección de la barra y el número de barras que se incorporen en la agrupación.

Llama la atención la configuración de arcos tipo herradura que se generan en la posición de despliegue con mayor extensión en la vertical negativa (arcos de color azul), a partir de esta geometría se propone la posibilidad de configurar varios tipos de arcos desplegados. Es así que partiendo de la geometría de polígonos estrellados en la posición final de despliegue (polígonos estrellados en gris), se definen tres categorías de arcos a proponer (figuras 5.21 a 5.23):

Arcos rebajados

Arcos de medio punto

Arcos de herradura

Figura 5.21 Configuración arco rebajado.

Fuente: Elaboración del autor.

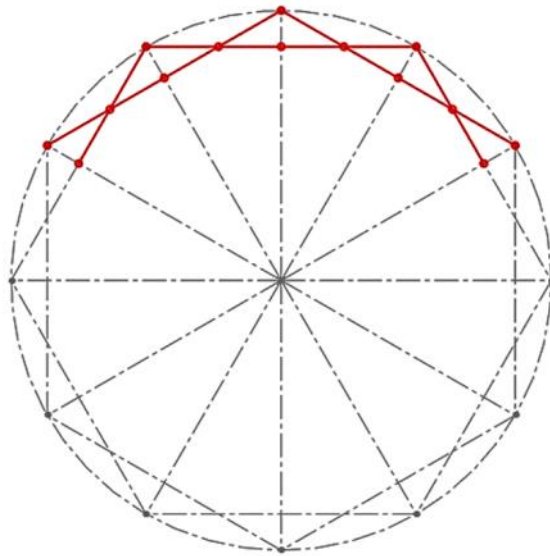


Figura 5.22 Configuración arco de medio punto.

Fuente: Elaboración del autor.

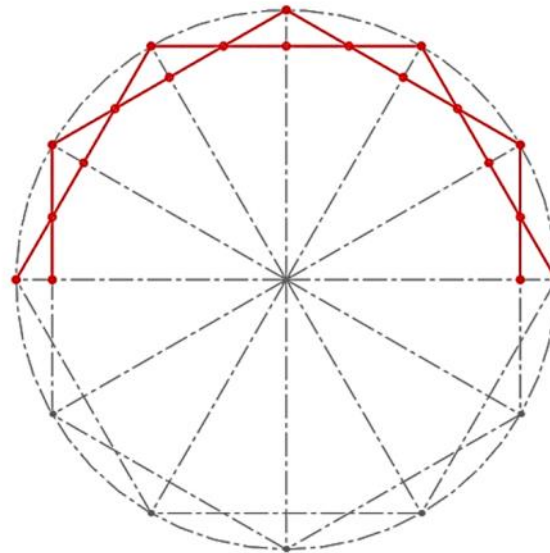
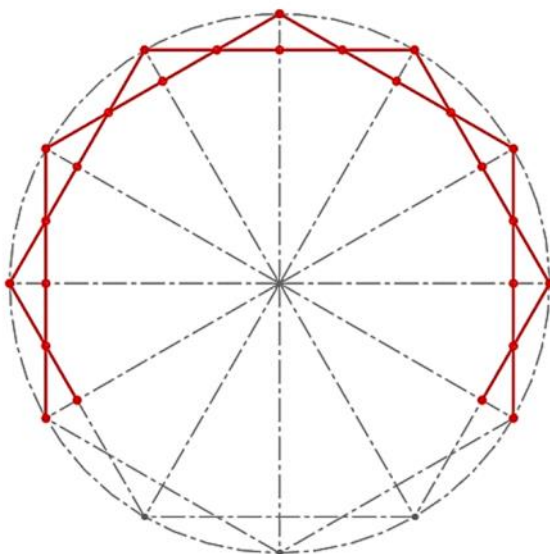


Figura 5.23 Configuración de arco de herradura.

Fuente: Elaboración del autor.



5.4 Geometrías resultantes método propuesto.

5.4.1 Configuración arcos desplegables

Para una mejor comprensión de las tipologías de los arcos resultantes de la superposición de polígonos regulares concéntricos, vistos en el apartado anterior, se describe las partes que componen un arco como elemento arquitectónico, para diferenciar las características de cada tipo de arco a desarrollar (figura 5.24).

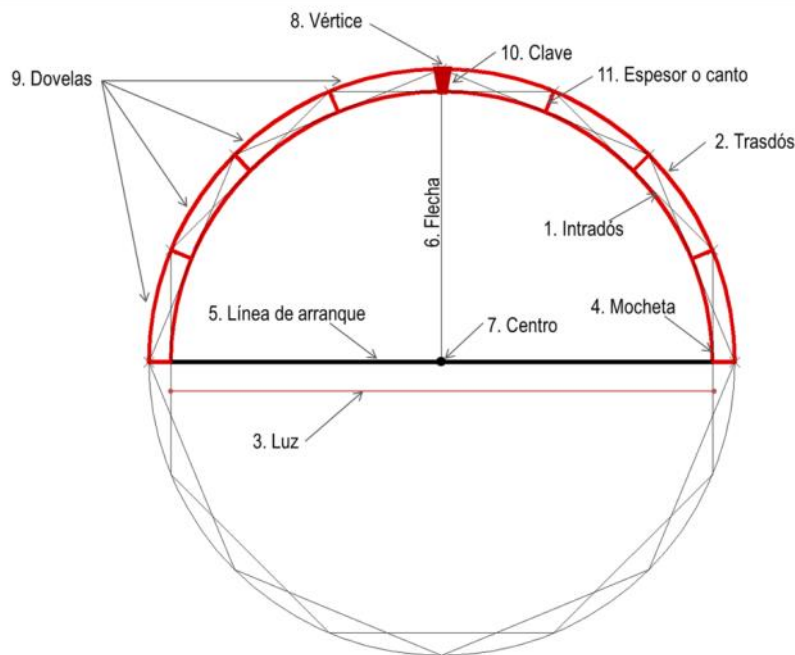


Figura 5.24 Partes de un arco.
Fuente: Elaboración del autor.

Basado en el texto Geometría de los arcos [75] p. 8 y 12 :

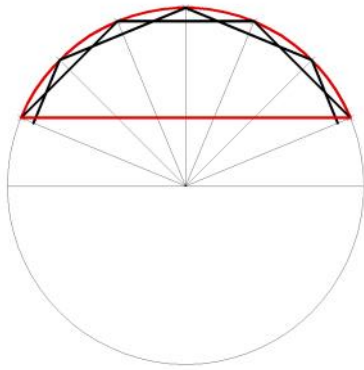
Intradós: Es la superficie que constituye la parte interior o inferior del arco.

Trasdós: Es la superficie que forma la parte exterior (o superior) del arco.

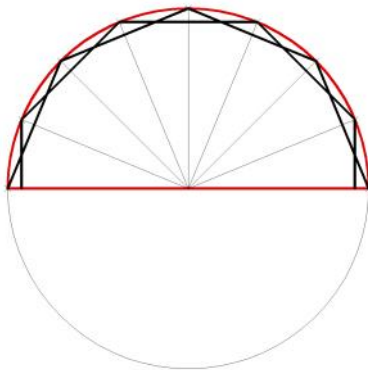
Luz: Es la distancia horizontal que existe entre las dos mochetas (o jambas) del arco.

Mocheta: Es el plano que al encontrarse con el arco define el plano que contiene a la línea de arranque.

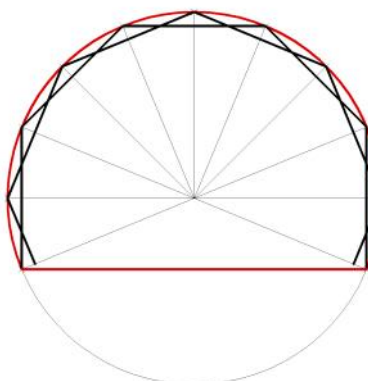
Línea de arranque: Es la que contiene los puntos donde comienza y termina el arco.



a.



b.



c.

Figura 5.25 Tipos de arcos.
a) Arco rebajado, b) Arco de medio punto, c) Arco de herradura.
Fuente: Elaboración del autor.

Flecha: Es la distancia comprendida entre la línea de arranque y el vértice.

Centro: Es el punto de confluencia entre el eje vertical y la línea de arranque.

Vértice: Es el punto más alto del arco y se encuentra en el eje vertical del mismo...

Dóvelas: Son las piezas que conforman el arco.

Clave: Es la dóvela central del arco [75].

Aunque se denominan las partes fundamentales para el presente estudio, cabe aclarar que según el tipo de arco, materiales, proceso de construcción y zona geográfica, pueden existir diferentes nomenclaturas o más elementos que conformen el arco.

Tipos de arcos

Si se toma la geometría basada en el octágono estrellado, se pueden diferenciar las tres tipologías de arcos a analizar en esta investigación. La diferencia fundamental está en la posición de la línea de arranque, que genera diferentes longitudes de flecha entre cada tipo de arco (figura 5.25).

Arco rebajado: La flecha es menor a la mitad de la longitud de la luz. El centro siempre está por debajo de la línea de arranque (figura 5.25 a).

Arco de medio punto: Corresponde a media circunferencia, su flecha es igual a la mitad de la longitud de la luz y el centro es el mismo de la circunferencia (figura 5.25 b).

Arco de herradura: Su forma se semeja a una herradura, el radio corresponde a la mitad de la longitud de la luz y su centro está por encima de la línea de arranque (figura 5.25 c). [59] p. 16-19.

En los polígonos con mayor cantidad de lados, que genera un mayor número de dóvelas, referidos a el heptágono y el octágono, es posible seleccionar más de un tipo de arco rebajado o de herradura, el presente estudio se limita a seleccionar un solo arco rebajado y uno de herradura por polígono.

De esta manera, los arcos rebajados a seleccionar en cada polígono son aquellos en que la línea de arranque es la más cercana al centro de la circunferencia y por encima de este, es decir, el arco rebajado inicia desde la segunda dóvela por encima del centro (figura 5.25 a).

Y en los arcos de herradura, la línea de arranque es la más cercana al centro de la circunferencia y por debajo de este, es decir, el arco de herradura inicia desde primera dóvela ubicada por debajo del centro (figura 5.25 c).

Solo en los polígonos con número de lados par (cuadrado, hexágono y octágono), es posible obtener el arco de medio punto, ya que siempre coincide un módulo de tijera, como la dóvela inicial, con la línea de arranque y con la mitad de la circunferencia. En cambio esto no sucede con los polígonos impares, para tener módulos de tijeras completas en la configuración del arco, se debe optar solo por seleccionar el arco rebajado o de herradura (figura 5.26).

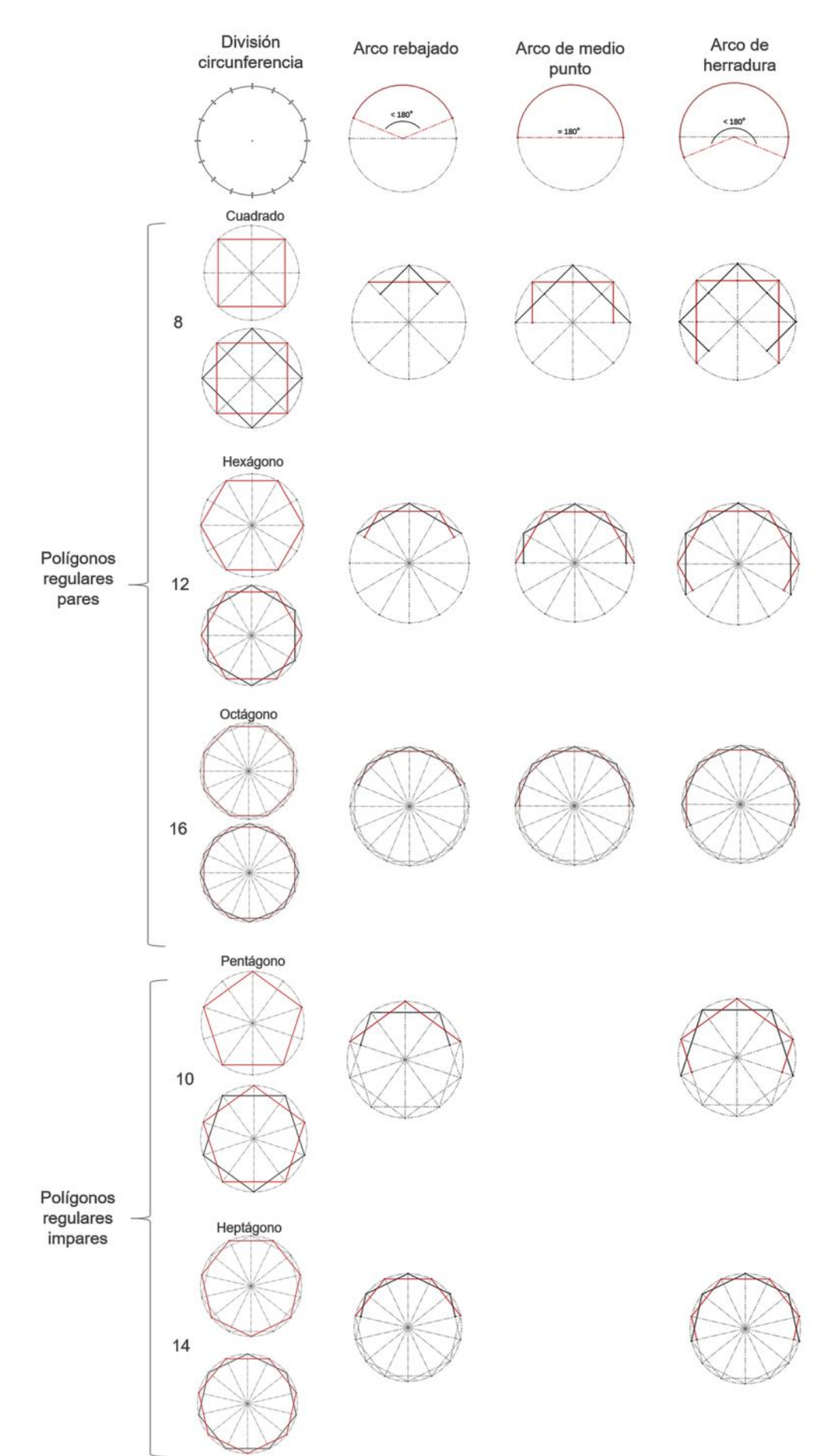


Figura 5.26 Tipos de arcos según polígono con número de lados par o impar. Fuente: Elaboración del autor.

5.4.2 Configuración de bóvedas desplegables

Con los arcos resultantes según los polígonos seleccionados, es posible desarrollar superficies desplegables a partir de la proyección de bóvedas (Tablas 3.16 a 3.19), generando una diversidad de posibles aplicaciones viables donde predomina el trabajo estructural en conjunto del arco y la membrana.

A continuación se expone las tablas descriptivas de las superficies resultantes según el polígono y el tipo de arco (tablas 5.1 a 5.5), las superficies a presentar son:

Bóveda de cañón, es la única superficie que se presenta como una agrupación continua de tijeras, ya vista en la tabla 3.5, para esta descripción se incorpora cuatro módulos de arcos paralelos, donde su geometría en la etapa final de despliegue es establecida por el polígono y el arco seleccionado (figura 3.27 a).

Bóveda de arista y bóveda esquifada, la curvatura del arco en la etapa final de despliegue, es igualmente definida por el polígono y el arco seleccionado (figura 3.27 b y c).

Bóveda anular y domo, la relación en planta y en elevación son correspondientes, es decir, se implementa en planta y en elevación la misma agrupación de tijeras según el polígono y el arco seleccionado. En ambos casos la fuerza horizontal que se usa para desplegar las tijeras en planta, sirve para desplegar los arcos verticales y obtener la superficie determinada (figura 3.27 d y e).

En el caso de la configuración de domos a partir de los polígonos regulares, se determina como elemento estructural la utilización de semiarcos, definidos como la sección media de cada arco según el polígono y arco correspondiente. Este planteamiento descrito en la tabla 3.19, permite disminuir la longitud de extensión del arco en la etapas de despliegue más críticas y aprovechar la geometría de los polígonos para el diseño de la clave con la correspondiente horizontalidad y así garantizar la correcta posición de la estructura en su estado final de despliegue.

Figura 5.27 Tipos de bóvedas a configurar según polígono y arcos.

Alzado, planta y axonometría.

a) Bóveda de cañón. b) Bóveda de arista. c) Bóveda esquifada.

d) Bóveda anular. e) Domo.

Fuente: Elaboración del autor.

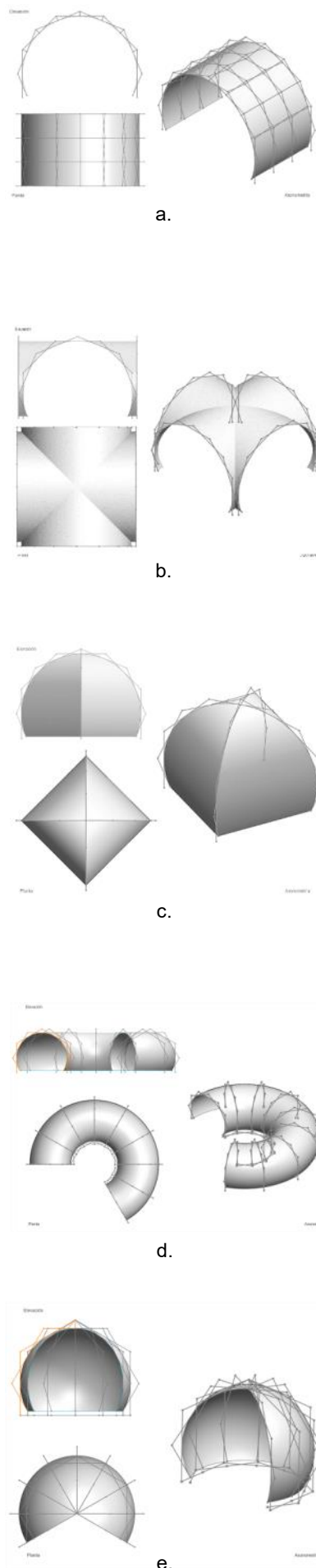


Tabla 5.1 Superficies desplegables a partir de la geometría de polígonos regulares.
Cuadrado. Fuente: Elaboración del autor.

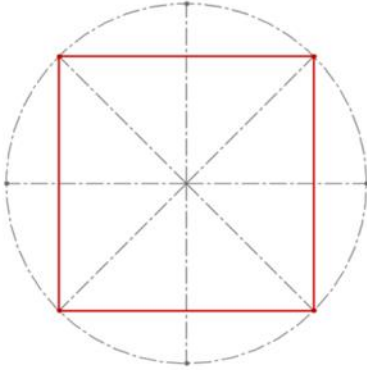
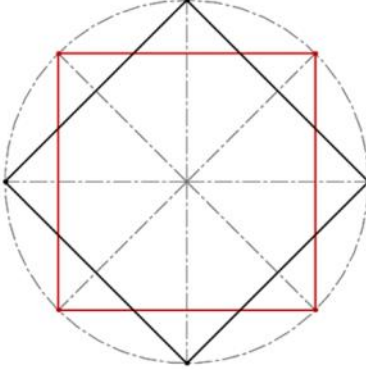

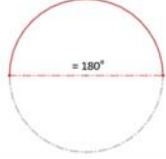
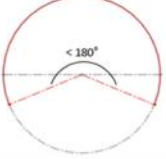
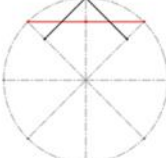
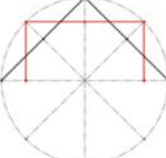
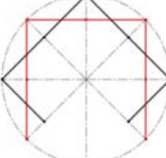
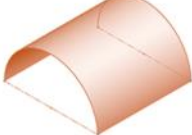
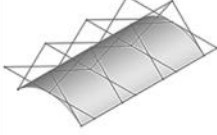
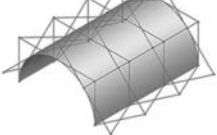
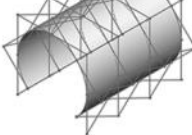




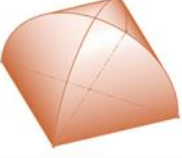


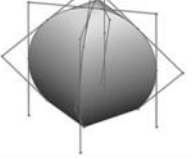

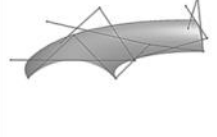

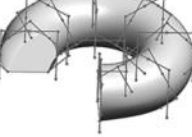
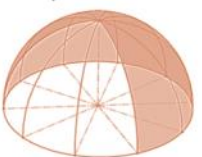

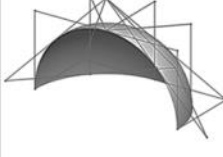
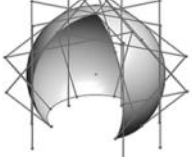
Polígono regular: Cuadrado		Polígono estrellado a partir del cuadrado		
				
TIPOS DE ARCO →	Arco rebajado 	Arco de medio punto 	Arco de herradura 	
TIPOS DE BÓVEDAS ↓				
Bóveda de cañón				
Bóveda de arista				
Bóveda esquinada				
Bóveda anular				
Cúpula o domo				

Tabla 5.2 Superficies desplegables a partir de la geometría de polígonos regulares.

Fuente: Elaboración del autor.

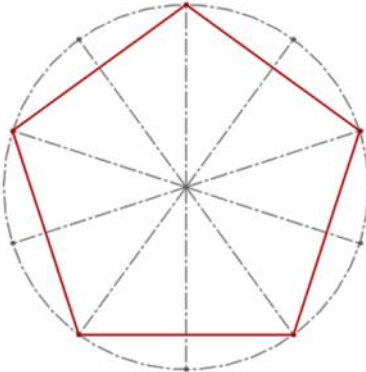
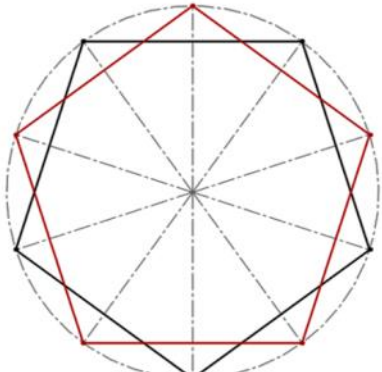
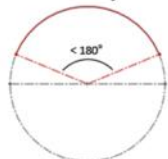
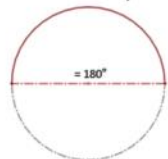
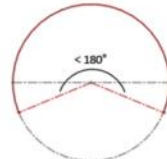
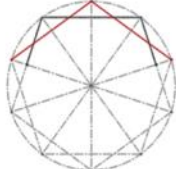
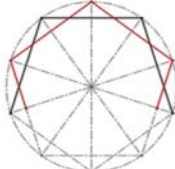
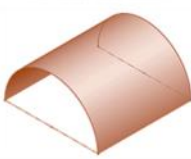
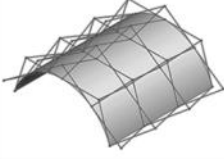
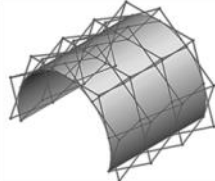







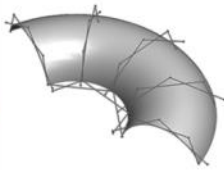
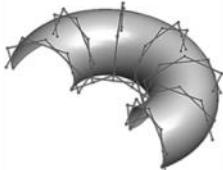
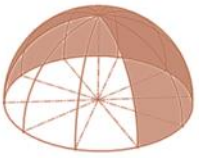
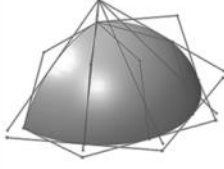
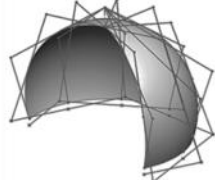
	Polígono regular: Pentágono	Pentágono	Polígono estrellado a partir del pentágono	
				
TIPOS DE ARCO →	Arco rebajado 	Arco de medio punto 	Arco de herradura 	
TIPOS DE BÓVEDAS ↓				
Bóveda de cañón				
Bóveda de arista				
Bóveda esquifada				
Bóveda anular				
Cúpula o domo				

Tabla 5.3 Superficies desplegables a partir de la geometría de polígonos regulares.

Fuente: Elaboración del autor.

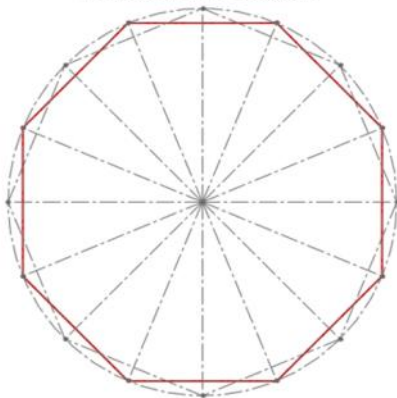
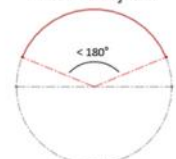
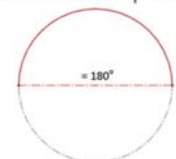
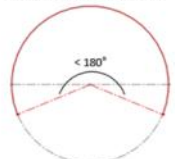
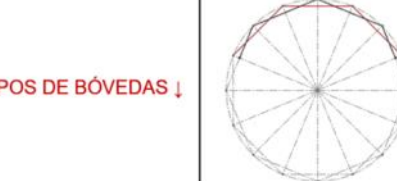
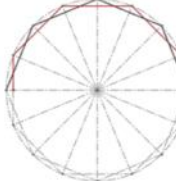
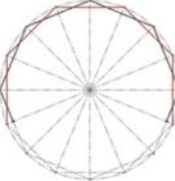

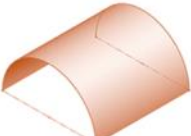
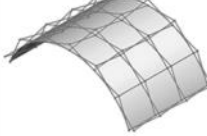
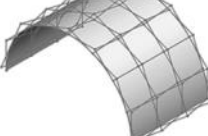
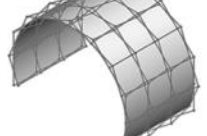


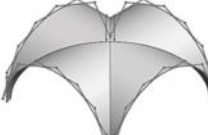





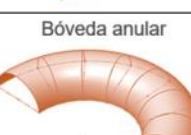
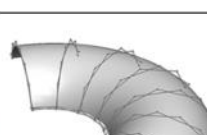
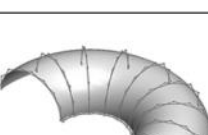
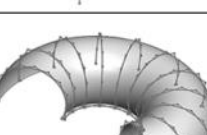


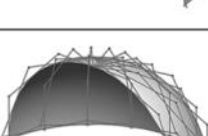

	Polígono regular: Hexágono	Polígono estrellado a partir del hexágono		
TIPOS DE ARCO →		Arco rebajado 	Arco de medio punto 	Arco de herradura
TIPOS DE BÓVEDAS ↓				
Bóveda de cañón				
Bóveda de arista				
Bóveda esquinada				
Bóveda anular				
Cúpula o domo				

Tabla 5.4 Superficies desplegables a partir de la geometría de polígonos regulares.

Fuente: Elaboración del autor.

	Polígono regular: Heptágono	Polígono estrellado a partir de heptágono		
TIPOS DE ARCO →	Arco rebajado 	Arco de medio punto 	Arco de herradura 	
TIPOS DE BÓVEDAS ↓				
Bóveda de cañón				
Bóveda de arista				
Bóveda esquifada				
Bóveda anular				
Cúpula o domo				

Tabla 5.5 Superficies desplegables a partir de la geometría de polígonos regulares. Octágono.
Fuente: Elaboración del autor.

	Polígono regular: Octágono	Polígono estrellado a partir del octágono		
TIPOS DE ARCO →		Arco rebajado 	Arco de medio punto 	Arco de herradura 
TIPOS DE BÓVEDAS ↓				
Bóveda de cañón				
Bóveda de arista				
Bóveda esquifada				
Bóveda anular				
Cúpula o domo				

5.5 Cálculo longitud de barra y posicionamiento de la articulación excéntrica

El interés de esta investigación radica en proponer un método geométrico para hallar la posición de la articulación excéntrica de un módulo de tijera, así mismo, obtener la longitud de barra necesaria para posicionar dicha articulación y conseguir el mayor número de barras iguales para configurar arcos desplegados que forman superficies desplegadas variables según las descritas en el anterior apartado.

El método geométrico establecido para la configuración de arcos desplegados a partir de polígonos regulares, permite hallar a través de fórmulas trigonométricas las características de la barra, incorporando dos variables según el diseño que se requiera, la longitud de barra a utilizar o el diámetro que se necesite.

Se presenta en la figura 5.28 (siguiente página), el esquema de un heptágono estrellado como ejemplo y gráfico estándar para establecer los términos a utilizar en la formulación de ecuaciones y de esta forma hallar la posición de la articulación excéntrica, partiendo de una longitud de barra o diámetro solicitado, determinados por el criterio del usuario.

El cálculo se complementa con el desarrollo de las tablas 5.6 y 5.7, que se implementan como una herramienta informática de Excel [132], que arroja los valores necesarios para definir la posición de la articulación excéntrica según el polígono utilizado, junto con el diámetro y el radio resultante, siendo variables los valores a introducir referidos a la longitud de barra (c), el diámetro requerido (d) y el número de lados del polígono (n).

De esta forma, se expone el diseño de hojas de cálculo en Excel [132], diagramadas para facilitar la interacción del usuario para cargar los valores requeridos y programadas con las ecuaciones trigonométricas correspondientes para hallar los valores específicos y obtener el dimensionamiento de arcos desplegados configurados a partir de la agrupación de módulos tijeras rectas.

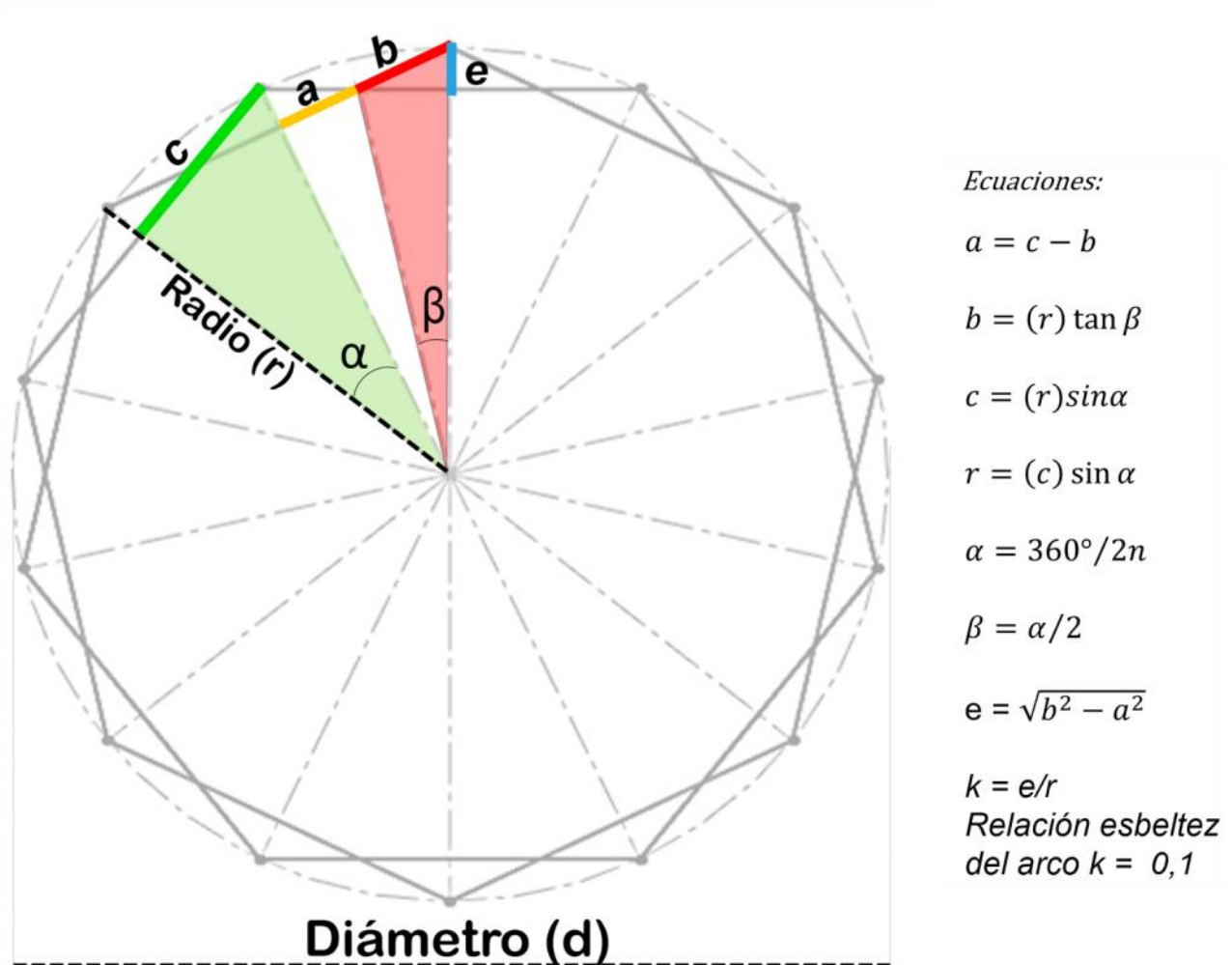


Figura 5.28 Esquema gráfico definición de términos para hallar la longitud de barra y espesor del arco, a partir de fórmulas trigonométricas.

Fuente: Elaboración del autor

Se establece entonces los siguientes términos (figura 5.28):

- a: Distancia correspondiente al **tramo corto** sobre el eje longitudinal de la barra recta, longitud desde el centro de la articulación extrema al centro de la articulación excéntrica
- b: Distancia correspondiente al **tramo largo** sobre el eje longitudinal de la barra recta, longitud desde el centro de la articulación extrema al centro de la articulación excéntrica
- c: Longitud de la barra, entre ejes de las articulaciones extremas.
- r: Radio de la circunferencia base
- d: Diámetro circunferencia base
- n: Número de lados del polígono seleccionado
- α : Ángulo que abarca un módulo de tijera.
- β : Ángulo que abarca medio módulo de tijera.
- e: Corresponde al espesor o canto del arco. Distancia que define la apertura máxima entre los vértices extremos del tramo largo y el tramo corto del módulo de tijera, en su etapa final de despliegue. Así como la dimensión del alto requerido para el diseño de la clave.

El valor (e), define si la esbeltez del arco es adecuada o no, en relación a la luz que cubre establecida por el diámetro del polígono seleccionado.

Para ello el valor de e , habrá de cumplir la relación:

$$k = e/r$$

$$k=0.1 \text{ (ver apartado 5.1)}$$

Donde (e) es el espesor y (r) el radio medio. [44] pp. 95.

Esta relación generada a partir de estudios previos fundamentados matemáticamente y experimentalmente, se basa igualmente en el método geométrico, utilizado desde la antigüedad, de sobreponer una catenaria invertida en el interior del arco en cuestión y hallar así, el espesor adecuado (Heyman, 1999, como se cito en Huerta [43] pp. 580 y 590 (figura 5.29).



Figura 5.29 Principio de la catenaria invertida para establecer el espesor de arcos (Heyman 1999, como se cito en Huerta [43]) proyectado en un polígono estrellado, que configura una agrupación de tijeras rectas para formar arcos desplegables.

Fuente: Elaboración del autor

5.5.1 Cálculo de la barra a partir de la longitud requerida

Se expone en la tabla 5.6 la configuración de celdas en formato Excel, para calcular la posición de la articulación excéntrica, partiendo de una longitud de barra requerido y un número de lados del polígono seleccionado.

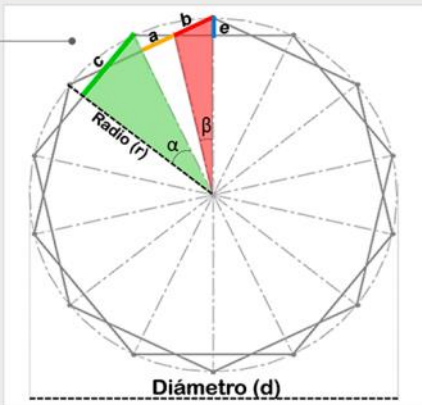
Interpretación de la tabla 5.6:

1. Esquema gráfico, definición de términos a utilizar en las ecuaciones.
2. Longitud de barra (c). Valor variable a ingresar por el usuario
3. Número de lados del polígono (n). Valor variable a ingresar por el usuario.
4. Esquema gráfico de la barra. Posicionamiento de la articulación excéntrica según definición del tramo corto (a) y del tramo largo (b).
5. Ecuaciones para resolver las distancias de (a), (b), y (c).
6. Resultados. Valores en metros de (a), (b), y (c).
7. Resultados y ecuaciones para hallar los valores de los términos faltantes (d), (r), (e), α y β , y comprobación de la esbeltez del arco con la relación $k = e/r$ $k = 0.1$

Tabla 5.6 Definición de la barra a partir de la longitud de la barra.
Fuente: Elaboración del autor

DEFINICIÓN DE LA BARRA A PARTIR DE LA LONGITUD DE BARRA (c)

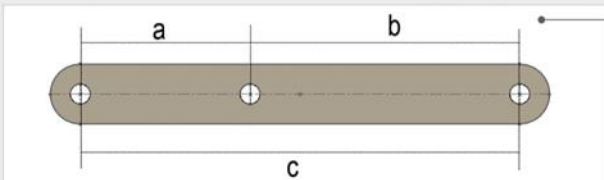
ESQUEMA GEOMÉTRICO



Diámetro (d)

RESULTADOS

POSICIÓN PUNTOS DE ARTICULACIÓN DE LA BARRA



DISTANCIAS DETERMINADAS ENTRE EJES (MTS)

a	b	c
c - b	(r)Tanβ	Long. barra
0,71	0,79	1,50

OTROS VALORES (MTS)

ESPESOR (e) (MTS) =	$\sqrt{b^2 - a^2} =$	0,34
k=0,1	e/r=	0,10
DIÁMETRO (d) (MTS) =	2r =	6,91
RADIO (r) (MTS) =	c/senα =	3,46
ÁNGULO α (GRAD) =	360°/2n =	25,71
ÁNGULO β (GRAD) =	α/2 =	12,86

INGRESE VALOR

LONGITUD DE BARRA (c) (MTS)	1,50
NÚMERO DE LADOS POLIGONO (n)	7

245

5.5.2 Cálculo de la barra a partir del diámetro requerido

La tabla 5.7 expone la configuración de las celdas en formato Excel, donde se determina la longitud de la barra y posicionamiento de la articulación excéntrica necesaria a partir de un valor de diámetro requerido (d), este será el valor variable a ingresar en la tabla correspondiente, junto con el número de lados del polígono a seleccionar.

Interpretación de la tabla 5.7:

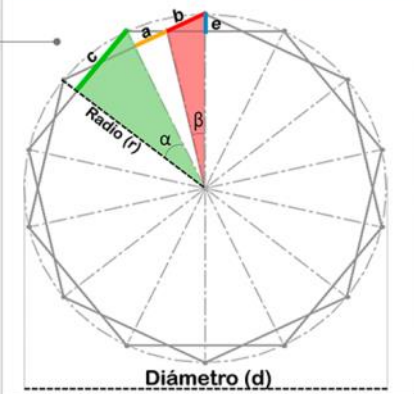
1. Esquema gráfico, definición de términos a utilizar en las ecuaciones.
2. Diámetro (d). Valor variable a ingresar por el usuario
3. Número de lados del polígono (n). Valor variable a ingresar por el usuario.
4. Esquema gráfico de las barra. Posicionamiento de la articulación excéntrica según definición del tramo corto (a) y del tramo largo (b).
5. Ecuaciones para resolver las distancias de (a), (b), y (c).
6. Resultados. Valores en metros de (a), (b), y (c).
7. Resultados y ecuaciones para hallar los valores de los términos faltantes (r), (e), α y β y comprobación de la esbeltez del arco con la relación $k = e/r$ $k = 0.1$

Tabla 5.7 Definición de la barra a partir del diámetro.

Fuente: Elaboración del autor

DEFINICIÓN DE LA BARRA A PARTIR DEL DIÁMETRO (d)

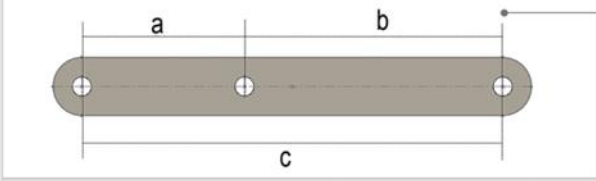
ESQUEMA GEOMÉTRICO



Diámetro (d)

RESULTADOS

POSICION PUNTOS DE ARTICULACION DE LA BARRA



DISTANCIAS DETERMINADAS ENTRE EJES (MTS)

a <small>c - b</small>	b <small>(r)Tanβ</small>	c <small>(r)senα</small>
0,62	0,68	1,30

OTROS VALORES (MTS)

ESPESOR (e) (MTS) = $\sqrt{b^2 - a^2}$ =	0,30
<small>k=0,1</small>	<small>e/r=</small> 0,10
DIÁMETRO (d) (MTS) =	<small>d=</small> 6,00
RADIO (r) (MTS) =	<small>d/2=</small> 3,00
ÁNGULO α (GRAD) =	<small>360°/2n =</small> 25,71
ÁNGULO β (GRAD) =	<small>α/2 =</small> 12,86

INGRESE VALOR

DIÁMETRO (d) (MTS)	6,00
NÚMERO DE LADOS POLÍGONO (n)	7

3

$$e = \sqrt{b^2 - a^2}$$

$$g = (r) \sin \beta$$

Arco rebajado

$$h = r - (e + g)$$

$$f = h + e$$

Arco herradura

$$h = g + (r - e)$$

$$f = h + e$$

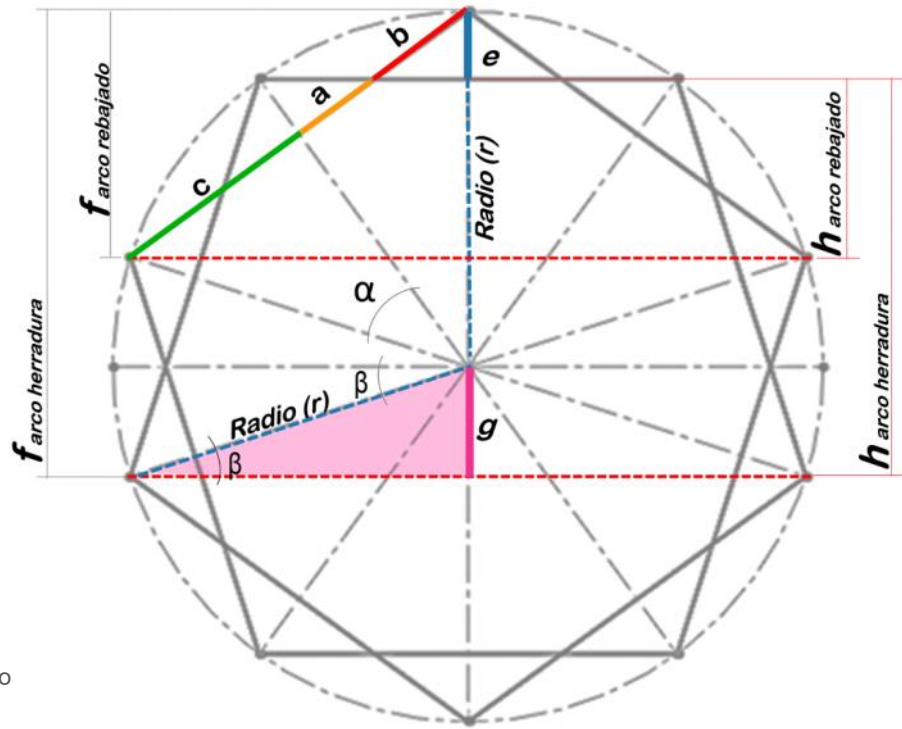


Figura 5.30 Esquema gráfico para polígonos impares. Definición de términos para hallar la altura libre (h), flecha (f) y espesor (e) de cada tipo de arco. Fuente: Elaboración del autor

$$e = \sqrt{b^2 - a^2}$$

Arco rebajado

$$h = r - (c + e)$$

$$f = h + e$$

Arco medio punto

$$h = r - e$$

$$f = r$$

Arco herradura

$$h = c + (r - e)$$

$$f = h + e$$

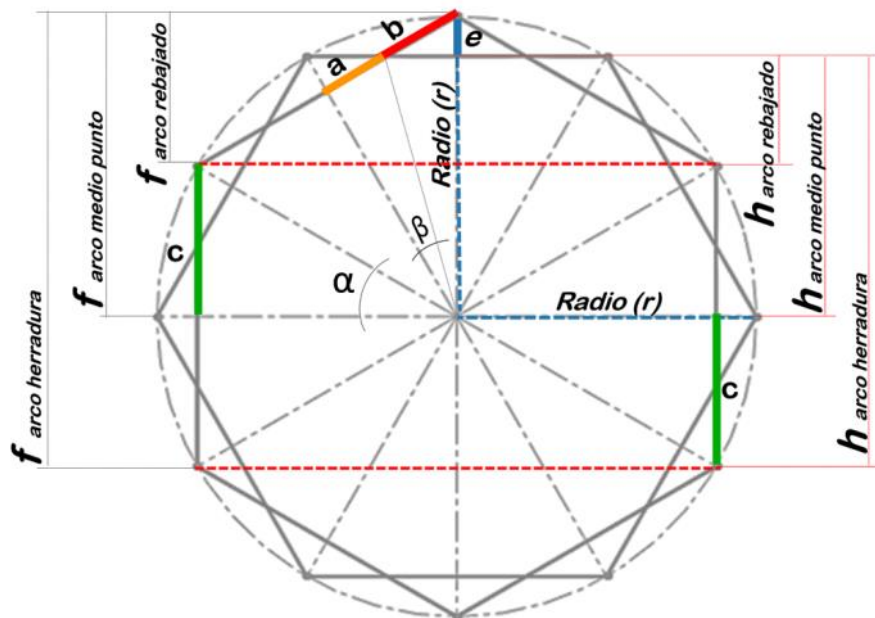


Figura 5.31 Esquema gráfico para polígonos pares. Definición de términos para hallar la altura libre (h), flecha (f) y espesor (e) de cada tipo de arco. Fuente: Elaboración del autor

5.5.3 Cálculo altura libre, flecha y canto

La geometría de los polígonos regulares estrellados, también permite establecer los términos para generar las ecuaciones y hallar la altura libre (h), la flecha (f) y el canto o espesor (e) de un arco determinado.

Se ha de recordar que en los polígonos con número par de lados es posible seleccionar los tres tipos de arcos propuestos (rebajado, de medio punto y de herradura), pero en los polígonos con número impar de lados, solo es posible obtener arcos rebajados y arcos de herradura (figura 5.26).

De esta forma se presentan en las figuras 5.30 y 5.31 el esquema gráfico para generar los términos de las correspondientes fórmulas trigonométricas y hallar los valores de (h), (f) y (e).

Manteniendo la nomenclatura de la figura 5.28, se establece que:

e : Corresponde al espesor del arco.

h : Corresponde a la altura libre. Distancia vertical desde la línea de arranque hasta el límite interno del arco.

f : Flecha. Corresponde a la altura total del arco. Distancia vertical desde la línea de arranque hasta el límite externo del arco.

La tabla 5.8 arroja los resultados de (h), (f) y (e) según los valores introducidos a criterio por el usuario, ya sea a partir de la longitud de barra o del diámetro necesario para un diseño específico.

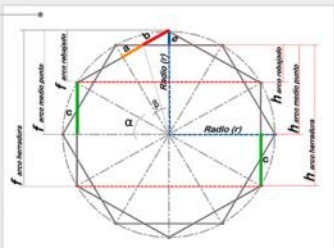
Para la interpretación de la tabla y proceso de cumplimentación de los datos que requiere la tabla, se debe seleccionar la columna específica referida al tipo de polígono a utilizar, siendo la columna izquierda correspondiente a los polígonos pares y la columna derecha a los polígonos impares. (Tabla 5.8, siguiente página).

CÁLCULO DE ALTURA LIBRE, FLECHA Y CANTO - ARCOS DESPLEGABLES

INGRESE VALOR PARA UN POLÍGONO PAR

ESQUEMA - POLÍGONO PAR

POLÍGONOS PARES



VALORES SEGÚN TIPO DE ARCO (MTS)

ESPESOR (e) = $\sqrt{b^2 - a^2} =$

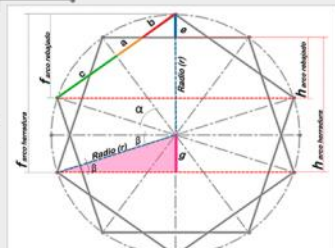
RELACIÓN ESBELTEZ ARCO $k = 0,1$ $er =$

	ALtura Libre (h) Rebajado = $r - (c + k) =$	<input type="text" value="1,10"/>	
	FLECHA (f) Rebajado = $h + k =$	<input type="text" value="1,50"/>	
	ALtura Libre (h) Medio punto = $r - k =$	<input type="text" value="2,80"/>	
	FLECHA (f) Medio punto = $r =$	<input type="text" value="3,00"/>	
	ALtura Libre (h) Herradura = $c + (r - k) =$	<input type="text" value="4,10"/>	
	FLECHA (f) Herradura = $h + k =$	<input type="text" value="4,50"/>	

INGRESE VALOR - PARA UN POLÍGONO IMPAR

ESQUEMA - POLÍGONO IMPAR

POLÍGONOS IMPARES



VALORES SEGÚN TIPO DE ARCO (MTS)

ESPESOR (e) = $\sqrt{b^2 - a^2} =$

RELACIÓN ESBELTEZ ARCO $k = 0,1$ $er =$

$(g) = (r) \text{sen } \beta =$

	ALtura Libre (h) Rebajado = $r - (g + e) =$	<input type="text" value="2,04"/>	
	FLECHA (f) Rebajado = $h + e =$	<input type="text" value="2,33"/>	
	ALtura Libre (h) Herradura = $(r - e) + g =$	<input type="text" value="3,37"/>	
	FLECHA (f) Herradura = $h + e =$	<input type="text" value="3,67"/>	

Tabla 5.8 Cálculo de la altura libre, flecha y espesor de arcos despleables.

Fuente: Elaboración del autor

1. Columna para polígonos pares.
2. Esquema gráfico, definición de términos a utilizar en las ecuaciones. Polígono par
3. Valores a ingresar por el usuario. Definidos en las tablas 5.6 y 5.7.
4. Resultado. Espesor del arco (e). Y valor de la relación entre espesor y radio de arco (k), definido en $k = 0.1$.
5. Resultados altura libre (h) y flecha (f) de los arcos generados (rebajado, medio punto y herradura) a partir de polígonos estrellados regulares y pares.

6. Columna para polígonos impares.
7. Esquema gráfico definición de términos a utilizar en las ecuaciones.
Polígono impar
8. Valores a ingresar por el usuario. Definidos en las tablas 5.6 y 5.7
9. Resultado. Valor de (e) para todos los tipos de arco.
10. Resultado. Valor de (g) para todos los tipos de arco.
11. Resultados altura libre (h) y flecha (f) de los arcos generados (rebajado y herradura) a partir de polígonos estrellados regulares e impares.

5.6 Conclusiones

Las tablas interactivas diseñadas como tablas de cálculo en Excel [132], validan el método geométrico a partir de polígonos regulares estrellados, para configurar arcos desplegados, optimizando los procesos de diseño y búsqueda de la forma, además de aportar información acerca de dimensiones de los arcos y específicamente del posicionamiento de la articulación excéntrica sobre de barra, obteniendo una geometría idónea que permite la generación de domos desplegados a partir de la agrupación de semiarcos que se juntan en la cúspide (tabla 3.19).

Este método es definido gracias a la exploración geométrica en modelos físicos y digitales, de agrupaciones de módulos de tijeras con articulación excéntrica, que generan diferentes posibilidades de curvas variables durante las etapas de despliegue. La etapa final de despliegue de cada agrupación, describe la definición de algún tipo de polígono estrellado y es a partir de aquí, que la investigación se limita a estudiar el cuadrado, el pentágono, el hexágono, el heptágono y el octágono, proyectados como polígonos estrellados que permiten generar configuraciones espaciales de bóvedas y domos, partiendo de la definición de los arcos que generan estas figuras: arco rebajado, de medio punto y de herradura.

El estudio de la geometría en los polígonos estrellados y la selección del arco a proyectar, genera de forma propia las ecuaciones trigonométricas para facilitar la búsqueda de la forma y dimensionamiento de un arco requerido.

Las tablas interactivas 5.6, 5.7 y 5.8 se proponen como una herramienta informática dentro de la plataforma de Excel, implementando una configuración simple de celdas, programadas con ecuaciones trigonométricas, para facilitar la búsqueda de la forma de arcos desplegados y hallar valores para las dimensiones de dichos arcos, generados a partir del método de polígonos regulares estrellados. De forma intuitiva el usuario puede introducir, la longitud de la barra o diámetro a utilizar, seleccionar el tipo de polígono y arco de preferencia que se ajuste a los requerimientos de diseño o espacio útil requerido.

Es importante señalar que se ha de compaginar los arcos resultantes generados con este método, con la viabilidad constructiva, estabilidad estructural, estética y proporcionalidad de los mismos. Y el factor más importante que influye, a la hora de proyectar arcos, es su espesor.

Partiendo de la validez estructural de arcos que soportan su propio peso, un arco donde se visualiza un relación de esbeltez demasiado alta, es decir, muy delgado, seguramente colapsará. Al contrario si es demasiado grueso, se visualiza una desproporción, entre material y la luz a cubrir.

Para ello la importancia de cumplir el valor (k), la relación entre espesor y radio $k = e/r$, que históricamente se ha definido con el valor de $k = 0.1$ (como se cito en [44] pp. 95).

Relación espesor de arco $k = e/r - k = 0,1$					
Longitud de barra m	Cuadrado (4)	Pentágono (5)	Hexágono (5)	Heptágono (7)	Octágono (8)
0,50	0,29	0,19	0,13	0,10	0,08
0,75	0,29	0,19	0,13	0,10	0,08
1,00	0,29	0,19	0,13	0,10	0,08
1,25	0,29	0,19	0,13	0,10	0,08
1,50	0,29	0,19	0,13	0,10	0,08
1,75	0,29	0,19	0,13	0,10	0,08
2,00	0,29	0,19	0,13	0,10	0,08

Relación espesor de arco $k = e/r - k = 0,1$					
Diámetro m	Cuadrado (4)	Pentágono (5)	Hexágono (5)	Heptágono (7)	Octágono (8)
2,00	0,29	0,19	0,13	0,10	0,08
4,00	0,29	0,19	0,13	0,10	0,08
6,00	0,29	0,19	0,13	0,10	0,08
8,00	0,29	0,19	0,13	0,10	0,08
10,00	0,29	0,19	0,13	0,10	0,08
12,00	0,29	0,19	0,13	0,10	0,08
14,00	0,29	0,19	0,13	0,10	0,08

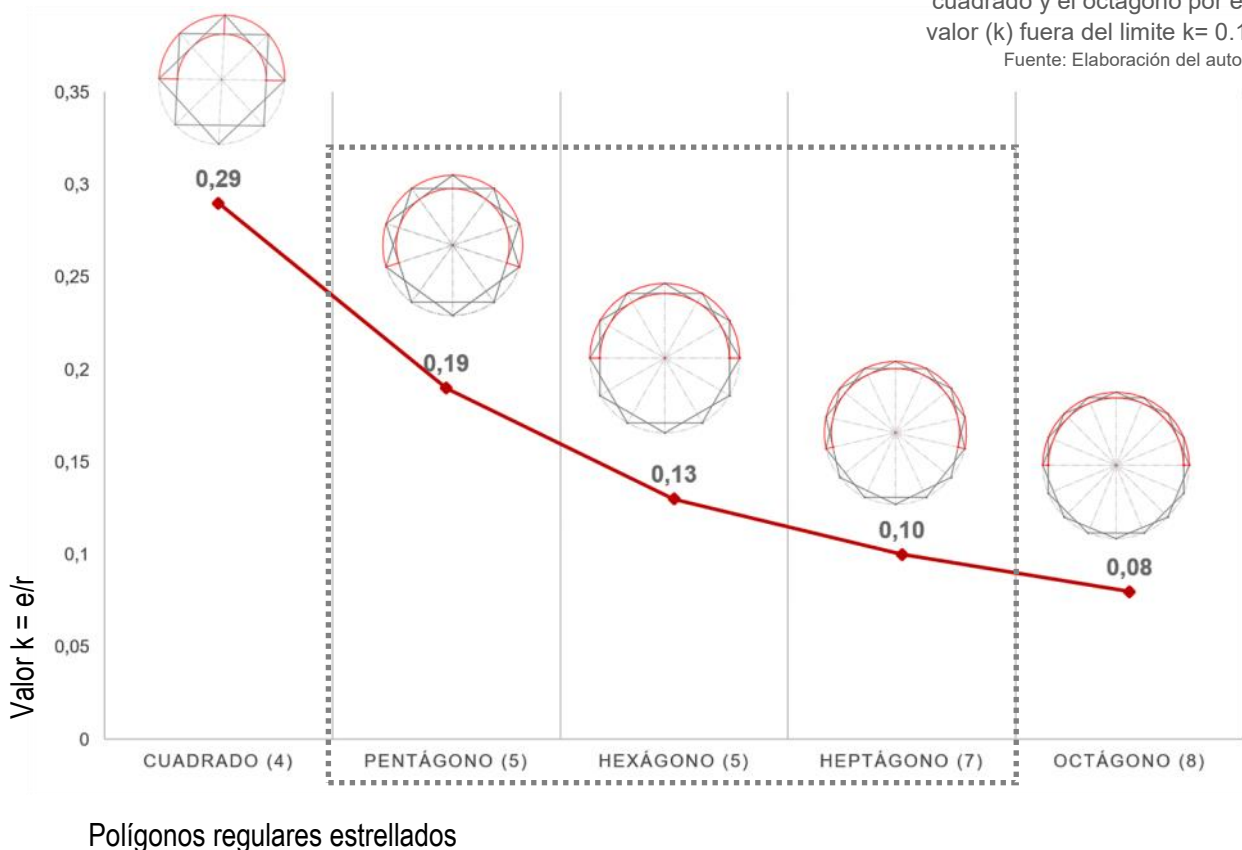
Tabla 5.9 Relación espesor de arco $k=e/r$ en polígonos regulares estrellados, a partir de la longitud de barra y el diámetro
Fuente: Elaboración del autor

La tabla 5.9 expone diferentes valores de longitud de barra y de diámetros para la configuración de arcos, arrojando el valor (k) para el cuadrado, pentágono, hexágono, heptágono y octágono, respectivamente. En rojo los valores (k) que son mayores o menores a 0.1.

Se observa que la relación geométrica e/r , siempre dará el mismo resultado con cualquier valor utilizado en la longitud de la barra o del diámetro establecido por polígono. Los valores críticos se visualizan en el cuadrado y el octágono, de esta forma se descarta en la investigación, la posibilidad de proyectar arcos desplegables partiendo del cuadrado y del octágono, y demás polígonos de más de ocho lados, ya que la configuración geométrica establece, que el cuadrado tendrá una relación de espesor muy grueso ($k = 0.29$) y a partir del octágono espesores muy delgados ($k = 0.08$) que no garantizan la estabilidad estructural de arco.

La gráfica complementaria a la tabla 5.9 (figura 5.32), expone la proporción de los arcos resultantes, según el polígono y valor (k) resultante, enmarcando las geometrías que serán viables para la proyección de domos desplegables a nivel constructivo.

Figura 5.32 Gráfica de los espesores de arcos generados a partir de polígonos regulares estrellados. El recuadro limita las geometrías a desarrollar en la investigación, descartando el cuadrado y el octágono por el valor (k) fuera del límite $k = 0.1$
Fuente: Elaboración del autor







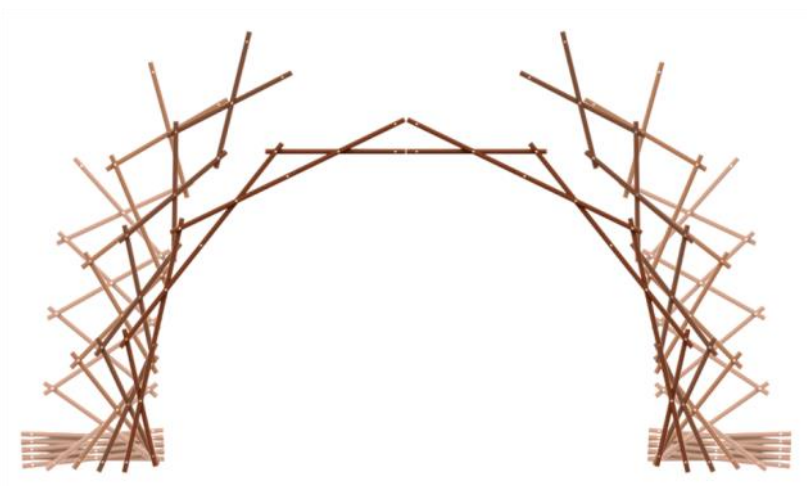
CAPÍTULO

6

Arcos desplegados

A partir del método geométrico propuesto en esta investigación para la configuración de arcos desplegados, basado en la geometría de polígonos regulares estrellados y proyectados como agrupación de módulos de tijeras rectas. Se procede a definir las características geométricas, estructurales y constructivas de una geometría específica de un domo desplegable, con el objetivo de analizar el comportamiento del arco desplegable en diferentes etapas de despliegue.

Los resultados expuestos en el presente capítulo, generados gracias a los procesos de simulación realizados en el programa WinEva8 © [136], describen las deformaciones elásticas y los esfuerzos producidos en dos dimensiones del arco, posicionado en tres etapas diferentes de despliegue.



Contenido del capítulo

6.1 Geometría seleccionada para la proyección de domos desplegables.....	258
6.2 Sistema de montaje	260
6.3 Análisis 2d de semiarcos en WinEva (v. 8)	266
6.3.1 Dimensionamiento y características del semiarco	266
6.3.2 Discretización e introducción de datos para WinEva (v. 8)	269
6.3.3 Generalidades para el análisis	272
6.4 Análisis etapas de despliegue	275
6.4.1 Posición plegada	276
6.4.2. Posición intermedia	278
6.4.3 Posición desplegada	286
6.4.4 Posición ideal de despliegue	294
6.5 Conclusiones	304

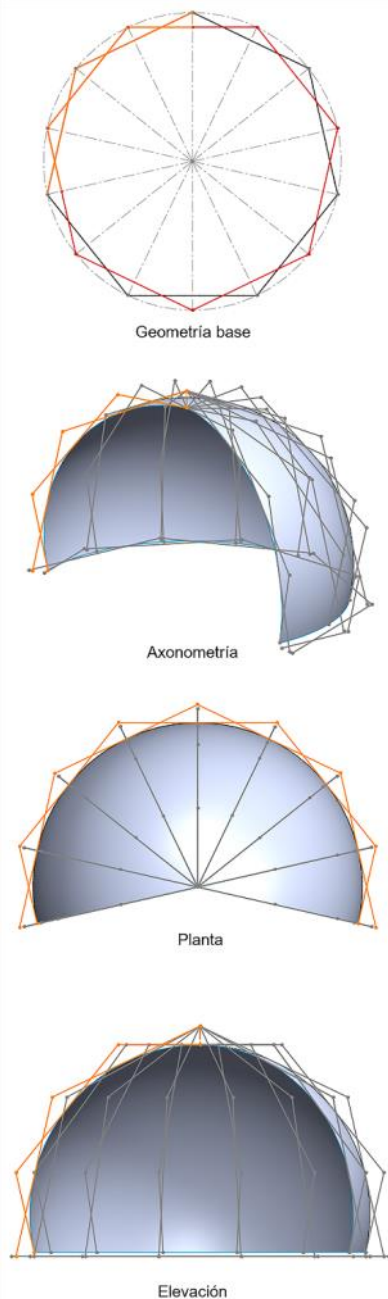
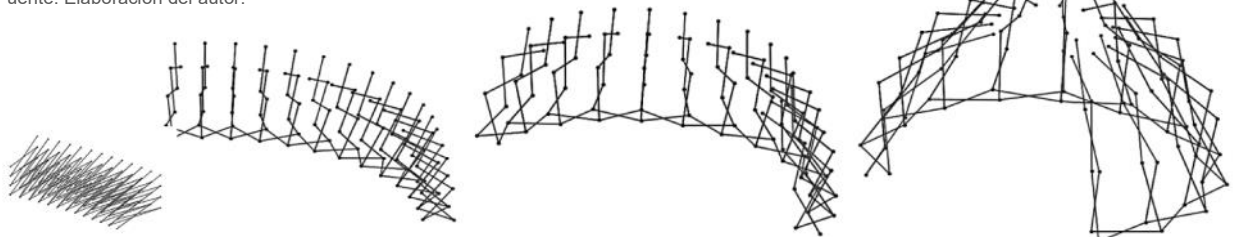


Figura 6.1 Domo desplegable a partir de la geometría del heptágono.

Fuente: Elaboración del autor.

Figura 6.3 Proceso de despliegue de semiarcos. Configuración de domo.

Fuente: Elaboración del autor.



6.1 Geometría seleccionada para la proyección de domos desplegables

Se considera para este apartado, que refiere al análisis del comportamiento de los arcos plegables, la selección de una geometría determinada generada a partir del método geométrico propuesto.

Se opta por el heptágono estrellado y la proyección de un arco de herradura, como una solución acertada para el desarrollo de una aplicación real de un escenario desplegable, dentro de un recinto cerrado con dimensiones específicas. Así mismo la superficie a analizar y según la delimitación de la investigación corresponde a un medio domo desplegable (figura 6.1).

El diseño, fabricación y montaje del escenario desplegable hace parte de los resultados de la estancia de investigación realizada en el Instituto Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey, México; su descripción se realiza con mayor detalle en el capítulo diez junto con los demás prototipos realizados durante la investigación. El desarrollo de capítulo refiere a un caso específico, partiendo de la geometría resultante configurada para el escenario y de esta manera proceder al análisis de las condiciones geométricas en las diferentes etapas de despliegue y comportamiento estructural de los arcos.

Para dar inicio a la configuración del arco, se implementan las tablas que permiten calcular la longitud de barra con los parámetros específicos y se utiliza el método geométrico propuesto por el autor, en este caso se parte de un diámetro determinado, dado por el espacio a ocupar, definido en 5.20 metros como espacio útil para el escenario y una altura máxima de 3.45 metros. El proceso de búsqueda de la forma, arroja como resultado y mejor opción la geometría de un heptágono estrellado, con una longitud de barra entre ejes de 1.13 metros y se selecciona la tipología de arco de herradura para obtener una mayor altura eficiente para el escenario y conforme a la altura libre permitida (figura 6.2).

DEFINICIÓN DE LA BARRA A PARTIR DEL DIÁMETRO (d)

ESQUEMA GEOMÉTRICO

Diámetro (d)

RESULTADOS

POSICIÓN PUNTOS DE ARTICULACION DE LA BARRA

DISTANCIAS DETERMINADAS ENTRE EJES (MTS)

a	b	c
$c - b$	$(r) \tan \beta$	$(r) \operatorname{sen} \alpha$
0,53	0,59	1,13

OTROS VALORES (MTS)

ESPESOR (e) (MTS) =	$\sqrt{b^2 - a^2} =$	<input type="text" value="0,26"/>
$k=0,1$	$e/r =$	<input type="text" value="0,10"/>
DIÁMETRO (d) (MTS) =	$d =$	<input type="text" value="5,20"/>
RADIO (r) (MTS) =	$d/2 =$	<input type="text" value="2,60"/>
ÁNGULO α (GRAD) =	$360^\circ/2n =$	<input type="text" value="25,71"/>
ÁNGULO β (GRAD) =	$\alpha/2 =$	<input type="text" value="12,86"/>

INGRESE VALOR

DIÁMETRO (d) (MTS)	5,20
NÚMERO DE LADOS POLÍGONO (n)	7

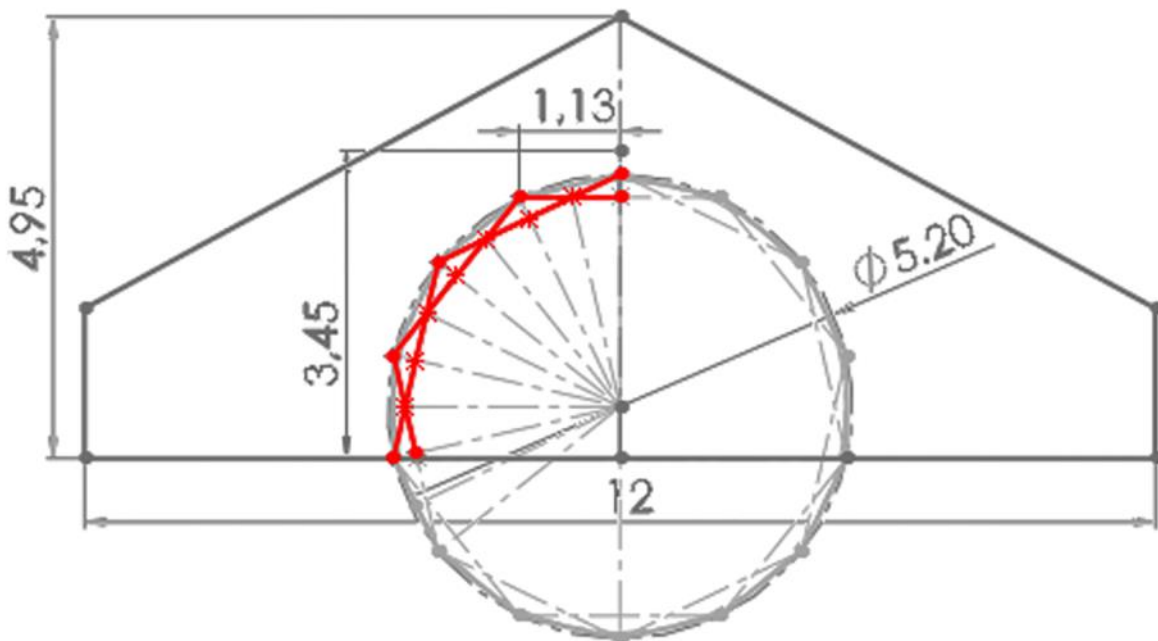


Figura 6.2 Definición de la geometría y longitud de la barra para los módulos de tijera desde un diámetro requerido. Geometría inicial para un escenario desplegable. Fuente: Elaboración del autor.

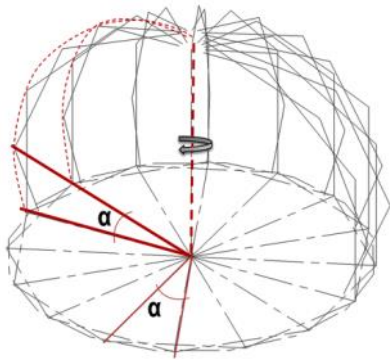


Figura 6.4 Relación geométrica en planta y en elevación de los arcos en un domo desplegable.
Fuente: Elaboración del autor.

6.2 Sistema de montaje

Una vez seleccionado y establecida la geometría del arco, la definición como módulo estructural corresponde a la sección de un semiarco de la geometría seleccionada, esto se debe a que se propone en esta investigación, un proceso de montaje que genere el despliegue de los semiarcos desde el suelo y estos se junten en la cúspide (figura 6.3), siendo esta posición, la etapa final de despliegue y de estabilización total de la estructura, similar a los sistemas constructivos tradicionales para erigir arcos y domos, con la particularidad de que existe una relación geométrica entre la agrupación de tijeras en planta y con la agrupación de tijeras en alzado, es decir, en cada enlace entre módulos de tijeras en planta, se eleva un semiarco desplegable, los cuales rotan sobre su propio eje vertical, el ángulo correspondiente a (α) del polígono base y de esta manera, se obtiene una superficie esférica que se genera a partir de un despliegue simultáneo de las tijeras en planta y en elevación (figura 6.4).

Cabe mencionar algunos ejemplos como referentes a los métodos de construcción y sistemas de montaje en arcos y domos que se han aplicado tradicionalmente, que permita justificar el sistema de montaje a proponer.

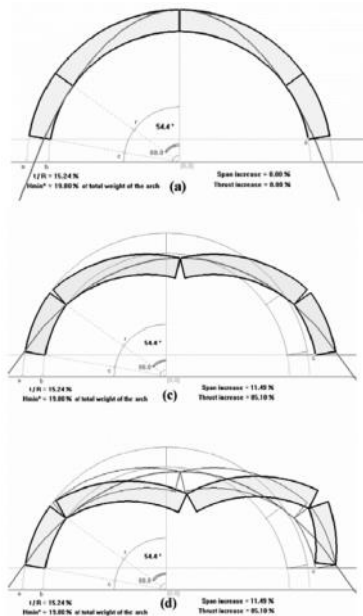


Figura 6.5 Colapso de un arco [7].

El principio estructural desarrollado desde la antigüedad consiste en la sucesión de dovelas de forma trapezoidal donde la dovela central, la clave, es la pieza final a encajar para lograr el estado de compresión simple en el arco. La estabilidad se garantiza con la geometría adecuada de todas las dovelas y la correcta respuesta de las impostas ante los esfuerzos solicitantes, ya que si alguna de las dos falla, el arco colapsaría (figura 6.5).

La evolución de los sistemas constructivos para el planteamiento de arcos se ha centrado principalmente en la eliminación de la cimbra y tecnificar el proceso de ensamble entre piezas. Gracias a la implementación de nuevos materiales y nuevas tecnologías en sistemas de montaje se ha conseguido obtener nuevas soluciones estructurales idóneas para cubrir grandes luces.



Figura 6.6 Montaje puente Arcos de Alconétar, construcción por abatimiento. Fuente: https://abc-utc.fiu.edu/mc-events/construction-methodology-for-alconetar-arch-bridges-in-spain/?mc_id=350 Recuperado [03/03/2019]

Por ejemplo, la construcción por abatimiento del puente “Arcos de Alconétar” en 2006 en la provincia de Cáceres, España; consiste en la prefabricación de dos semiarcos, los cuales se posicionan a cada extremo del vano a cubrir y mediante una articulación en el extremo inferior de los arcos, se procede a abatir los dos tramos de arco hasta que se juntan en la cúspide alcanzando la estabilidad total de la estructura, el proceso se caracteriza por la rapidez en la ejecución del montaje (figura 6.6).

Demchenko [21] describe acerca de este proceso de ejecución que:

Para la realización del giro de los arcos es necesario desplazar el conjunto mediante cilindros hidráulicos dispuestos horizontalmente, hasta que el peso del semiarco actúa a su favor, creando un efecto de desequilibrio que facilita el proceso, momento a partir del cual resulta preciso el empleo de retenidas para lograr un descenso controlado del conjunto (p. 22) (figura 6.6).

La descripción se asemeja al comportamiento de los arcos desplegados en aquella posición de despliegue intermedia donde se genera el movimiento brusco para configurar la curvatura determinada [76] (figura 3.38). El ejemplo permite considerar la importancia de incorporar elementos auxiliares o dispositivos de control que, para este caso, genere un despliegue controlado.

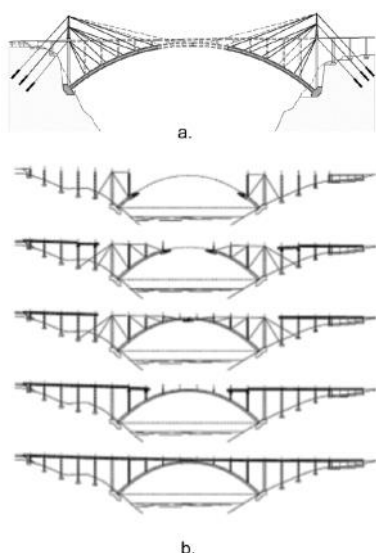


Figura 6.7 Sistemas constructivos para puentes arcos .
a) Sistema atirantado.
b) Sistemas de torres y diagonales [21].

Otros sistemas de montaje más tradicionales refieren a la construcción por voladizos, complementados con sistemas estructurales adicionales para mantener los semiarcos en una posición estable mientras se completa la estructura total, como los sistemas atirantados, fijos, temporales o con implementación de diagonales; en el caso de hormigonado, es mediante el carro de avance el cual ejecuta el proceso de fabricación tramo por tramo, simultáneamente desde cada extremo de la estructura (figura 6.7).

La mención de estos referentes radica en la importancia de considerar, para el caso particular de arcos desplegados, estructuras adicionales o sistemas de bloqueo que permitan controlar todas las etapas de despliegue, sobre todo aquella que suponga la más crítica para obtener un proceso de despliegue con garantías de seguridad y estabilidad ante el personal ejecutor como para la misma estructura.

En cuanto a los sistemas constructivos utilizados en las cúpulas, se realiza la referencia a aquellos ejemplos de aplicaciones arquitectónicas de cúpulas radiales o también llamadas cúpulas nervadas, las cuales están formadas por arcos dispuestos radialmente. Al igual que los arcos, las cúpulas necesitan el elemento de la clave para lograr que la estructura este en equilibrio, es así que en la mayoría de las aplicaciones, la clave se convierte en un anillo de compresión que debe responder adecuadamente a los esfuerzos solicitados en este punto (figura 6.8).

Un ejemplo a resaltar es el sistema de ejecución empleado para la cubierta del Palacio de los Deportes Palau Sant Jordi. El sistema “Pentadome” desarrollado por el ingeniero japonés Mamuro Kawaguchi, propone arcos reticulados que se componen de tres secciones articuladas, el arco se comporta como estructura móvil que logra su posición final cuando las torres de elevación (columnas) alcanzan su máxima altura, tras incorporar en la parte inferior los módulos necesarios de sección de columna para obtener la altura determinada [45] (figura 6.9).

El aprendizaje de esta aplicación se fundamenta en como el sistema estructural planteado como piezas articuladas y modulares, permite un innovador proceso de montaje para cubiertas ligeras de grandes luces sin la necesidad de utilizar andamios.



Figura 6.8
Cúpulas tipo Schwedler.
Fuente: <https://docplayer.es/81385215-Cupulas-tipo-schwedler-mallas-de-una-capa.html>
Recuperado [05/05/2019]

Para el caso de sistemas de montaje en arcos desplegables se describe el método ejecutado por Tsutomu Kokawa (figura 6.10), los arcos toman su posición arqueada desde el suelo gracias a la función de sustentación y tracción ejercida por cables continuos que pasan en forma de zigzag por poleas ubicadas entre cada enlace de módulos de tijera [47], [48] y [49].

En la figura 6.11 se observa dos motores en la base del arco que ejercen la fuerza para enrollar los cables y adicionalmente, se destaca la geometría empleada para la tijera que corresponde a la clave, sus barras son elementos angulados que permiten que el arco repose sobre el suelo en posición extendida y horizontal, sin que las bases se desplacen hacia afuera.

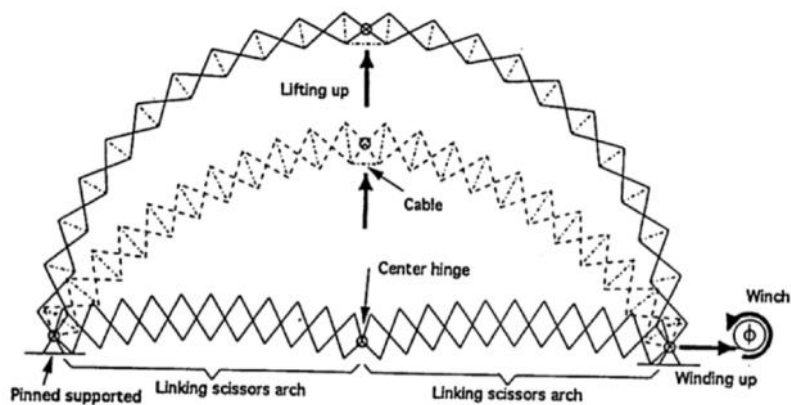


Figura 6.11 Proceso de despliegue arcos [47].

De mayor interés, es la estrategia de incorporar cables conectando las articulaciones extremas entre módulos de tijeras, con el objetivo de facilitar el proceso de montaje desde el suelo, generando un mecanismo sencillo y de fácil adaptación a diferentes planteamientos de estructuras desplegables. Una primera propuesta de este sistema refiere a la utilización de un único cable continuo y una segunda alternativa que incluye doble cable cruzado. Kokawa [49] concluye que aunque sus modelos presentan características de fricción entre el cable y la polea, se logra disminuir los esfuerzos de tracción en las barras durante el proceso de despliegue (figura 6.12).

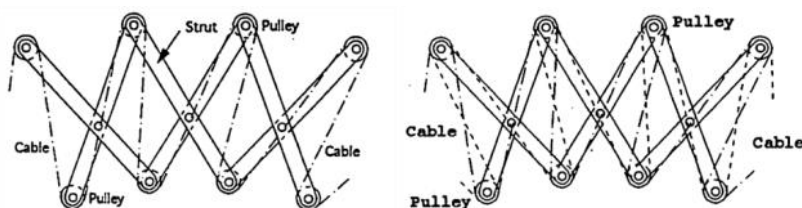


Figura 6.12 Sistema de cables continuos para el despliegue de módulos de tijeras [48].

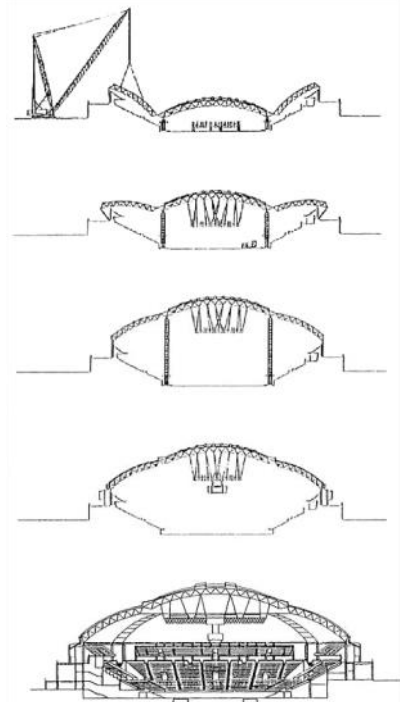


Figura 6.9 Proceso de montaje cubierta Palau Sant Jordi [45].

Figura 6.10 Proceso de despliegue domo [48]



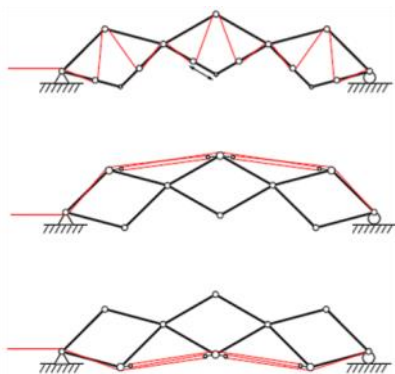


Figura 6.13 Sistema de cables para el despliegue de módulos de tijeras [95].

Un estudio más reciente [95] descrito en el capítulo dos (figura 2.161) explora también alternativas para el despliegue de agrupaciones de tijeras por medio del sistema cable polea, proponiendo cables conectados en zigzag e incorporando poleas intermedias sobre las barras. También propone utilizar cables continuos solo en las articulaciones superiores o inferiores (figura 6.13). Las consideraciones a tener en cuenta, refieren al acertado funcionamiento de los mecanismos, garantizando que el motor enrolle correcta y sincronizadamente los cables para evitar fricciones y la posible acumulación de esfuerzos de compresión o tracción en las barras durante los procesos de pliegue y despliegue de la estructura.

En consecuencia, para el planteamiento de los domos desplegables a desarrollar en esta investigación se ratifica la intención de proponer semiarcos desplegables a modo de ejes meridionales, que en su etapa final de despliegue se juntan en la cúspide y estabilizan la estructura para su uso funcional (figura 6.14).

El sistema de montaje es manual ya que se propone la utilización de materiales ligeros y una escala proporcionada de proyecto referida a aplicaciones de pequeña y mediana escala, como stand, escenarios, puestos de mercadillo y pabellones con áreas entre 20 m² y los 200 m², que según la altura obtenida será necesaria la implementación de escaleras para el montaje (figura 6.15).

El procedimiento propuesto para esta investigación implica además el diseño de una clave acorde a la geometría propuesta, complementado con estrategias de diseño que incorporen elementos estructurales para obtener domos estables que describan en todas las etapas de despliegue un proceso seguro y controlado (figura 6.15).

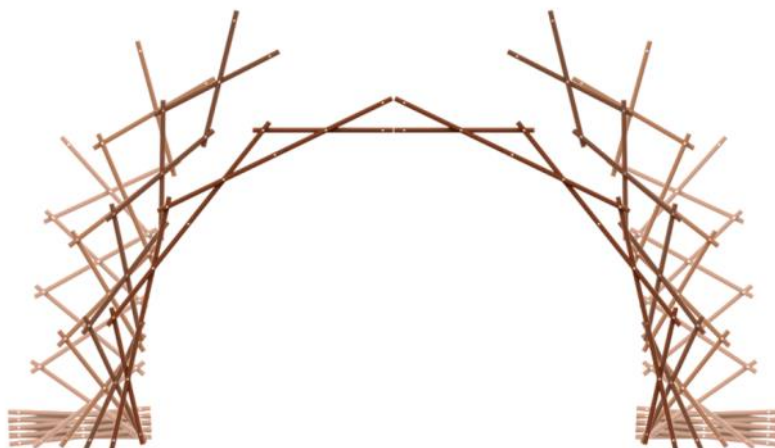


Figura 6.14 Proceso de montaje y despliegue para la configuración de domos. Semiarcos desplegables que se juntan en la cúspide.

Fuente: Elaboración del autor.

Los prototipos construidos durante el desarrollo de esta investigación se describen en el capítulo diez, especificando las diferentes estrategias de diseño empleadas en cada caso, de acuerdo el método geométrico propuesto en el presente estudio (figura 6.15). En el presente capítulo, pretende entender el comportamiento y características estructurales de un semiarco tipo específico en diferentes etapas de despliegue.



a.



b.

Figura 6.15 Proceso de montaje en prototipos de domos desplegables. a) Escenario. Arcos sistema tipo tijera con tubos de cartón. b) Stand. Arcos sistema tipo tijera con perfiles rectangulares en aluminio. Más información capítulo diez. Prototipos. Fuente: Elaboración del autor.

6.3 Análisis 2d de semiarcos en WinEva

Para proceder al análisis de los semiarcos durante varias etapas de despliegue, se emplea el programa WinEva8© [136] , el cual permite calcular en dos dimensiones las deformaciones elásticas y los esfuerzos producidos de una estructura representada en elementos lineales denominadas barras [77].

Para ello es necesario determinar las propiedades del semiarco a analizar y proceder a discretizar la estructura con las características obligatorias que requiere el programa para la correcta simulación.

6.3.1 Dimensionamiento y características del semiarco.

Un semiarco se compone de cuatro módulos de tijeras, los módulos de tijeras se numeran de manera ascendente siendo el módulo número uno (m1), el que representa el soporte del semiarco, los módulos dos (m2) y tres (m3) corresponden a los módulos de tijera intermedios y el módulo cuatro (m4), es el módulo final que se conecta a la clave (figura 6.16).

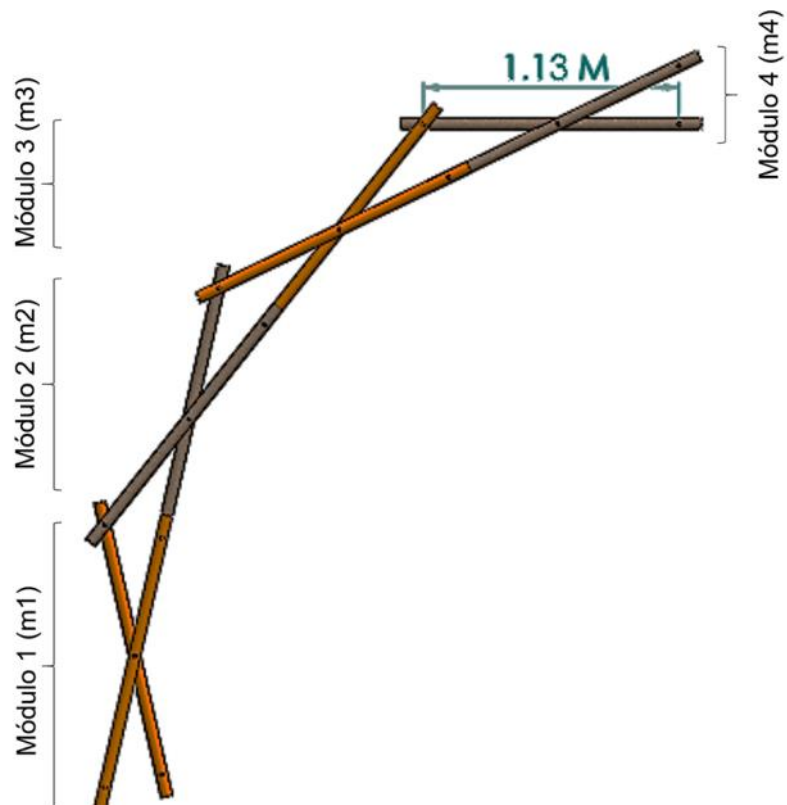


Figura 6.16 Módulos de tijeras que forman un semiarco desplegable.

Fuente: Elaboración del autor.

La longitud de la barras entre ejes corresponde a 1.13 metros, según la figuras 6.1 y 6.2 (aplicación de método geométrico para hallar la longitud de la barra y posición de la articulación central). Se determina como material a utilizar para las barras de cada módulo de tijera, tubos de cartón, se exponen las especificaciones del material en la tabla 6.1.

Para mejorar la estabilidad de los semiarcos es pertinente aumentar el espesor de la base o soporte inferior del semiarco, correspondiente al módulo uno (m1), mediante la siguiente estrategia (figura 6.17 y 6.18):


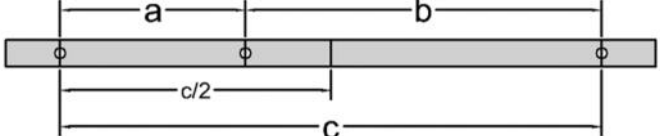
Sección	Especificaciones	
	Material:	Cartón
	Sección:	Tubo redondo
	Diámetro:	0,05 m
	Espesor:	0,005 m
	Módulo de Elasticidad ¹ :	254959 T/m ²
	Tensión admisible ² . σ_m : 5,39 Mpa:	54,9627 kg/cm ²
	Densidad ¹ :	1,05 T/m ²
	Longitud de la barra (c):	1,13 m
		
c = 1,13 m	a = 0,53 m	b = 0,59 m

Tabla 6.1 Tabla especificaciones técnicas y propiedad tubos de cartón.
^{1 - 2} Tomado de ABZAC. Tubos y mandriles Para el sector papelerero [99].

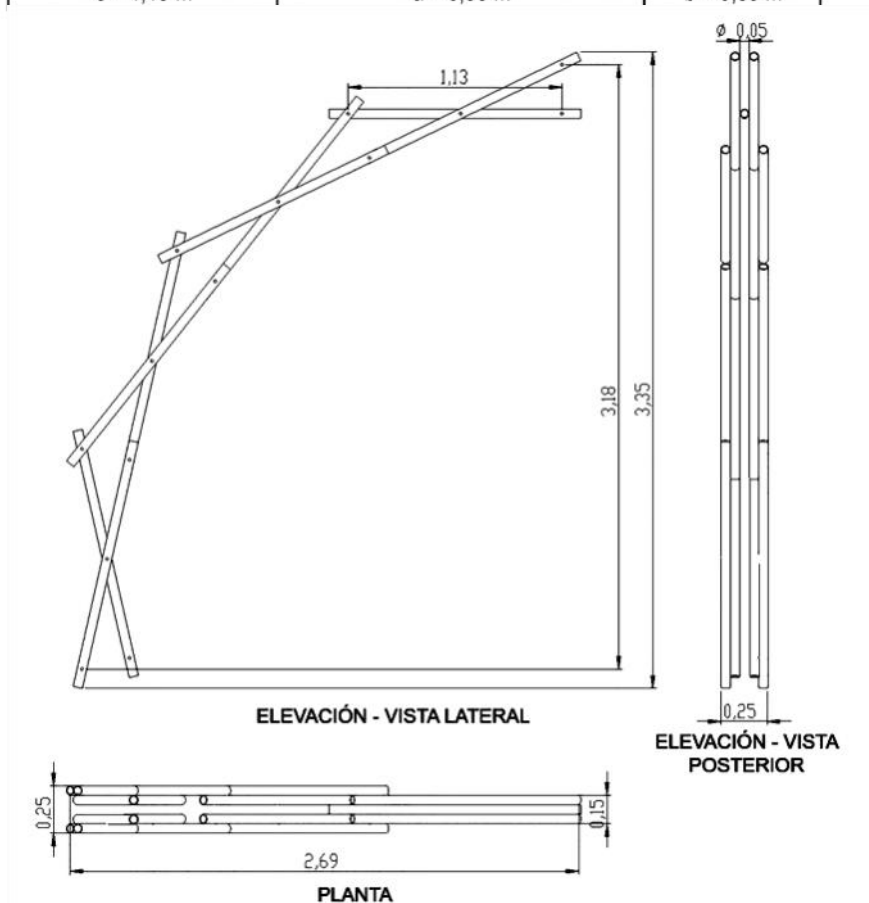


Figura 6.17 Planimetría . Dimensionamiento del semiarco desplegable.
 Fuente: Elaboración del autor.

El módulo cuatro (m_4) se compone de tres barras, la barra denominada $B1_{(m_4)}$ que corresponde a la barra que se posiciona en horizontal en la etapa final de despliegue y dos barras, $B2_{(m_4)}$, que se posicionan a cada lado de la barra $B1_{(m_4)}$, articuladas en el punto de la articulación excéntrica para formar un módulo tijera.

Con este criterio y con el objetivo de lograr ampliar la base del semiarco, el módulo adyacente correspondiente al módulo de tijera tres (m_3), se compone de cuatro barras, las barras $B2_{(m_3)}$ que son posicionadas a cada lado y articuladas al extremo inferior de la barras $B1_{(m_4)}$ y las barras $B1_{(m_3)}$ que se posicionan a cada lado en la parte exterior y articuladas al extremo inferior de las barras $B1_{(m_4)}$, sin olvidar conectar las barras $B1_{(m_3)}$ y $B2_{(m_3)}$ al punto de articulación excéntrica para conformar el módulo de tijera correspondiente.

Se efectúa el mismo proceso de enlace en los siguientes módulos a conectar, pero en los dos primeros módulos (m_1) y (m_2), las barras $B1$ se posicionan en la cara interna del módulo adyacente y las barras $B2$ se mantienen posicionadas en la cara externa del módulo de tijera adyacente (figura 6.18).

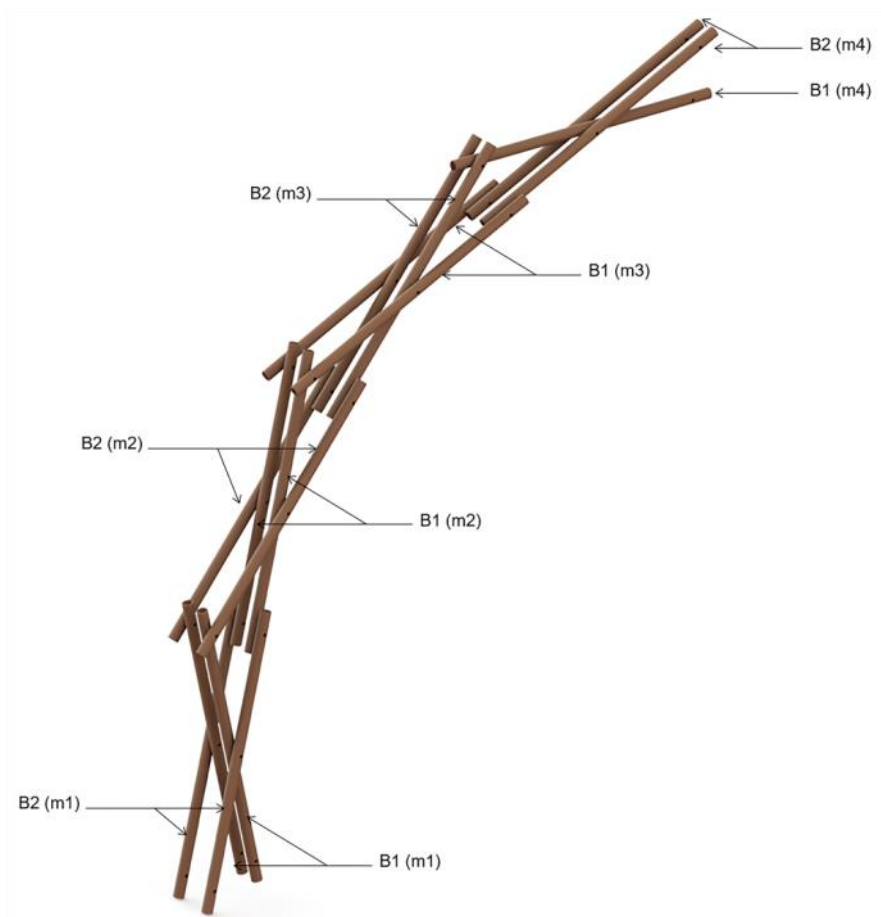


Figura 6.18 Posicionamiento de las barras y módulos de tijera para formar el semiarco desplegable.

Fuente: Elaboración del autor.

6.3.2 Discretización e introducción de datos para WinEva (v. 8)

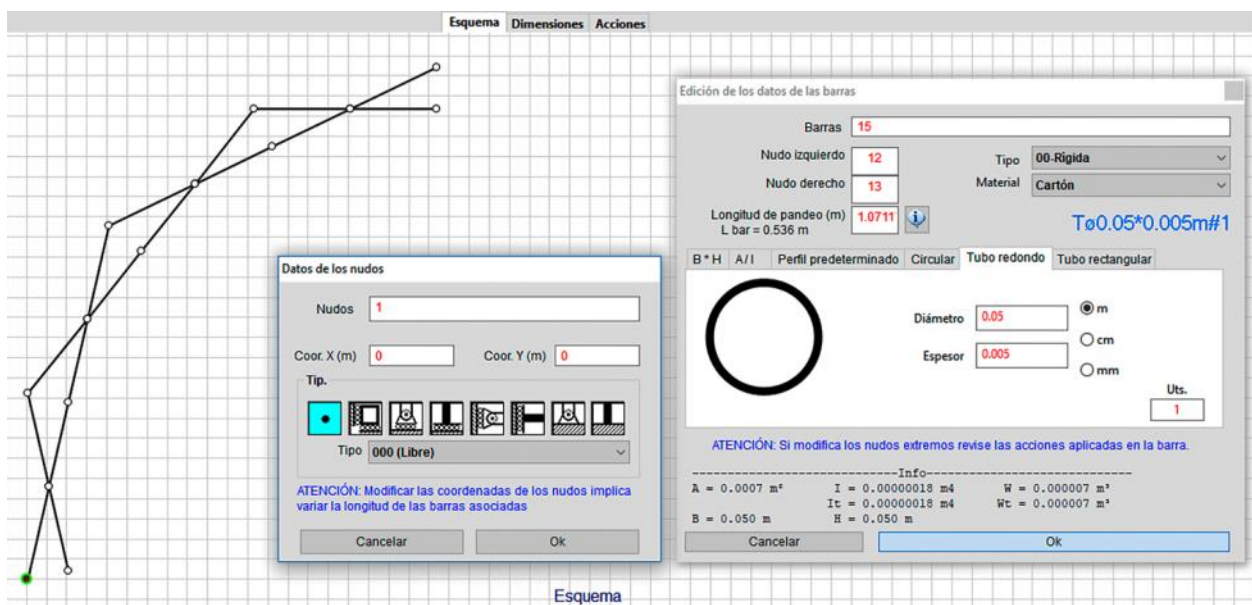
Para ingresar la información en dos dimensiones de la estructura del semiarco al programa WinEva8© [136] , es necesario discretizar la estructura en dos componentes principales:

- Barras, dos barras colineales forman un elemento lineal.
- Nudos, que corresponden a los puntos extremos y de articulación entre barras.

Para explicar la introducción de datos en el programa, se utiliza el esquema del semiarco en posición final de despliegue de la estructura. El modelo estructural del semiarco, básicamente consiste en una geometría de líneas simplificada realizada en un programa de CAD y exportada al WinEva (v. 8). Se posiciona el nudo inferior más hacia la izquierda en las coordenadas 0.0 y se procede a introducir los datos del material y sección de las barras (figura 6.19).

Para reinterpretar el esquema inicial del semiarco en una estructura desplegable conformado por módulos de tijeras dentro del WinEva8© [136] , es importante precisar que cada módulo de tijera se compone de cuatro barras, que se relacionan linealmente con su correspondiente a través del nudo central. Es decir dos barras relacionadas linealmente conforman un elemento, cada tijera tiene dos elementos lineales (figura 6.20).

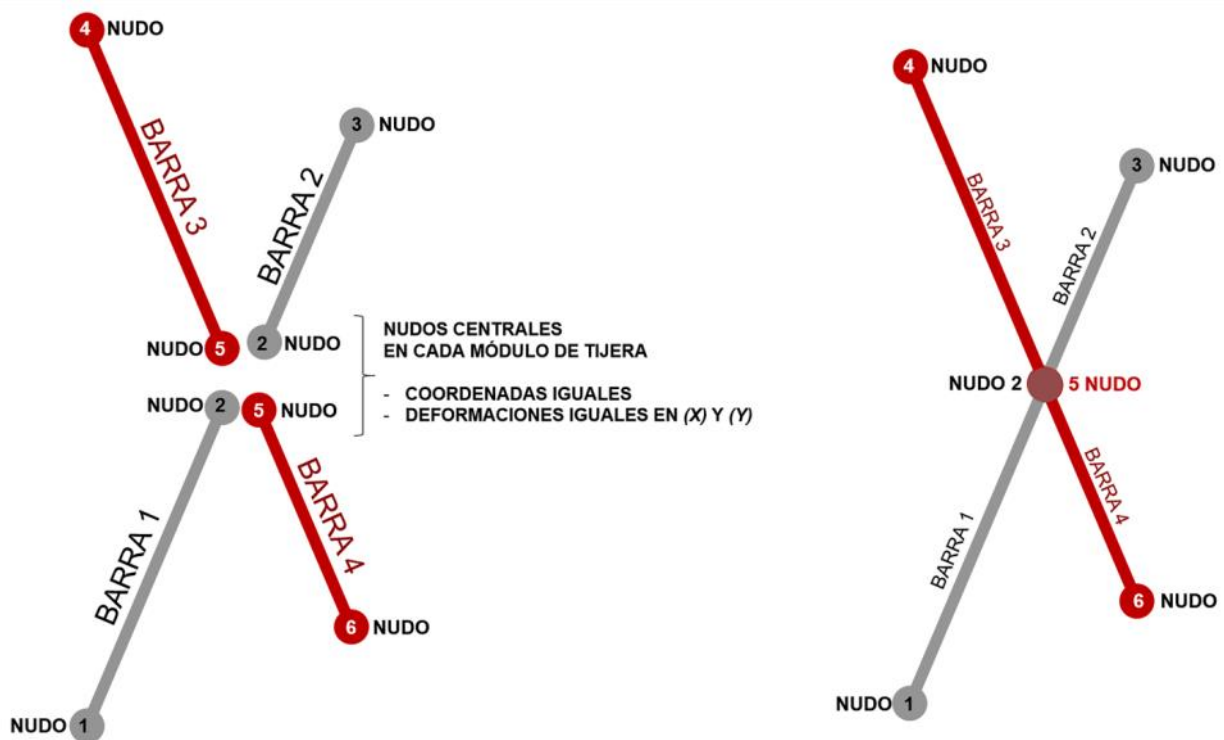
Figura 6.19 Introducción de la geometría en líneas del semiarco, material y sección de las barras. WinEva8 © [136].
Fuente: Elaboración del autor.



Ahora, para simular el comportamiento de una tijera en las diferentes etapas de despliegue dentro del programa WinEva (v. 8), es necesario introducir un doble nudo central con deformaciones iguales en (x) y en (y) , ambos nudos deben coincidir en la posición exacta de la articulación excéntrica de cada tijera, para ello es necesario introducir las mismas coordenadas para cada nudo central (figura 6.20).

A continuación, se define cuidadosamente las barras con sus correspondientes nudos extremos (nudo inicial y nudo central) para que se mantenga la relación colineal por cada elemento de la tijera, la figura 6.20 representa el procedimiento realizado en cada módulo de tijera, priorizando en que cada tijera existen dos nudos centrales, situados con las mismas coordenadas, los cuales conforman dos elementos lineales (rojo y gris) formados cada uno por dos barras.

Figura 6.20 Gráfica explicativa para la definición y posicionamiento de los nudos centrales y las barras en cada módulo de tijera en WinEva8 © [136]. Fuente: Elaboración del autor.



Realizado este paso, se repite en cada uno de los módulos de tijera. adyacentes. El siguiente procedimiento consiste en precisar en las barras, la conexión entre módulos de tijeras el tipo articulación, señalando con respecto a la posición del eje (y) si se articula cada barra con su módulo adyacente por la derecha o por la izquierda, según corresponda en el esquema lineal del semiarco (figura 6.21).

La barras finales se determinan como barras en voladizo y sus nudos finales como libres. Los nudos de la tijera inicial (soportes) correspondientes al módulo uno (m1) son nudos articulados.

Finalmente según la figura 6.22 que representa la información de la sección de las barras, se debe agregar el número de barras que hay en cada módulo de tijera, introduciendo el valor 2, según corresponda dentro de la edición de esta información, es decir todas las barras tienen doble perfil exceptuando la barra final $B1_{(m4)}$, que se posiciona horizontalmente en la etapa final de despliegue (figura 6.22).

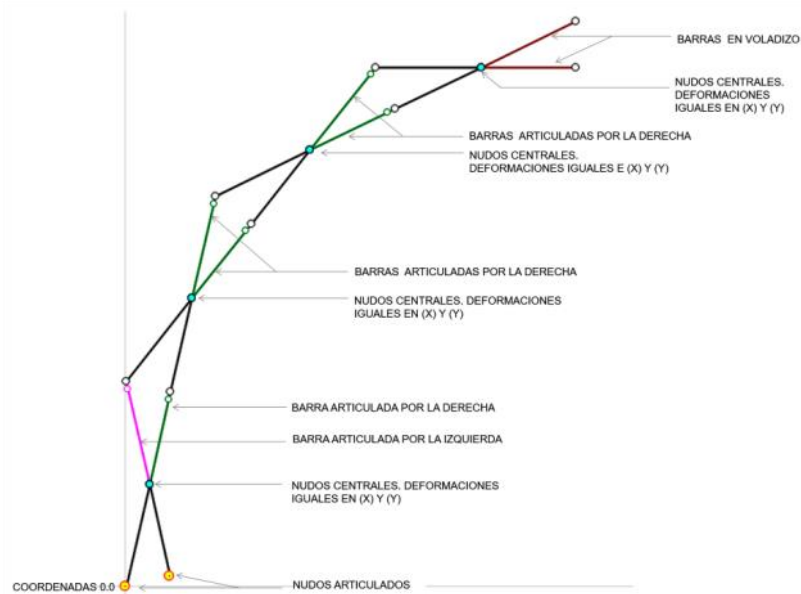


Figura 6.21 Introducción de datos y determinantes en nudos y barras para su análisis en WinEva8© [136]

Fuente: Elaboración del autor.

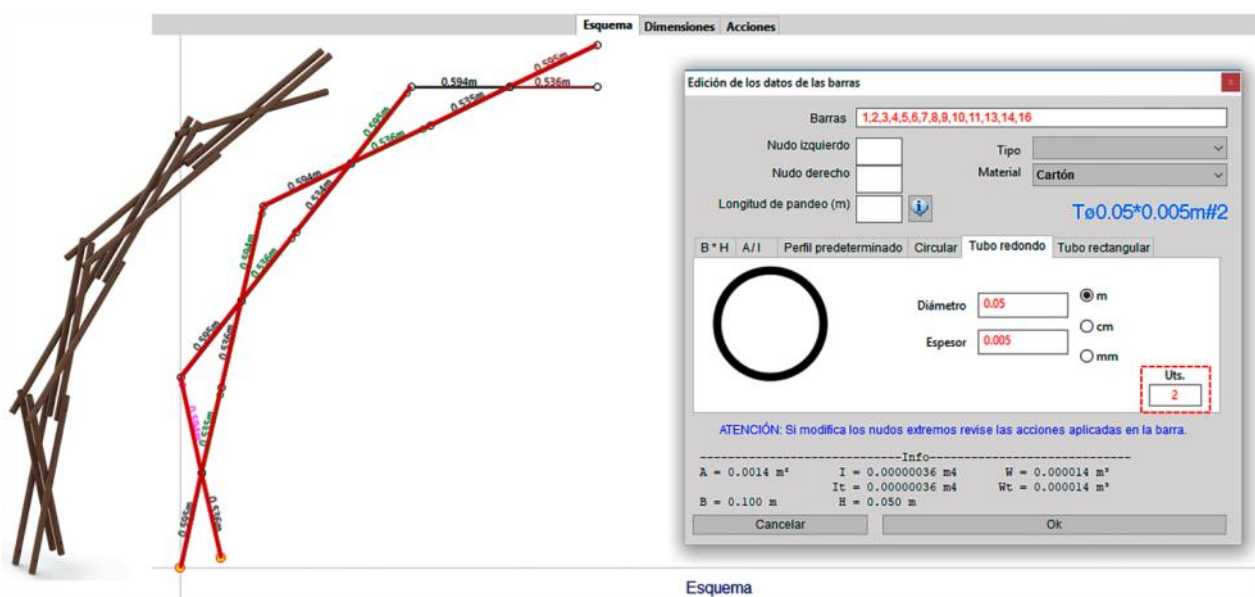


Figura 6.22 Edición de barras que incorporan doble perfil según la estructura propuesta para el semiarco.

Fuente: Elaboración del autor.

6.3.3 Generalidades para el análisis

Esta investigación no tiene el propósito de generar un cálculo estructural exhaustivo sobre estructuras desplegadas, el objetivo de este apartado es analizar el comportamiento estructural y verificar el correcto funcionamiento estructural de los semiarcos generados a partir de un método geométrico específico, analizando en dos dimensiones las deformaciones y desplazamientos que suceden en diferentes etapas de despliegue.

No obstante, es importante mencionar algunas consideraciones previas sobre el comportamiento de estas estructuras. Pérez Valcárcel en su texto *Cálculo de estructuras desplegadas de barras*, desarrolla un amplio análisis con cálculo matricial, describe que:

Las barras trabajan básicamente a tracción - compresión, aunque el efecto de la articulación central produce una flexión esviada de gran importancia en el comportamiento general de la estructura. Además este efecto se produce en la sección más débil de la barra, correspondiente al pasador. Por ello las secciones más adecuadas son las tubulares, redondas o rectangulares [13] pp. 127.

También, en el capítulo dos, se señalan las diferentes incompatibilidades que se generan en las superficies desplegadas que describen una curvatura y están conformadas por una red continua de módulos tridimensionales de tijeras; básicamente se representa en imágenes el comportamiento de las barras sometidas a grandes esfuerzos de flexión en las etapas críticas del despliegue, reiterando lo que varios autores e investigaciones previas al presente estudio, ya han descrito sobre el comportamiento de este tipo de agrupaciones con el STT: Se deben considerar soluciones técnicas para evitar el fallo de las barras o colapso de la estructura con alternativas como la eliminación de algunas barras, incorporar barras telescópicas, previo doblado de las barras e implementación de nudos idóneos para responder a los movimientos de las barras en todas las etapas de despliegue (ver apartado 3.2.2.3. Superficies sinclásticas).

Precisamente para simplificar estas estructuras y disminuir los esfuerzos de las barras en las etapas más críticas del proceso de despliegue, la investigación propone desarrollar estructuras espaciales desplegables a través de la proyección de arcos planos con nudos simplificados, barras de igual longitud y un único nodo principal que ejerce la función de piedra angular (la clave) dentro del sistema estructural de un domo desplegable.

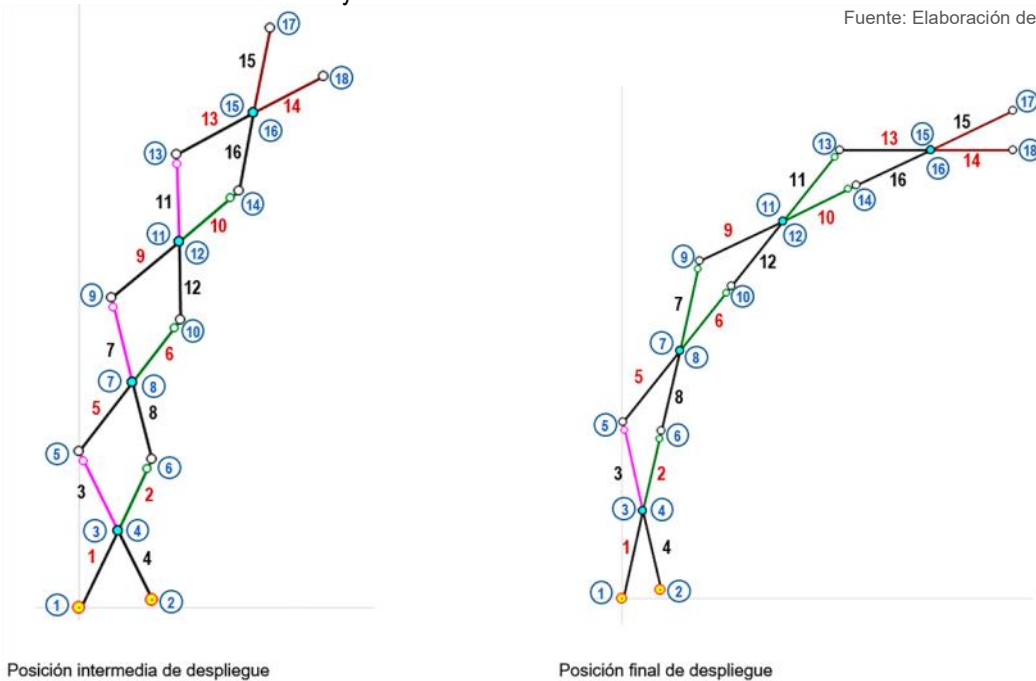
Para proceder al análisis y a manera de facilitar la comparación entre diferentes modelos que se realizan para este apartado, se considera que la carga a aplicar sobre el semiarco es el peso propio de la estructura, la cual actúa como una carga uniforme repartida a lo largo de la barra.

Introducidos en el programa WinEva (v. 8) los datos técnicos del material y sección a utilizar, junto con la discretización de la estructura en barras y nudos, se procede a simular el comportamiento del semiarco aplicando la carga del peso propio, en las diferentes etapas de despliegue propuestas, considerando que la estructura está articulada en la base, entre módulos de tijeras y los nudos centrales en cada tijera, son dobles con deformaciones iguales en (x) y en (y) (figura 6.21).

En la figura 6.23 se observa la numeración de barras y nudos dentro del WinEva8© [136], es importante resaltar que para proceder al análisis, se debe conservar esta numeración en el mismo orden en cada una de las posiciones de despliegue a analizar, de esta forma se facilita su lectura y comparación de resultados. Se establece entonces, a partir de la geometría definida, que el semiarco contiene 16 barras y 18 nudos.

Figura 6.23 Esquema Semiarco numeración de barras y nudos en WinEva8© [136]

Fuente: Elaboración del autor.



La tabla 6.2 expone los datos generales de las barras según la numeración establecida, especificando la longitud, la sección, momento de inercia, módulo resistente, radio mínimo de giro, esbeltez y cantidad de perfiles.

Una vez se realiza la simulación, el programa arroja los diferentes esquemas gráficos sobre los esfuerzos resultantes a analizar, representados en diagramas de reacciones, axiales, compresión, tracción, momentos, cortantes y deformaciones (figura 6.24), este último de mayor interés para encontrar la posición ideal del despliegue del semiarco, previa a la posición final, que permita que los desplazamientos de la estructura por peso propio coincida con la geometría seleccionada.

Tabla 6.2

Datos de las barras. Resultados tomados de la simulación con WinEva8© [136].

Fuente: Elaboración del autor.

DATOS DE LAS BARRAS									
Módulos de tijeras	Barra Num	Longitud de barra	Longitud de pandeo	Área	Momento de Inercia	Carga Viva	Radio de giro	Esbeltez	Cant. Perfiles
		L	Lp	A	I	W	i	(Lp/i)	
Módulo 1	1	0,594 m	0,594 m	14,14 cm ²	36,23 cm ⁴	14,49 cm ³	1,60 cm	37	2
	2	0,536 m	0,536 m	14,14 cm ²	36,23 cm ⁴	14,49 cm ³	1,60 cm	33	2
	3	0,594 m	0,594 m	14,14 cm ²	36,23 cm ⁴	14,49 cm ³	1,60 cm	37	2
	4	0,536 m	0,536 m	14,14 cm ²	36,23 cm ⁴	14,49 cm ³	1,60 cm	33	2
Módulo 2	5	0,594 m	0,594 m	14,14 cm ²	36,23 cm ⁴	14,49 cm ³	1,60 cm	37	2
	6	0,536 m	0,536 m	14,14 cm ²	36,23 cm ⁴	14,49 cm ³	1,60 cm	33	2
	7	0,594 m	0,594 m	14,14 cm ²	36,23 cm ⁴	14,49 cm ³	1,60 cm	37	2
	8	0,536 m	0,536 m	14,14 cm ²	36,23 cm ⁴	14,49 cm ³	1,60 cm	33	2
Módulo 3	9	0,594 m	0,594 m	14,14 cm ²	36,23 cm ⁴	14,49 cm ³	1,60 cm	37	2
	10	0,536 m	0,536 m	14,14 cm ²	36,23 cm ⁴	14,49 cm ³	1,60 cm	37	2
	11	0,594 m	0,594 m	14,14 cm ²	36,23 cm ⁴	14,49 cm ³	1,60 cm	37	2
	12	0,536 m	0,536 m	14,14 cm ²	36,23 cm ⁴	14,49 cm ³	1,60 cm	33	2
Módulo 4	13	0,594 m	0,594 m	7,07 cm ²	18,11 cm ⁴	7,25 cm ³	1,60 cm	37	1
	14	0,536 m	1,071 m	7,07 cm ²	18,11 cm ⁴	7,25 cm ³	1,60 cm	66	1
	15	0,594 m	1,189 m	14,14 cm ²	36,23 cm ⁴	14,49 cm ³	1,60 cm	74	2
	16	0,536 m	0,536 m	14,14 cm ²	36,23 cm ⁴	14,49 cm ³	1,60 cm	33	2

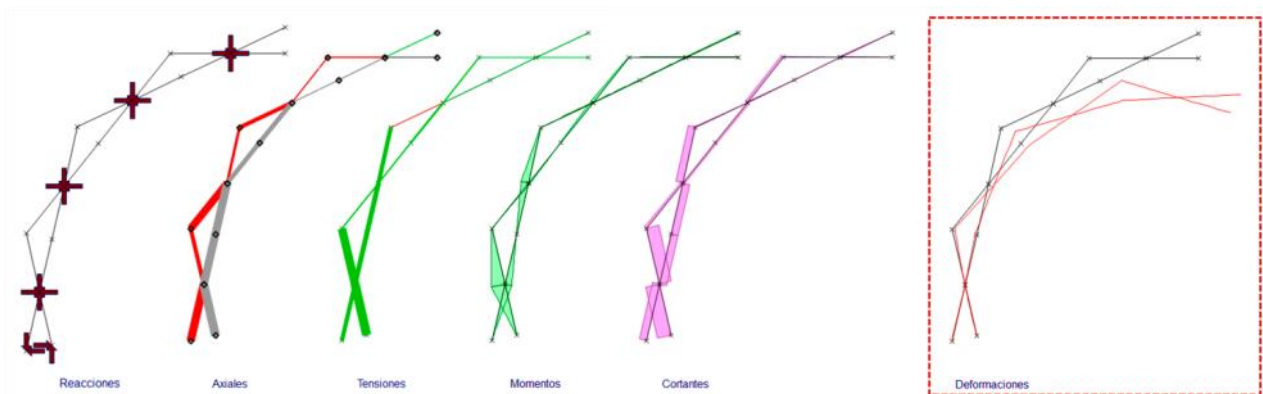


Figura 6.24 Diagramas resultantes Reacciones, axiales, tensiones, momentos, cortantes y deformaciones del semiarco en la posición final de despliegue. WinEva8© [136]. Fuente: Elaboración del autor.

6.4 Análisis etapas de despliegue

Se determinan para el estudio cuatro posiciones de despliegue en el semiarco tipo y proceder al análisis del comportamiento que se genera en cada etapa, definidas como: posición plegada, posición intermedia, posición desplegada y posición ideal (figura 6.25). La posición plegada del semiarco corresponde aquella etapa de despliegue que ocupa menor espacio y la estructura se encuentra totalmente replegada (figura 6.25 a).

Para determinar la posición intermedia de despliegue, se selecciona una posición que describa una considerable extensión vertical del semiarco a analizar (figura 6.25 b). Se prosigue con la posición final de despliegue, aquella que corresponde a la geometría establecida a través del método geométrico propuesto, que permite determinar la forma final de un domo desplegable específico (figura 6.25 c).

La última etapa de despliegue a analizar, corresponde a la denominada posición ideal de despliegue, para este apartado se desarrolla un estudio que incorpora análisis y gráficos de simulación en dos dimensiones del semiarco, que compara las posiciones previas al estado final de despliegue, con el objetivo de hallar la deformación adecuada según el peso propio de la estructura y de esta forma definir la posición ideal de apertura del semiarco, que coincida con la geometría inicial establecida, generada a partir del método propuesto (figura 6.25 d.).

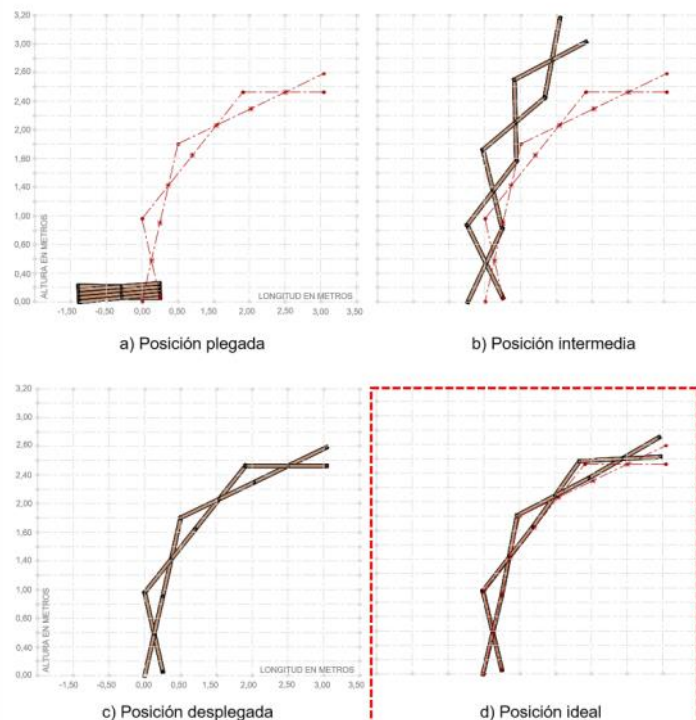


Figura 6.25 Etapas de despliegue del semiarco a analizar.
Fuente: Elaboración del autor.

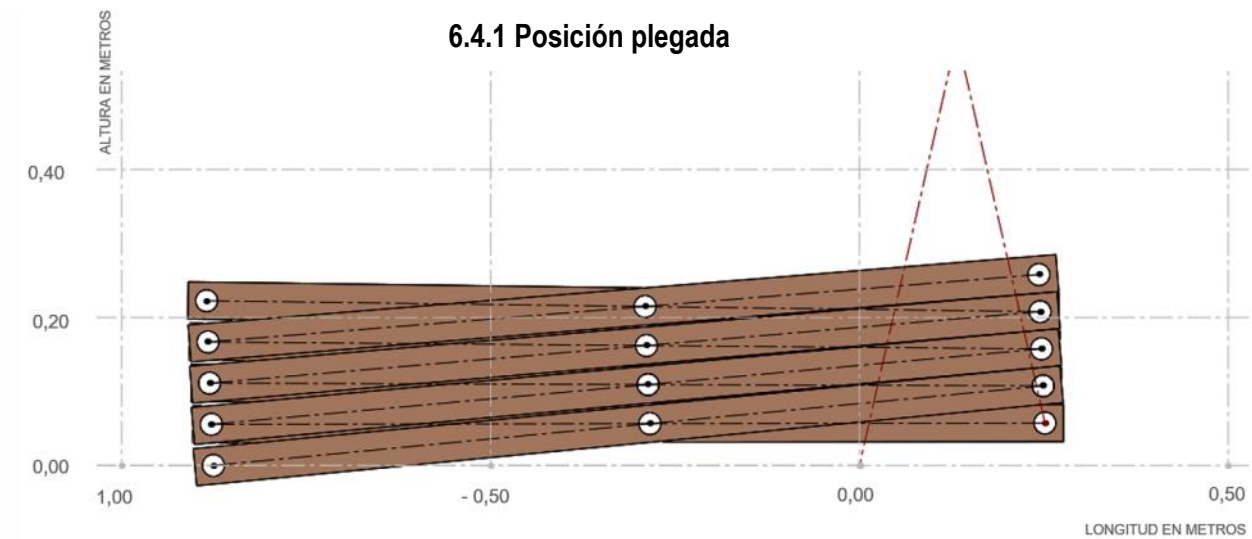
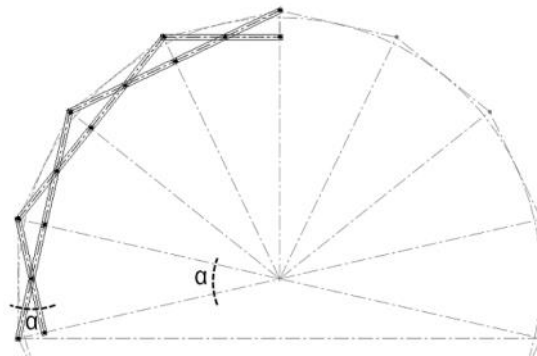


Figura 6.26 Arco plegado.

Fuente: Elaboración del autor.

Esta posición corresponde al estado de reposo del semiarco, donde los módulos de tijeras se abren totalmente sobre el plano horizontal y de esta forma se apoyan uno sobre otro, generando un paquete compacto que facilita su transporte (figura 6.26).

Para hallar esta posición de plegado, se toma nuevamente la tabla de cálculo para la búsqueda de la forma y definición de la longitud de la barra (figura 6.2), la información que se utiliza para este caso es el valor de (α) que también corresponde al ángulo de apertura de módulo de tijera en la posición final de despliegue (figura 6.27).



En la posición plegada el valor de (α) , que se define en este apartado como (α_{pleg}) , depende de la máxima apertura de la tijera, limitada por la longitud de la barra (c) y la distancia (h) relacionada con el canto de la sección de la barra y la forma en que se apoyan una barra sobre otra (figura 6.28). Si no existe interferencia entre las barras y se realiza un correcto plegado, es posible hallar este valor de (α_{pleg}) con la siguiente ecuación, donde se procede a demostrar su comprobación con los valores de la barra que corresponden al caso de estudio:

Figura 6.27 Ángulo de apertura del módulo de tijera (α) en posición final de despliegue

$$\alpha = 360/2n$$

(n) Número de lados polígono seleccionado.

Fuente: Elaboración del autor.

Donde:

$$\alpha_{pleg} = 180^\circ - \theta$$

$$\theta = \arcseno \frac{h}{c}$$

$$\alpha_{pleg} = 180 - \arcseno \frac{h}{c}$$

Comprobación:

$$c = \text{longitud de la barra entre ejes} = 1.13 \text{ m}$$

$$h = 2d = 0.10 \text{ m}$$

$$d = 0.05 \text{ m. Canto de la sección de la barra}$$

Al remplazar los valores, el resultado de $\alpha_{pleg} = 174.92^\circ$

Al introducir la ecuación o el valor resultante del ángulo α_{pleg} , dentro de modelo parametrizado del semiarco realizado en SolidWorks® [135], se obtiene el plegado total del semiarco y así mismo la comprobación de la ecuación (figura 6.28 y 6.29).

Aunque es importante aclarar que las dimensiones finales, en la posición de un semiarco plegado, la altura resultante depende de las dimensiones de las barras, sección a utilizar y número de módulos de tijeras incorporados. Así como el adecuado apoyo de una barra sobre la otra sin interferencias. Para este caso, donde la estructura mantiene una leve inclinación e incorpora cuatro módulos de tijera conformados por tubos de cartón de 5.00 centímetros de diámetro, se obtiene una altura aproximada de 0.30 metros en la posición plegada del semiarco (figura 6.26).

Para la simulación y análisis en el programa WinEva8 © [136], se descarta el análisis en posición plegada, debido a que en esta posición, una barra descansa sobre otra y para el programa no es posible calcular la estructura en este estado, generando de esta forma resultados erróneos (figura 6.30). Así que se procede entonces, a analizar las siguientes tres posiciones de despliegue.

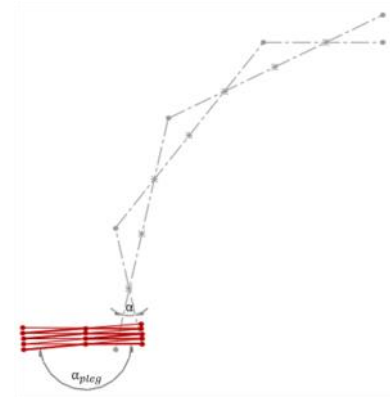
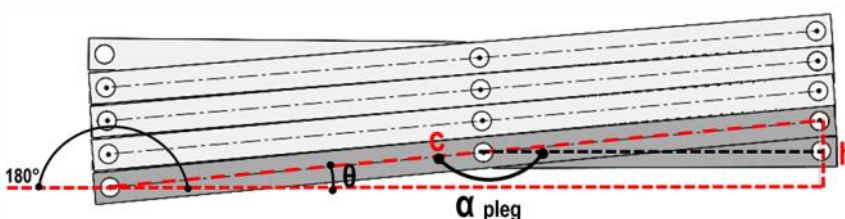


Figura 6.29 Modelo paramétrico de semiarco en SolidWorks® [135], modificación del ángulo de apertura del módulo de tijera (α).
Fuente: Elaboración del autor.

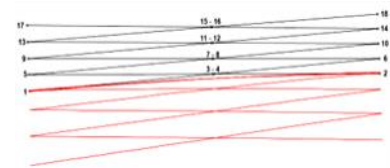


Figura 6.30 Simulación semiarco en posición plegada. Esquema erróneo resultante de deformaciones.
Fuente: Elaboración del autor.

Figura 6.28 Esquema para hallar el ángulo de apertura del módulo de tijera (α_{pleg}) en posición plegada.
Fuente: Elaboración del autor.

Figura 6.31 Posición intermedia de despliegue del semiarco.

Ángulo de apertura. Posición intermedia:

$$\alpha_{pleg, P.inicial} = 2\alpha = 51.42^\circ$$

Ángulo de apertura. Posición final

$$\alpha = 360/2n$$

(n) Número de lados polígono seleccionado

$$\alpha = \alpha_{pleg, P.final} = 25.71^\circ$$

Fuente: Elaboración del autor.

6.4.2 Posición intermedia

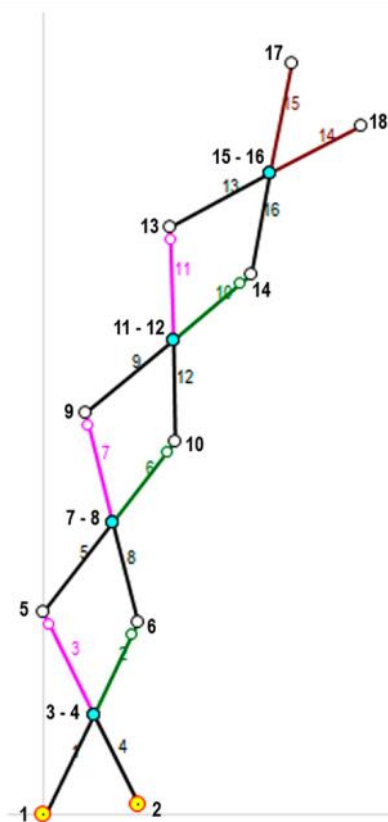
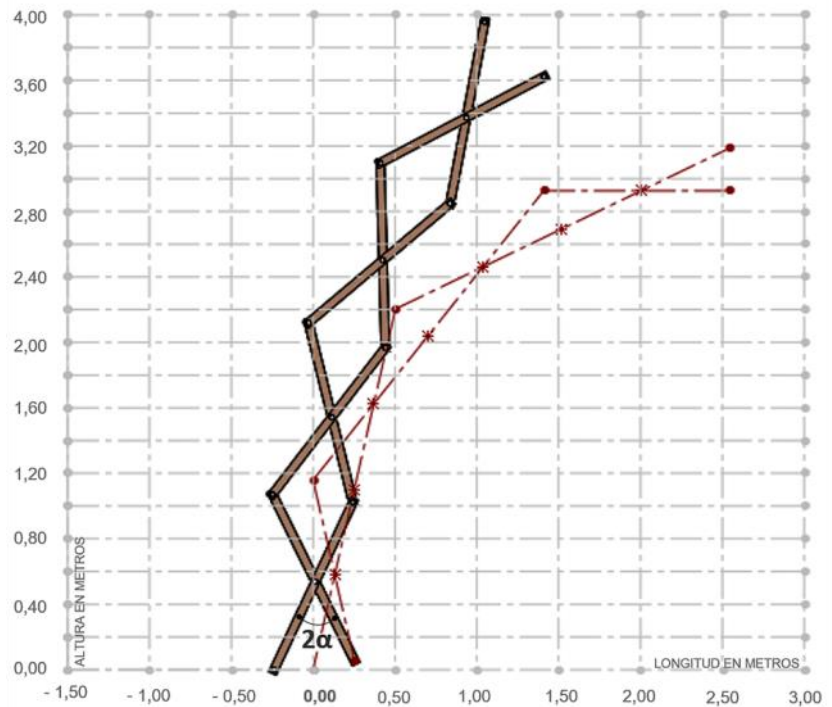


Figura 6.32 Esquema del semiarco en posición intermedia en WinEva8 © [136] Numeración de nudos y barras.

Fuente: Elaboración del autor.

Durante todas las etapas de despliegue, el semiarco cambia de geometría según varía el ángulo de apertura (α) de cada tijera, este movimiento es controlado desde el primer módulo de tijera que se encuentra en la base y transmite el movimiento hasta el módulo de tijera final, gracias a la tipología de encadenamiento que hay entre elementos.

Los análisis y observaciones del despliegue que se generan en este tipo de agrupaciones de tijeras, visto en el capítulo anterior (figuras 5.15 a 5.16), describen aquellas etapas de despliegue críticas, donde la agrupación alcanza una extensión vertical mayor al diámetro de la geometría establecida, esto sucede por los valores definidos en los siguientes parámetros: la longitud de la barra, el número de módulos de tijeras encadenadas y la cantidad de lados del polígono regular seleccionado.

Para el caso de estudio y la proyección de domos desplegables, el objetivo es reducir esta extensión vertical, a través del elemento estructural del semiarco, que minimiza el número de módulos de tijeras a utilizar, disminuye la altura máxima necesaria para la ejecución y facilita el proceso de montaje.

En el semiarco que se analiza en el presente apartado, la posición intermedia de despliegue corresponde a $2(\alpha)$, una etapa de despliegue que genera una extensión vertical considerable de 4.00 metros de altura (figura 6.31).

Para analizar el comportamiento del semiarco en la posición intermedia, se carga nuevamente los parámetros establecidos para realizar la correcta simulación en la plataforma de WinEva8© [136]. (figura 6.20 a 6.22) teniendo en cuenta que la carga aplicar es el peso propio de la estructura y que el esquema en líneas del semiarco debe corresponder a la posición que se analiza en este apartado, así como mantener la misma numeración de barras y nudos en todas las etapas de despliegue (figura 6.32).

Reacciones semiarco en posición intermedia

El esquema resultante de las reacciones, tras la simulación del semiarco en posición intermedia en el programa WinEva8© [136]. expone gráficamente las reacciones que se producen en los apoyos y en los nudos intermedios. Los apoyos del semiarco correspondientes a los nudos uno y dos, tienen reacciones en (x) en positivo y en negativo respectivamente, y en (y) su reacción en el nudo uno es negativo y en el nudo dos en positivo, lo que permite corroborar el correcto sistema de apoyo sobre el suelo (figura 6.33).

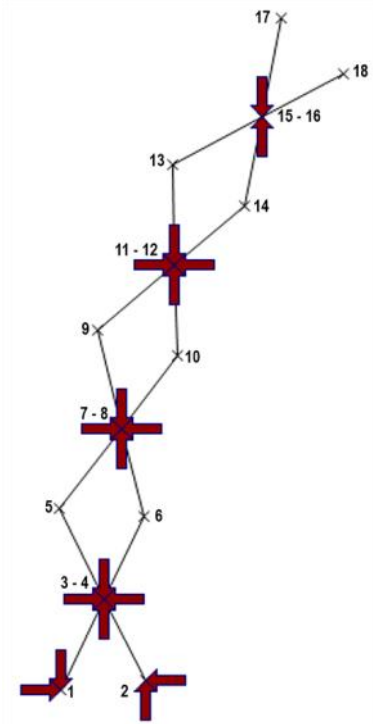


Figura 6.33 Representación de las reacciones que se presentan en los nudos medios, en cada modulo de tijera. Corresponde al cortante que debe soportar el pasador en este punto. Semiarco en posición intermedia. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].
Fuente: Elaboración del autor.


Los nudos intermedios del primer, segundo y tercer módulo de tijera arrojan gráficamente el sentido en positivo y negativo de las reacciones en estos puntos donde las deformaciones son iguales en (x) y en (y), confirmando el correcto ingreso de los datos en el programa. Finalmente se observa en el cuarto módulo de tijera, que no hay reacciones en (x), en el nudo intermedio de la respectiva tijera solo presenta la reacción en (y).


Los valores numéricos de las reacciones del semiarco en posición intermedia se representan en la tabla 6.3, donde se observa que los mayores resultados, en esta etapa de despliegue se encuentran en los nudos tres y cuatro, correspondientes a los nudos intermedios del primer módulo de tijera, el más cercano a la base y articulado a los apoyos, siendo la reacción en (y) la de mayor valor (0.016 T), y la reacción en (x) de (0.009 T).

Los menores valores se encuentran en los nudos intermedios del cuarto módulo de tijera, los cuales solo se presentan en (x) y en (y), con un valor de (0.001 T). Esto se debe a que es el módulo de tijera que menos peso carga al estar posicionado en la parte más alta del semiarco y no estar enlazado con más tijeras consecutivas.

REACCIONES - ARCO POSICIÓN INTERMEDIA				
Módulos tijeras	Nº	Rx	Ry	Rz
	Nudo	T	T	mT
Módulo 1	1	0.007	-0.001	-0.000
	2	-0.007	0.014	-0.000
	3	-0.009	0.016	0.000
	4	0.009	-0.016	-0.000
	5	-0.000	-0.000	0.000
Módulo 2	6	0.000	-0.000	0.000
	7	-0.002	0.014	-0.000
	8	0.002	-0.014	0.000
Módulo 3	9	-0.000	0.000	0.000
	10	-0.000	-0.000	0.000
	11	0.001	0.007	-0.000
	12	-0.001	-0.007	0.000
Módulo 4	13	0.000	0.000	0.000
	14	-0.000	-0.000	0.000
	15	0.001	0.001	-0.000
	16	-0.001	-0.001	0.000
	17	0.000	0.000	-0.000
	18	0.000	0.000	-0.000

Tabla 6.3 Valores numéricos de las reacciones en los nudos. Semiarco en posición intermedia de despliegue. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].
Fuente: Elaboración del autor.

 Mayores reacciones de nudos con deformaciones iguales en (x) y en (y)

 Reacciones de nudos con deformaciones iguales en (x) y en (y)



Análisis de axiales y tensiones aproximadas

El esquema gráfico que representa los esfuerzos axiales en el semiarco en la posición intermedia de despliegue, describe el esfuerzo de compresión con color gris, la tracción con color rojo y los esfuerzos variables con color verde a lo largo de barras específicas (figura 6.34).

Se observa que la barras al interior de la geometría, que corresponden a los tramos cortos de cada módulo de tijera, son los que presentan mayor esfuerzo de compresión, disminuyendo en una proporción gráfica a medida que la tijera se encuentre a mayor altura y soporta menos peso. Y la tracción sucede en los tres primeros módulos de tijera, en las barras situadas al exterior de la geometría, las cuales corresponden al tramo largo de la tijera.

En la tabla 6.4 se especifican los valores numéricos del esfuerzo a compresión, siendo la barra dos la que mayor valor presenta con $(-31,30 \text{ kg/cm}^2)$, dentro del rango de la compresión admisible de $54,9 \text{ Kg/cm}^2$ [5], esto se debe a que es una barra localizada en el primer módulo de tijera, en la base del semiarco, soporta el peso de los demás módulos superiores y la estructura completa del semiarco tiende al vuelco. El menor valor a compresión se presenta en la barra 15 que corresponde la barra localizada a mayor altura, en el último módulo de tijera, donde se presenta un valor de $(-0,40 \text{ kg/cm}^2)$.

Los valores numéricos de los esfuerzos a compresión y tracción son representados también gráficamente con color verde y a través de una ventana auxiliar dentro de programa, donde se especifican los valores de las tensiones aproximadas referidas a los valores de compresión y tracción que sucede encada barra (figura 6.34).

Figura 6.34 Representación de los axiales y las tensiones aproximadas (Compresión y tracción). Semiarco en posición intermedia. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136]. Fuente: Elaboración del autor.

COMPRESIÓN - ARCO POSICIÓN INTERMEDIA												
Módulos	Barra Num	Carga crítica de Euler	Nmin	Mmax	Ei = Exc. mínima	Ea = Mmax/Nmin	Et = Ea + Ei	Mt = Nmin * Et	Coefficiente de esbeltez (Ce)	Compresión por flexión Tflex = (Mt/W) * Ce	Compresión por axial = Nmin/Área	Compresión total (Pandeo)
Módulo 1	1	-2,579 T	-0,002 T	0,004 mT	0,02 m	2,046 m	2,066 m	0,004 mT	1,001	-29,03 kg/cm ²	-0,14 kg/cm ²	-29,17 kg/cm ²
	2	-3,185 T	-0,012 T	0,004 mT	0,02 m	0,355 m	0,375 m	0,004 mT	1,003	-30,47 kg/cm ²	-0,83 kg/cm ²	-31,30 kg/cm ²
	3	-2,581 T	0,004 T	0,000 mT					1	-1,68 kg/cm ²	0,26 kg/cm ²	-1,42 kg/cm ²
	4	-3,170 T	-0,015 T	0,000 mT	0,02 m	0,016 m	0,036 m	0,001 mT	1,006	-3,82 kg/cm ²	-1,09 kg/cm ²	-4,91 kg/cm ²
Módulo 2	5	-2,578 T	0,002 T	0,003 mT					1	-18,18 kg/cm ²	0,13 kg/cm ²	-18,05 kg/cm ²
	6	-3,177 T	-0,007 T	0,003 mT	0,02 m	0,357 m	0,377 m	0,003 mT	1,003	-19,25 kg/cm ²	-0,52 kg/cm ²	-19,77 kg/cm ²
	7	-2,58 T	0,001 T	0,000 mT					1	-3,43 kg/cm ²	0,09 kg/cm ²	-3,34 kg/cm ²
	8	-3,179 T	-0,013 T	0,000 mT	0,02 m	0,037 m	0,057 m	0,001 mT	1,005	-5,29 kg/cm ²	-0,94 kg/cm ²	-6,23 kg/cm ²
Módulo 3	9	-2,577 T	0,002 T	0,001 mT					1	-7,64 kg/cm ²	0,13 kg/cm ²	-7,51 kg/cm ²
	10	-3,175 T	-0,003 T	0,001 mT	0,02 m	0,409 m	0,429 m	0,001 mT	1,001	-8,02 kg/cm ²	-0,19 kg/cm ²	-8,21 kg/cm ²
	11	-2,573 T	0,001 T	0,000 mT	0,02 m	0,489 m	0,509 m	0,000 mT	1	-2,30 kg/cm ²	-0,05 kg/cm ²	-2,35 kg/cm ²
	12	-3,183 T	-0,008 T	0,000 mT	0,02 m	0,039 m	0,059 m	0,000 mT	1,003	-3,35 kg/cm ²	-0,58 kg/cm ²	-3,93 kg/cm ²
Módulo 4	13	-1,292 T	0,001 T	0,000 mT					1	-1,3 kg/cm ²	0,08 kg/cm ²	-1,22 kg/cm ²
	14	-0,397 T	0,000 T	0,000 mT	0,02 m	0,508 m	0,528 m	0,000 mT	1,001	-1,35 kg/cm ²	-0,03 kg/cm ²	-1,38 kg/cm ²
	15	-0,645 T	-0,001 T	0,000 mT	0,02 m	0,057 m	0,077 m	0,000 mT	1,002	-0,46 kg/cm ²	-0,06 kg/cm ²	-0,52 kg/cm ²
	16	-3,18 T	-0,003 T	0,000 mT	0,02 m	0,018 m	0,038 m	0,000 mT	1,001	-0,73 kg/cm ²	-0,20 kg/cm ²	-0,93 kg/cm ²

 Mayores valores. Esfuerzo de compresión

 Menores valores. Esfuerzo de compresión

Tabla 6.4 Valores numéricos de los esfuerzos de compresión. Semiarco en posición intermedia. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136]. Fuente: Elaboración del autor.

TRACCIÓN - ARCO POSICIÓN INTERMEDIA						
Módulos	Barra Num	Nmax	Mmax	Tracción por flexión	Tracción por axial	Tracción total
Módulo 1	1	-0,001 T	0,003 mT	22,1 kg/cm ²	-0,1 kg/cm ²	22,0 kg/cm ²
	2	-0,008 T	0,003 mT	23,2 kg/cm ²	-0,6 kg/cm ²	22,6 kg/cm ²
	3	-0,011 T	0,000 mT	2,90 kg/cm ²	-0,8 kg/cm ²	2,1 kg/cm ²
	4	0,003 T	0,000 mT	1,3 kg/cm ²	0,2 kg/cm ²	1,5 kg/cm ²
Módulo 2	5	0,002 T	0,002 mT	13,8 kg/cm ²	0,1 kg/cm ²	13,9 kg/cm ²
	6	-0,005 T	0,002 mT	14,7 kg/cm ²	-0,4 kg/cm ²	14,3 kg/cm ²
	7	-0,01 T	0,000 mT	4,0 kg/cm ²	-0,7 kg/cm ²	3,3 kg/cm ²
	8	0,002 T	0,000 mT	2,6 kg/cm ²	0,1 kg/cm ²	2,7 kg/cm ²
Módulo 3	9	0,002 T	0,001 mT	5,8 kg/cm ²	0,1 kg/cm ²	5,9 kg/cm ²
	10	-0,002 T	0,001 mT	6,1 kg/cm ²	-0,1 kg/cm ²	6,0 kg/cm ²
	11	-0,006 T	0,000 mT	2,5 kg/cm ²	-0,4 kg/cm ²	2,1 kg/cm ²
	12	0,000 T	0,000 mT	1,8 kg/cm ²	0,0 kg/cm ²	1,8 kg/cm ²
Módulo 4	13	0,001 T	0,000 mT	1,0 kg/cm ²	0,1 kg/cm ²	1,1 kg/cm ²
	14	0,000 T	0,000 mT	1,0 kg/cm ²	0,0 kg/cm ²	1,0 kg/cm ²
	15	-0,002 T	0,000 mT	0,6 kg/cm ²	-0,1 kg/cm ²	0,5 kg/cm ²
	16	0,000 T	0,000 mT	0,4 kg/cm ²	0,0 kg/cm ²	0,4 kg/cm ²

 Mayores valores. Esfuerzo de tracción

 Menores valores. Esfuerzo de tracción

Tabla 6.5 Valores numéricos de los esfuerzos a tracción. Semiarco en posición intermedia. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136]. Fuente: Elaboración del autor.

MOMENTOS - ARCO POSICIÓN INTERMEDIA								
Módulo	Barra Num	0	1/6.	2/6.	3/6.	4/6.	5/6.	L
		mT	mT	mT	mT	mT	mT	mT
Módulo 1	1	0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.003	-0.003	-0.004
	2	-0.004	-0.003	-0.003	-0.002	-0.001	-0.001	0.000
	3	0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
	4	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
Módulo 1	5	-0.000	-0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.003
	6	-0.003	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	-0.000	0.000
	7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Módulo 1	9	-0.000	-0.000	-0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
	10	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.000	-0.000	0.000
	11	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	12	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Módulo 1	13	-0.000	0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
	14	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
	15	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
	16	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000

Mayores valores. Momento

Menores valores. Momento

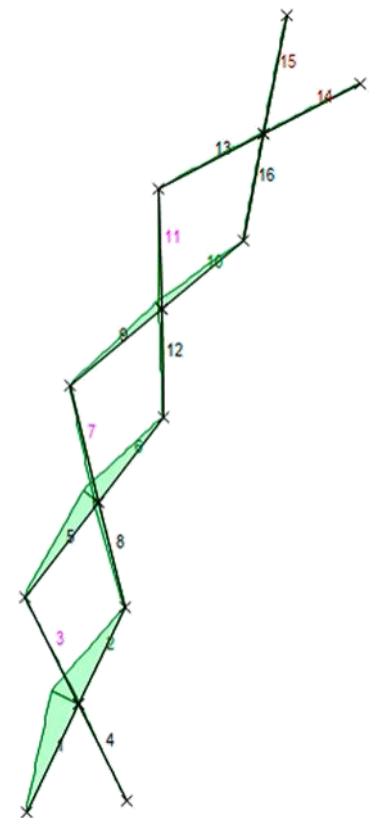
La tabla 6.5 representa los valores numéricos del esfuerzo a tracción, se observa que el mayor valor se genera en la barra dos con (22.6 kg/cm^2), dentro del rango de la tracción admisible para tubos de cartón, correspondiente a $88,7 \text{ Kg/cm}^2$ [5]. Y la menor tracción se genera en las barras 16 con (0.4 kg/cm^2).

Momentos

Los momentos del semiarco en posición intermedia son representados gráficamente en la figura 6.35, se observa en el diagrama que los momentos se producen principalmente en las barras colineales de cada módulo de tijera que van en dirección izquierda a derecha, siendo los de mayor valor las barras uno y dos con (-0.004 mT) y disminuyendo a medida que ascienden los módulos de tijera. A partir de la barra número 11 hasta la 16, los valores de los momentos son mínimos en esta posición de despliegue (Tabla 6.6).

La respuesta de los momentos es el comportamiento esperado para este tipo de estructuras, demostrando que es en la articulación central de cada tijera, la parte que requiere más atención para evitar la rotura de las barras.

Tabla 6.6 Valores numéricos de los momentos. Semiarco en posición intermedia. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].
Fuente: Elaboración del autor.



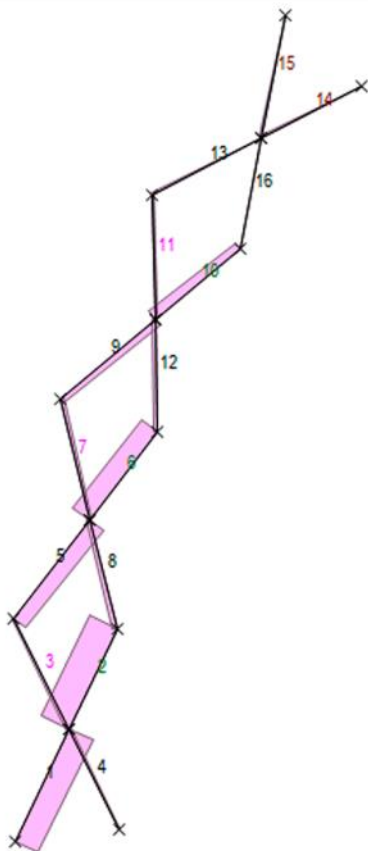
Momentos

Figura 6.35 Representación de los momentos. Semiarco en posición intermedia. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].
Fuente: Elaboración del autor.

Tabla 6.7 Valores numéricos de los cortantes. Semiarco en posición intermedia. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].
Fuente: Elaboración del autor.

CORTANTES - ARCO POSICIÓN INTERMEDIA								
Módulo	Barra Num	0 T	1/6. T	2/6. T	3/6. T	4/6. T	5/6. T	L T
Módulo 1	1	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007
	2	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008	0.008
	3	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.001	-0.001
	4	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
Módulo 2	5	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.005	-0.005	-0.005
	6	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
	7	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	8	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
Módulo 3	9	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002	-0.002
	10	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002
	11	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	12	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
Módulo 4	13	0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
	14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000
	15	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000
	16	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000

 Mayores valores. Cortante
 Menores valores. Cortante



Cortantes

Figura 6.36 Representación de los momentos. Semiarco en posición intermedia. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].
Fuente: Elaboración del autor.

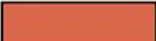
Cortantes


Al igual que los momentos, los mayores valores cortantes suceden en el primer módulo de tijera y se generan principalmente en las barras colineales de cada módulo tijera, que van en dirección izquierda derecha.


En la representación gráfica (figura 6.36), se observa el diagrama de las fuerzas cortantes del semiarco en posición de despliegue intermedia, exponiendo que la parte más débil de los módulos de tijera ocurre en cada articulación central.

Los valores numéricos se describen en la tabla 6.7, siendo los mayores valores de cortante correspondientes a (-0.007 T) en las barras uno y dos y los menores valores, se presentan desde la barra 13 hasta las 16.

DEFORMACIONES - ARCO POSICIÓN INTERMEDIA				
Módulos tijeras	Nº	dx	dy	mRad
	Nudo	mm	mm	
Módulo 1	1	0,0	0,0	4,3
	2	0,0	0,0	-0,2
	3	0,0	0,0	-9,0
	4	0,0	0,0	0,4
	5	-0,4	-0,2	-9,6
	6	8,3	-3,9	6,2
Módulo 2	7	5,3	-4,7	-17,9
	8	5,3	-4,7	4,7
	9	3,2	-5,2	-14,7
Módulo 3	10	15,1	-12,2	11,2
	11	9,3	-12,2	-18,0
	12	9,3	-12,3	10,2
	13	3,6	-12,5	-12,0
Módulo 4	14	16,2	-20,6	17,7
	15	6,9	-18,8	-12,3
	16	6,9	-18,8	17,6
	17	-3,3	-16,9	17,5
	18	10,1	-24,8	-12,7

 Mayores desplazamientos

 Menores desplazamientos

 Reacciones de nudos con deformaciones iguales en (x) y en (y)

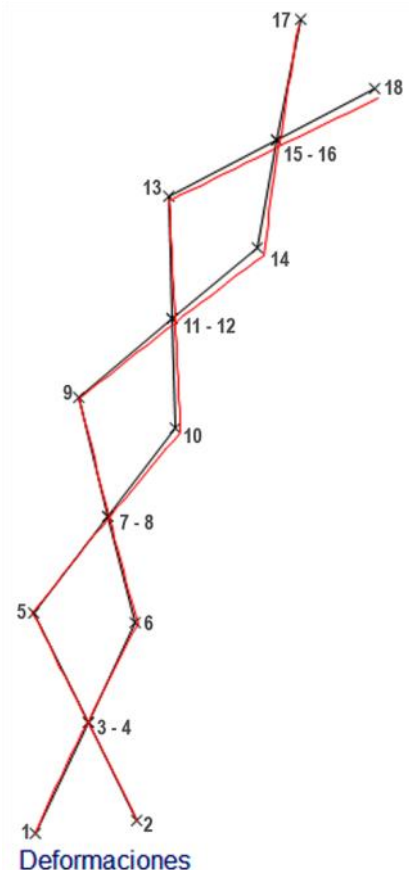
Desplazamientos

La figura 6.37 representa la deformación que sucede en el semiarco en posición de despliegue intermedia, aplicando como carga el peso propio de la estructura, la gráfica en rojo del semiarco es el resultado de los desplazamientos en (x) y en (y) de los nudos, que se exponen de manera numérica en la tabla 6.8

Los resultados numéricos revelan que el mayor desplazamiento en (x) sucede en el nudo 14, que articula el módulo de tijera tres y cuatro por la parte interior del semiarco, con un valor de con 16.2 mm; y su desplazamiento en (y) corresponde a -20.6 mm.

Y el mayor desplazamiento en (y) ocurre en el nudo 18, correspondiente al último nudo del semiarco, desplazándose -24.8 mm en (y) y 10.1 en (x).

Tabla 6.8 Valores numéricos desplazamientos. Semiarco en posición intermedia. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].
Fuente: Elaboración del autor.



Deformaciones

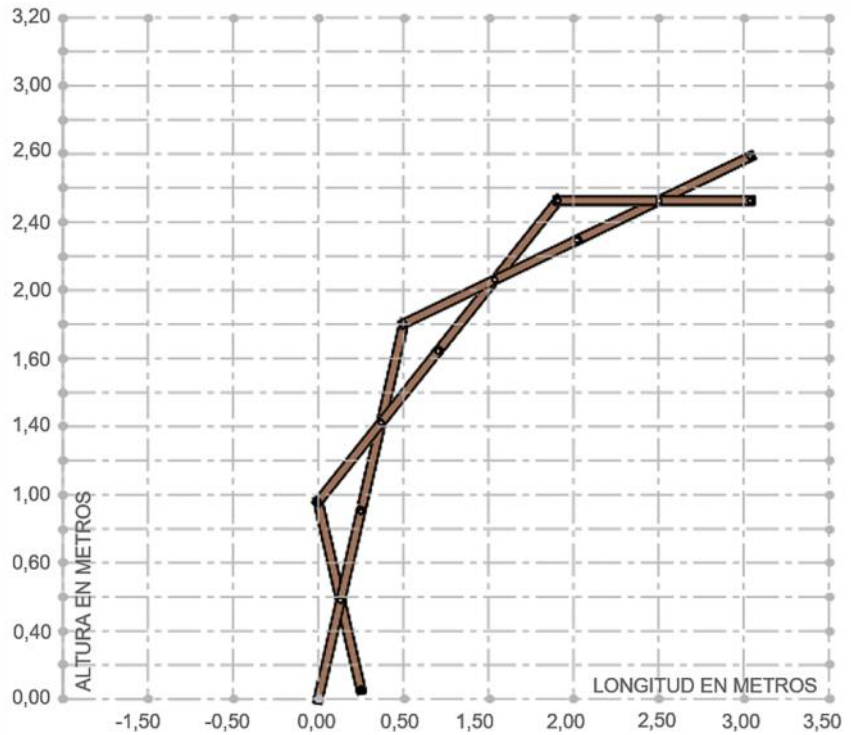
Figura 6.37 Representación de la deformación de la estructura. Semiarco en posición intermedia. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].
Fuente: Elaboración del autor.

Figura 6.38 Posición final de despliegue del semiarco.

Ángulo de apertura. Posición final
 $\alpha = 360/2n$
 (n) Número de lados polígono
 seleccionado
 $\alpha = \alpha_{pleg. Pf} = 25.71^\circ$

Fuente: Elaboración del autor.

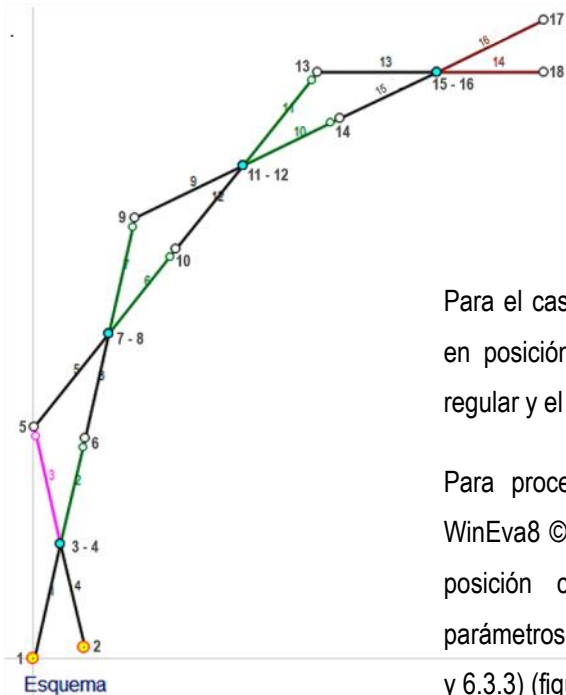
6.4.3 Posición desplegada



La posición desplegada del semiarco debe corresponder a la geometría seleccionada en el proceso de búsqueda de la forma, es decir corresponde a la geometría resultante de dos polígonos regulares estrellados seleccionados previamente a través del método geométrico propuesto en esta investigación, donde el número de lados del polígono, la definición del diámetro o longitud de barra y la selección de la tipología de arco, determina la geométrica final del domo y de su correspondiente semiarco (ver capítulo 5).

Figura 6.39 Esquema del semiarco en posición desplegada en WinEva8 © [136].

Numeración de nudos y barras.
 Fuente: Elaboración del autor.



Para el caso de estudio que se desarrolla en este apartado, el semiarco en posición desplegada corresponde a la geometría de un heptágono regular y el arco del tipo herradura (figuras 6.1, 6.2 y 6.38).

Para proceder al análisis en dos dimensiones dentro del programa WinEva8 © [136], nuevamente se carga la geometría del semiarco en la posición correspondiente para este apartado, implementando los parámetros y condiciones para su correcta simulación (ver apartados 6.3.2 y 6.3.3) (figura 6.39).

Reacciones semiarco en posición desplegada

El esquema resultante de las reacciones, tras la simulación del semiarco en posición desplegada en el programa WinEva8© [136] y aplicando como carga el peso propio de la estructura, expone, al igual que en la posición de despliegue anterior, las reacciones que se producen en los apoyos y en los nudos intermedios (figura 6.40)

La tabla 6.9 describe los valores numéricos de las reacciones que suceden en los nudos, para este caso las mayores reacciones suceden en los nudos tres y cuatro, correspondientes a la articulación central del primer módulo de tijera, con un valor de 0.048 T en (x) y en (y) de 0.068 T,

Y nuevamente las menores reacciones se encuentran en los nudos intermedios del cuarto módulo de tijera, nudos 15 y 16, con un valor de 0.05 T en (x) y 0.001 T en (y).

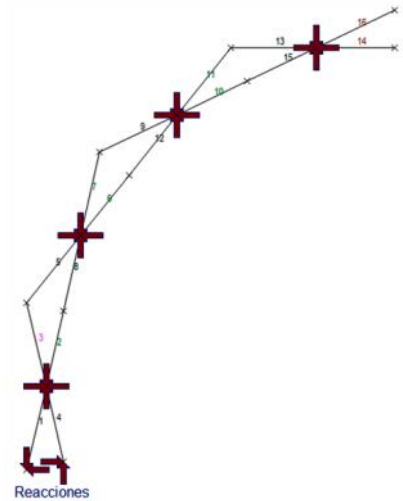


Figura 6.40 Representación de las reacciones que se presentan en los nudos medios, en cada módulo de tijera. Semiarco en posición desplegada. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].
Fuente: Elaboración del autor.

REACCIONES - ARCO EN POSICIÓN FINAL				
Módulos tijeras	Nº	Rx	Ry	Rz
	Nudo	T	T	mT
Módulo 1	1	-0.023	-0.033	0.000
	2	0.023	0.046	-0.000
	3	0.048	0.068	0.000
	4	-0.048	-0.068	-0.000
	5	0.000	0.000	-0.000
Módulo 2	6	-0.000	-0.000	-0.000
	7	0.042	0.040	-0.000
	8	-0.042	-0.040	-0.000
Módulo 3	9	-0.000	-0.000	-0.000
	10	-0.000	-0.000	0.000
	11	0.023	0.012	0.000
	12	-0.023	-0.012	0.000
Módulo 4	13	-0.000	-0.000	0.000
	14	-0.000	-0.000	0.000
	15	0.005	0.001	0.000
	16	-0.005	-0.001	0.000
	17	0.000	0.000	0.000
	18	0.000	0.000	-0.000

Mayores reacciones de nudos con deformaciones iguales en (x) y en (y)

Reacciones de nudos con deformaciones iguales en (x) y en (y)

Tabla 6.9 Valores numéricos de las reacciones en los nudos. Semiarco en posición desplegada. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].
Fuente: Elaboración del autor.

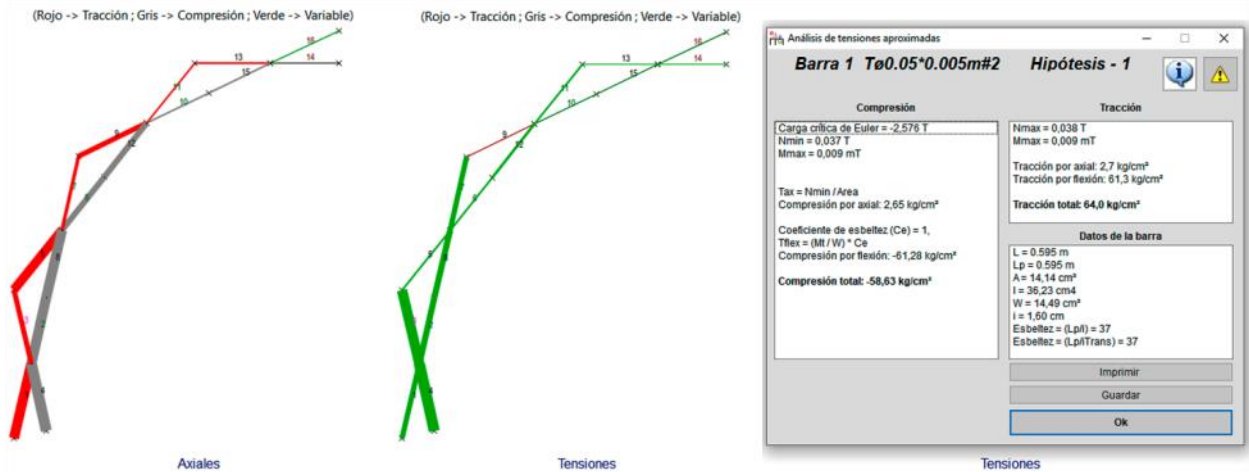


Figura 6.41 Representación de los axiales y las tensiones aproximadas (compresión y tracción). Semiarco en posición desplegada. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136]. Fuente: Elaboración del autor.

Análisis de axiales y tensiones aproximadas

La figura 6.41 representa los esfuerzos axiales y tensiones aproximadas, donde se exponen los valores de compresión y tracción que suceden en el semiarco en la posición desplegada, en la imagen se puede observar en el primer esquema del semiarco, el esfuerzo de compresión representado en color gris, la tracción en color rojo y los esfuerzos variables en color verde a lo largo de las barras en cada módulo de tijera.

Los valores numéricos se indican en la tabla 6.10, donde se observa tanto en la gráfica como en la tabla, que la mayor compresión sucede en la barra cuatro con (-130, 33 kg/cm²), sobrepasando el límite de la compresión admisible de $\sigma_c = 54.9 \text{ Kg/cm}^2$ [5], el semiarco falla en la base y tiende al vuelco. El menor valor concierne a la barra 13 con (-0,72 kg/cm²), esta barra corresponde al tramo largo del último módulo de tijera.

Los valores numéricos de los esfuerzos a compresión y tracción también son representados gráficamente con color verde y a través de una ventana auxiliar dentro de programa, donde se especifican los valores aproximados para cada barra (figura 6.41).

Para la tracción se observa en la tabla 6.11 que el mayor valor ocurre en la barra cuatro con (-124.8 kg/cm²), sobrepasando el límite elástico de los tubos de cartón definido en $\sigma_t = 88.7 \text{ kg/cm}^2$ [5]. Y el menor valor ocurre en las barras 10 y 14 con (1,5 kg/cm²).

COMPRESIÓN - ARCO EN POSICIÓN FINAL												
Módulos	Barra Num	Carga crítica de Euler	Nmin	Mmax	Ei = Exc. mínima	Ea = Mmax/Nmin	Et = Ea + Ei	Mt = Nmin * Et	Coefficiente de esbeltez (Ce)	Compresión por flexión Tflex = (Mt/W) * Ce	Compresión por axial Tax = Nmin/Area	Compresión total (Pandeo)
Módulo 1	1	-2,576 T	-0,037 T	0,009 mT					1	-61,28 kg/cm ²	2,65 kg/cm ²	-58,63 kg/cm ²
	2	-3,18 T	-0,039 T	0,009 mT	0,02 m	0,230 m	0,250 m	0,01 mT	1,015	-67,63 kg/cm ²	-2,74 kg/cm ²	-70,37 kg/cm ²
	3	-2,585 T	0,017 T	0,017 mT					1	-120,11 kg/cm ²	1,21 kg/cm ²	-118,90 kg/cm ²
	4	-3,169 T	-0,004 T	0,017 mT	0,02 m	0,44 m	0,46 m	0,018 mT	1,016	-127,53 kg/cm ²	-2,80 kg/cm ²	-130,33 kg/cm ²
Módulo 2	5	-2,576 T	0,034 T	0,002 mT					1	-16,55 kg/cm ²	2,42 kg/cm ²	-14,13 kg/cm ²
	6	-3,175 T	-0,022 T	0,002 mT	0,02 m	0,108 m	0,128 m	0,003 mT	1,009	-19,8 kg/cm ²	-1,58 kg/cm ²	-21,38 kg/cm ²
	7	-2,585 T	0,001 T	0,009 mT					1	-61,71 kg/cm ²	0,77 kg/cm ²	-60,94 kg/cm ²
Módulo 3	8	-3,178 T	-0,038 T	0,009 mT	0,02 m	0,236 m	0,256 m	0,001 mT	1,015	-67,94 kg/cm ²	-2,68 kg/cm ²	-70,62 kg/cm ²
	9	No hay compresiones en esta barra										
	10	-3,17 T	-0,006 T	0,000 mT	0,02 m	0,023 m	0,043 m	0,000 mT	1,002	-1,86 kg/cm ²	-0,44 kg/cm ²	-2,30 kg/cm ²
	11	-2,576 T	0,003 T	0,003 mT					1	-18,36 kg/cm ²	0,18 kg/cm ²	-18,18 kg/cm ²
Módulo 4	12	-3,192 T	-0,022 T	0,003 mT	0,02 m	0,123 m	0,143 m	0,003 mT	1,008	-21,53 kg/cm ²	-1,53 kg/cm ²	-23,06 kg/cm ²
	13	-1,292 T	0,005 T	0,000 mT					1	-1,47 kg/cm ²	0,75 kg/cm ²	-0,72 kg/cm ²
	14	-0,397 T	0,000 T	0,000 mT					1	-1,47 kg/cm ²	0 kg/cm ²	-1,47 kg/cm ²
	15	-0,645 T	0,000 T	0,000 mT	0,33 m	0,645 m	0,945 m	0,000 mT	1,001	-2,47 kg/cm ²	-0,03 kg/cm ²	-2,50 kg/cm ²
	16	-3,186 T	-0,006 T	0,000 mT	0,02 m	0,04 m	0,06 m	0,000 mT	1,002	-2,45 kg/cm ²	-0,42 kg/cm ²	-2,87 kg/cm ²

Mayores valores. Esfuerzo de compresión

Menores valores. Esfuerzo de compresión

Tabla 6.10 Valores numéricos de los esfuerzos de compresión. Semiarco en posición desplegada. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136]. Fuente: Elaboración del autor.

TRACCIÓN - ARCO EN POSICIÓN FINAL						
Módulos	Barra Num	Nmax	Mmax	Tracción por flexión	Tracción por axial	Tracción total
Módulo 1	1	-0,038 T	0,009 mT	61,3 kg/cm ²	2,7 kg/cm ²	64,0 kg/cm ²
	2	-0,038 T	0,009 mT	67,6 kg/cm ²	-2,7 kg/cm ²	64,9 kg/cm ²
	3	0,018 T	0,017 mT	120,10 kg/cm ²	1,3 kg/cm ²	121,4 kg/cm ²
	4	-0,039 T	0,017 mT	127,5 kg/cm ²	-2,7 kg/cm ²	124,8 kg/cm ²
Módulo 2	5	0,035 T	0,002 mT	16,6 kg/cm ²	2,5 kg/cm ²	19,1 kg/cm ²
	6	-0,022 T	0,002 mT	19,8 kg/cm ²	-1,5 kg/cm ²	18,3 kg/cm ²
	7	0,012 T	0,009 mT	61,7 kg/cm ²	0,8 kg/cm ²	62,5 kg/cm ²
	8	-0,037 T	0,009 mT	67,9 kg/cm ²	-2,6 kg/cm ²	65,3 kg/cm ²
Módulo 3	9	0,019 T	0,000 mT	1 kg/cm ²	1,4 kg/cm ²	2,4 kg/cm ²
	10	-0,006 T	0,000 mT	1,9 kg/cm ²	-0,4 kg/cm ²	1,5 kg/cm ²
	11	0,003 T	0,003 mT	18,4 kg/cm ²	0,2 kg/cm ²	18,6 kg/cm ²
Módulo 4	12	-0,021 T	0,003 mT	21,5 kg/cm ²	-1,5 kg/cm ²	20,0 kg/cm ²
	13	0,005 T	0,000 mT	1,5 kg/cm ²	0,8 kg/cm ²	2,3 kg/cm ²
	14	0,000 T	0,000 mT	1,5 kg/cm ²	0,0 kg/cm ²	1,5 kg/cm ²
	15	0,000 T	0,000 mT	2,5 kg/cm ²	0,0 kg/cm ²	2,5 kg/cm ²
	16	-0,006 T	0,000 mT	2,5 kg/cm ²	-0,4 kg/cm ²	2,1 kg/cm ²

Mayores valores. Esfuerzo de tracción

Menores valores. Esfuerzo de tracción

No hay que olvidar que en la posición final de despliegue, es el momento donde se juntan todos los semiarcos en la cúspide según la geometría establecida y se obtiene una estructura tipo domo estable al incorporar el elemento de la clave o nodo principal y los valores de la compresión se reducirían.

El objetivo es evitar sobrepasar los límites de compresión o tracción del material, buscando aquella posición previa a la etapa final para reducir un riesgo de colapso y lograr que la estructura este en equilibrio al obtener la geometría del domo.

Tabla 6.11 Valores numéricos de los esfuerzos a tracción. Semiarco en posición desplegada. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136]. Fuente: Elaboración del autor.

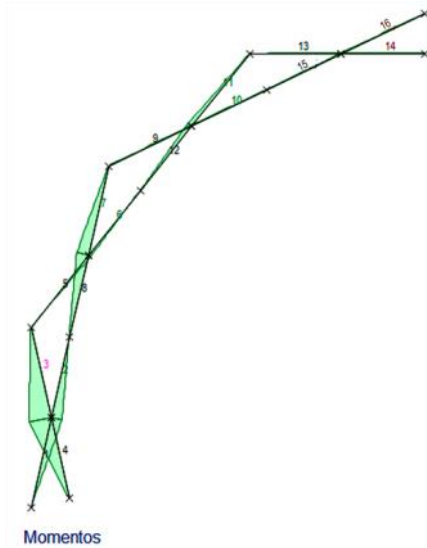


Figura 6.42 Representación de los momentos. Semiarco en posición desplegada. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].
Fuente: Elaboración del autor.

Momentos

El diagrama de momentos del semiarco en posición desplegada se representan en la figura 6.42, se observa que en esta posición ahora los mayores momentos se producen principalmente en las barras colineales de cada módulo de tijera que van desde el nudo interior inferior del semiarco hacia el nudo superior exterior, al inverso de lo que sucede en la posición de despliegue intermedia. Los momentos de mayor valor ocurren en las barras tres y cuatro con (-0.017 mT) , y los menores valores ocurren a partir de la barra 13 hasta la 16.

El primer módulo de tijera es el más afectado por los momentos que se producen allí, de esta forma es necesario prever soluciones técnicas para sobrellevar estos esfuerzos, cambiando la sección de la barras, ampliando su espesor o implementando cables o barras de bloqueo que colaboran a reducir los momentos en este punto.

Cortantes

El diagrama de cortantes similar al de los momentos, también presenta los mayores cortantes en las barras colineales de cada módulo de tijera que van desde el nudo interior inferior del semiarco hacia el nudo superior exterior (figura 6.43). Los momentos de mayor valor ocurren en las barras tres y cuatro con (-0.029 mT) y (-0.033 mT) respectivamente, y los menores valores ocurren en las barras 13 y 14 (Tabla 6.13).

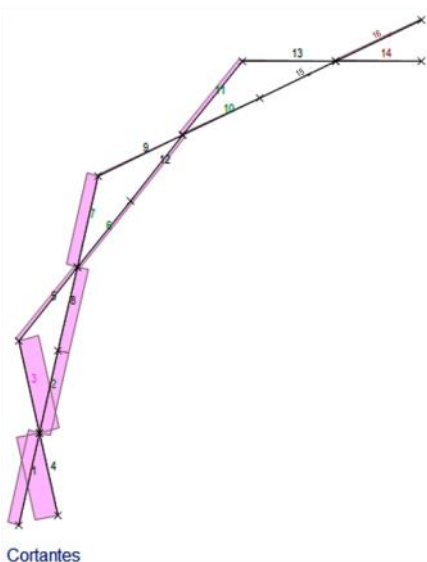


Figura 6.43 Representación de los cortantes. Semiarco en posición desplegada. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].
Fuente: Elaboración del autor.

MOMENTOS - ARCO EN POSICIÓN FINAL								
Módulo	Barra Num	0 mT	1/6. mT	2/6. mT	3/6. mT	4/6. mT	5/6. mT	L mT
Módulo 1	1	-0.000	0.001	0.003	0.004	0.006	0.007	0.009
	2	0.009	0.007	0.006	0.004	0.003	0.001	0.000
	3	0.000	0.003	0.006	0.009	0.012	0.015	0.017
	4	0.017	0.015	0.012	0.009	0.006	0.003	-0.000
Módulo 1	5	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.002	0.002
	6	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.000	0.000
	7	-0.009	-0.007	-0.006	-0.004	-0.003	-0.001	0.000
	8	0.000	-0.001	-0.003	-0.004	-0.006	-0.007	-0.009
Módulo 1	9	0.000	0.000	0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
	10	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	0.000	0.000
	11	-0.003	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	-0.000	0.000
	12	-0.000	-0.000	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002	-0.003
Módulo 1	13	-0.000	0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
	14	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
	15	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
	16	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	0.000

Mayores valores. Momento

Menores valores. Momento

CORTANTE - ARCO EN POSICIÓN FINAL								
Módulo	Barra Num	0 T	1/6. T	2/6. T	3/6. T	4/6. T	5/6. T	L T
Módulo 1	1	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
	2	-0.016	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017
	3	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029	0.029
	4	-0.032	-0.032	-0.032	-0.032	-0.032	-0.033	-0.033
Módulo 2	5	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
	6	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.005	-0.005	-0.005
	7	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015
	8	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017	-0.017
Módulo 3	9	0.000	0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.001	-0.001
	10	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000
	11	0.005	0.005	0.005	0.004	0.004	0.004	0.004
	12	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005	-0.005
Módulo 4	13	0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
	14	0.000	-0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000
	15	0.001	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000
	16	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.001	-0.001	-0.001

Mayores valores. Cortante

Menores valores. Cortante

Tabla 6.12 Valores numéricos de los momentos. Semiarco en posición desplegada. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].
Fuente: Elaboración del autor.

Tabla 6.13 Valores numéricos de los cortantes. Semiarco en posición desplegada. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].
Fuente: Elaboración del autor.

Desplazamientos

La figura 6.44 representa la deformación que sucede en el semiarco en posición desplegada, aplicando como carga el peso propio de la estructura, la gráfica en rojo del semiarco es el resultado de los desplazamientos en (x) y en (y) de los nudos, que se exponen de manera numérica en la tabla 6.14.

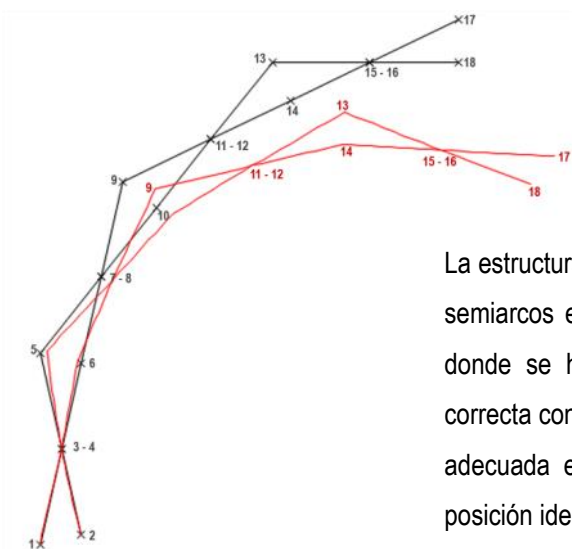
Para la investigación esta posición es de gran interés, ya que a partir de esta deformación, parte el proceso de búsqueda de la posición ideal de despliegue, aquella posición de despliegue previa a la posición final cuya deformación sea la geometría establecida, en el siguiente apartado se realiza con mayor detalle esta búsqueda.

Ahora, al observar los resultados de los desplazamientos en la posición final de despliegue, los resultados numéricos revelan que el mayor desplazamiento en (x) sucede en el nudo 17 con 582,4 mm y en el nudo 18 con 439,4 mm, también el mayor desplazamiento en (y) sucede en los mismos nudos con -833.8 mm y -744.3 mm respectivamente (Tabla 6.14).

Los resultados de la deformación demuestra los grandes desplazamientos que sufre el semiarco al posicionarse en la etapa final de despliegue, esta deformación sucede en el supuesto de que el semiarco en estudio, no se articula con el nudo central en la cúspide, generando el fallo en las barras y de esta manera el colapso de la estructura.

Figura 6.44 Representación de la deformación de la estructura. Semiarco en posición desplegada. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].

Fuente: Elaboración del autor.



La estructura en equilibrio debe corresponder al correcto encuentro de los semiarcos en la cúspide, a través de un adecuado proceso de montaje donde se ha de evitar los grandes desplazamientos, garantizando la correcta conexión entre semiarcos al nodo central, controlando de manera adecuada el despliegue manual de los semiarcos y articulando en la posición ideal las barras finales de cada semiarco al nodo principal (figura 6.45).

DEFORMACIONES - ARCO EN POSICIÓN FINAL				
Módulos tijeras	Nº	dx	dy	mRad
	Nudo	mm	mm	
Módulo 1	1	0,0	0,0	-9,8
	2	0,0	0,0	15,9
	3	0,3	0,0	18,9
	4	0,3	0,0	-34,7
	5	42,2	9,6	-76,2
Módulo 2	6	-18,7	4,3	-173,8
	7	76,4	-17,7	-68,3
	8	76,4	-17,7	-199,7
Módulo 3	9	203,2	-46,6	-219,3
	10	103,0	-38,9	-372,9
	11	259,9	-163,9	-219,5
	12	259,9	-163,9	-380,5
Módulo 4	13	439,4	-307,2	-386,5
	14	311,1	-270,0	-553,3
	15	439,4	-536,8	-386,9
	16	439,4	-536,8	-553,8
	17	582,4	-833,8	-554,3
	18	439,4	-744,3	-387,3

 Mayores desplazamientos

 Menores desplazamientos


 Reacciones de nudos con deformaciones iguales en (x) y en (y)

Tabla 6.14 Valores numéricos de los desplazamientos. Semiarco en posición desplegada. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].
Fuente: Elaboración del autor.

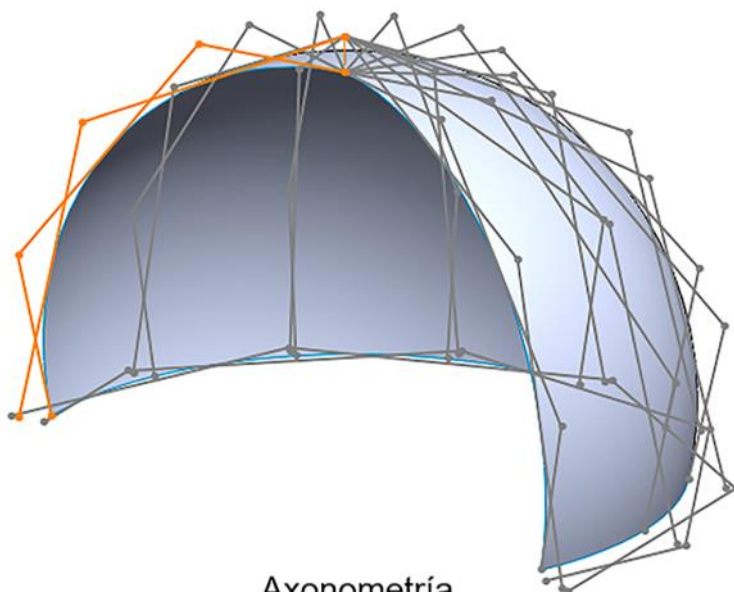
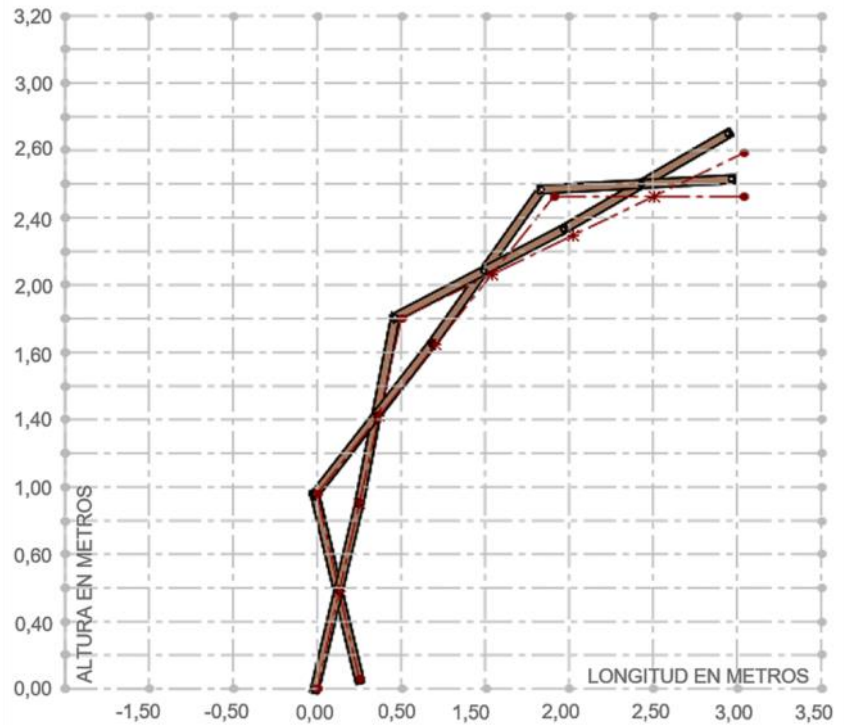


Figura 6.45 Domo desplegable. Geometría de semiarcos que se juntan en la cúspide.
Fuente: Elaboración del autor.

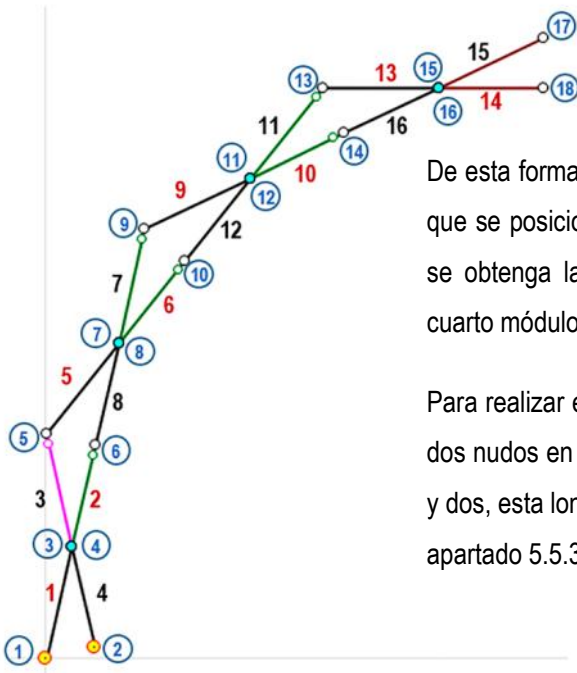
Figura 6.46 Posición ideal de despliegue del semiarco. Aquella posición de despliegue previa a la posición final, donde la deformación de la estructura por peso propio permite obtener la posición de despliegue determinada por el método geométrico propuesto en esta investigación.

Fuente: Elaboración del autor.

6.4.4 Posición ideal de despliegue



El presente apartado expone la posición ideal de despliegue del semiarco, definida como aquella posición de despliegue anterior a la posición final, donde el semiarco deformado que arroja la simulación del WinEva8© [136] coincide con la geometría final definida según el método propuesto.



De esta forma, los nudos 13, 15, 16 y 18 tendrán un desplazamiento para que se posicionen aproximadamente a la misma altura sobre el eje (y) y se obtenga la horizontalidad de las barras 13 y 14 correspondientes al cuarto módulo de tijera (figura 6.47).

Para realizar este proceso, se identifica la distancia sobre el eje (x) de los dos nudos en que se apoya el semiarco, correspondiente a los nudos uno y dos, esta longitud denominada (k) se halla con la siguiente ecuación (ver apartado 5.5.3, figura 5.29):

$$k = \sqrt{b^2 - a^2}$$

Figura 6.47 Posición ideal de despliegue del semiarco. Numeración de barras y nudos. Fuente: Elaboración del autor.

En este caso, definida (k) con una longitud de 25.00 cm, se propone una medida aleatoria para aumentar la longitud (k) y representar la apertura de las tijeras hacia un movimiento de plegado. Se decide sumar 5.00 cm a la distancia (k), y a partir de esta nueva longitud, se busca una posición aproximada de apertura a través del método de ponderación de mitades (figura 6.48).

La figura 6.48 representa de forma esquemática el detalle del procedimiento realizado, dividiendo la distancia adicional de 5.0 cm en segmentos iguales y a manera de convenciones, se representa por colores las alternativas de semiarcos en posiciones de despliegue previas a la etapa final de despliegue, según las diferentes distancias resultantes de la ponderación, se representa la geometría del primer módulo de tijera del semiarco propuesto, en contraste con la geometría original que corresponde a la etapa final de despliegue.

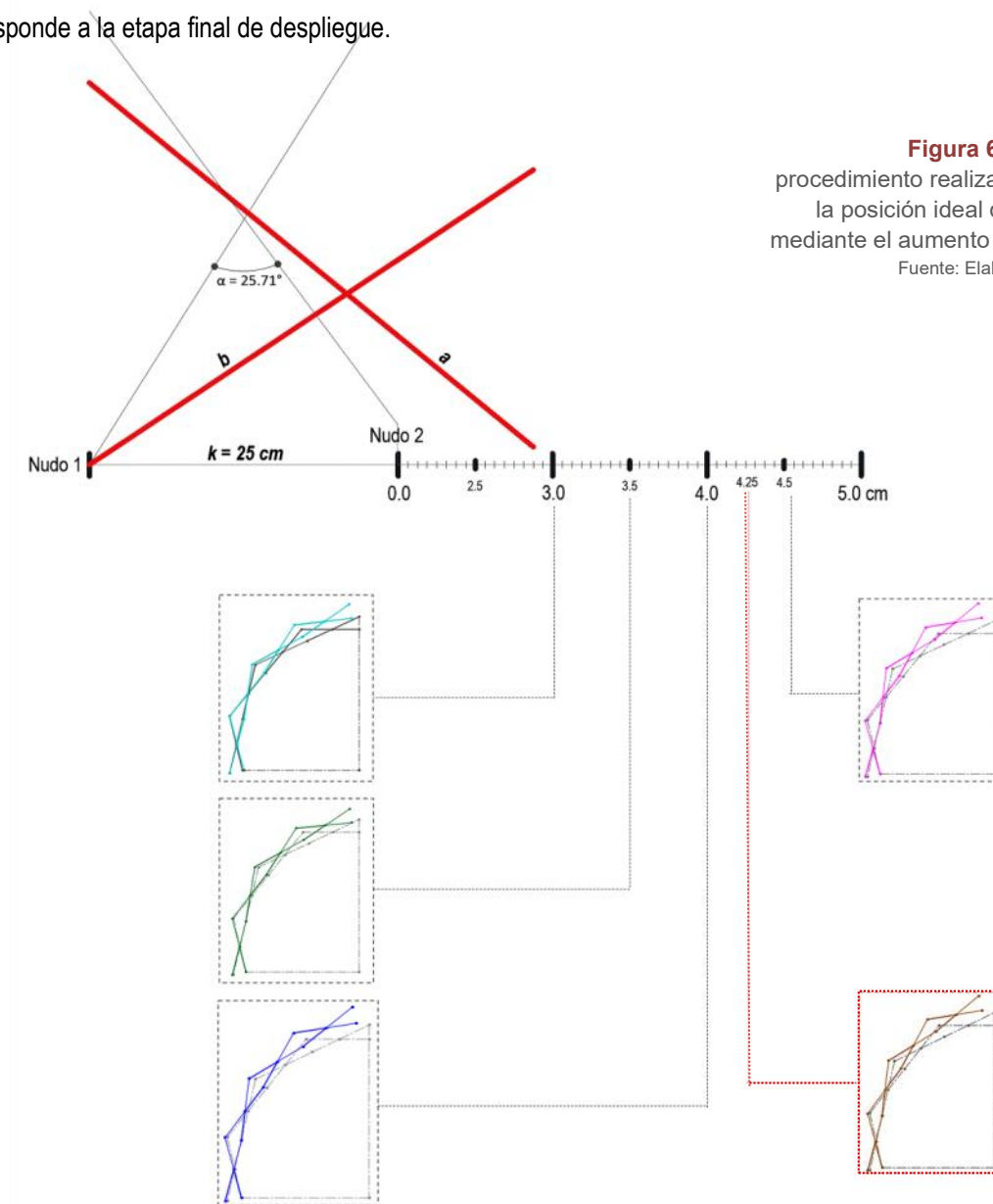
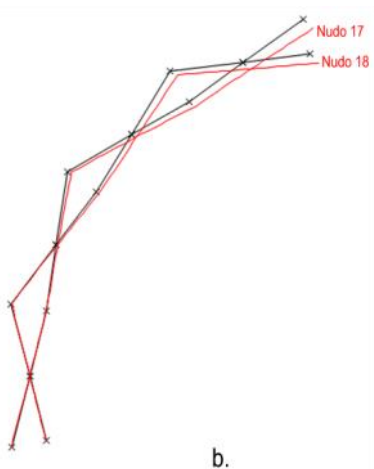
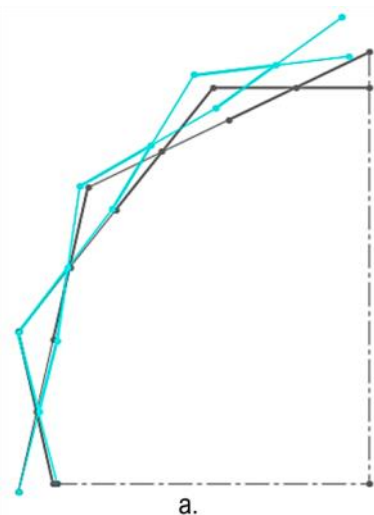


Figura 6.48 Esquema procedimiento realizado para hallar la posición ideal de despliegue, mediante el aumento del valor de k .
Fuente: Elaboración del autor.



A continuación, se presenta la simulación de los semiarcos en las distintas posiciones de despliegue determinadas según la figura 6.48 y su simulación en el WinEva8 © [136].

Para analizar los resultados de las deformaciones y determinar la posición ideal de despliegue del semiarco, se observa principalmente el desplazamiento de los nudos 17 y 18, buscando aquella posición de despliegue previa a la etapa final de despliegue, donde estos coincidan sobre el eje (y) y se posicionen aproximadamente a la geometría del semiarco en la etapa final de despliegue (figura 6.49).

La interpretación del análisis y de los resultados son expuestos en la tabla 6.15, donde se observan los esquemas gráficos de cada semiarco propuesto como posible posición ideal, junto con la deformación resultante según la simulación de WinEva8© [136] y los valores numéricos de los desplazamientos en cada caso, correspondientes a los nudos 17 y 18.

La ponderación y búsqueda de la posición ideal de despliegue arroja como resultado que se debe llegar a una distancia de:

$$k + 4.25 \text{ cm}$$

Este valor, indica la apertura necesaria que se ha de tener en cuenta en los semiarcos para que por peso propio, la deformación de la estructura obtenga la geometría establecida por el método propuesto (tabla 6.15, recuadro en rojo).

Es importante mencionar que el valor de k para la posición ideal de despliegue, determinada para este caso de estudio, es condicionada por todos los parámetros definidos anteriormente, como geometría, tipo de arco, material y sección a utilizar, junto con los valores variables dentro de la simulación realizada que afecta directamente el resultado en la búsqueda de la posición ideal de despliegue.

En la práctica y construcción del prototipo, si se estima esta apertura para el montaje de la estructura, se logra optimizar el proceso de montaje y garantizar mayor seguridad en el proceso de despliegue, evitando un posible volcamiento del arco (Ver capítulo 10. Prototipos)

Figura 6.49 Esquema procedimiento realizado para hallar la posición ideal de despliegue.

a. Posible semiarco en la posición ideal de despliegue ($k + 3 \text{ cm}$), comparado con el semiarco en la posición final de despliegue.

Fuente: Elaboración del autor.

Tabla 6.15 Proceso búsqueda de la posición ideal de despliegue del semiarco.
Resultados desplazamientos nudos 17 y 18 con valor de k variable. Fuente: Elaboración del autor.

Semiarco posición $k + 30$ mm	Simulación semiarco WinEva	Nudos	Posición nudos 17 y 18 etapa final de despliegue (mm)	Posición ideal de despliegue $k + 30$ (mm)	Desplazamientos por peso propio (mm)	Posición nudos. Semiarco deformado (mm)	
		17	x	2539	2341	414,52	2756
			y	3184	3437	-434,205	3003
		18	x	2539	2390	315,28	2705
			y	2926	3154	-390,482	2764
Semiarco posición $k + 35$ mm	Simulación semiarco WinEva	Nudos	Posición nudos 17 y 18 etapa final de despliegue (mm)	Posición ideal de despliegue $k + 35$ (mm)	Desplazamientos por peso propio (mm)	Posición nudos. Semiarco deformado (mm)	
		17	x	2539	2374	441,739	2816
			y	3184	3399	-486,067	2913
		18	x	2539	2416	335,585	2752
			y	2926	3120	-346,568	2773
Semiarco posición $k + 40$ mm	Simulación semiarco WinEva	Nudos	Posición nudos 17 y 18 etapa final de despliegue (mm)	Posición ideal de despliegue $k + 40$ (mm)	Desplazamientos por peso propio (mm)	Posición nudos. Semiarco deformado (mm)	
		17	x	2539	2277	366,395	2643
			y	3184	3504	-350,659	3153
		18	x	2539	2343	278,771	2622
			y	2926	3214	-316,7	2897
Semiarco posición $k + 45$ mm	Simulación semiarco WinEva	Nudos	Posición nudos 17 y 18 etapa final de despliegue (mm)	Posición ideal de despliegue $k + 45$ (mm)	Desplazamientos por peso propio (mm)	Posición nudos. Semiarco deformado (mm)	
		17	x	2539	2245	348,474	2593
			y	3184	3565	-319,245	3246
		18	x	2539	2319	265,591	2585
			y	2926	3242	-289,406	2953
Semiarco posición $k + 42,5$ mm	Simulación semiarco WinEva	Nudos	Posición nudos 17 y 18 etapa final de despliegue (mm)	Posición ideal de despliegue $k + 42,5$ (mm)	Desplazamientos por peso propio (mm)	Posición nudos. Semiarco deformado (mm)	
		17	x	2539	2261	359,361	2620
			y	3184	3520	-336,317	3184
		18	x	2539	2331	268,523	2600
			y	2926	3228	-304,272	2924

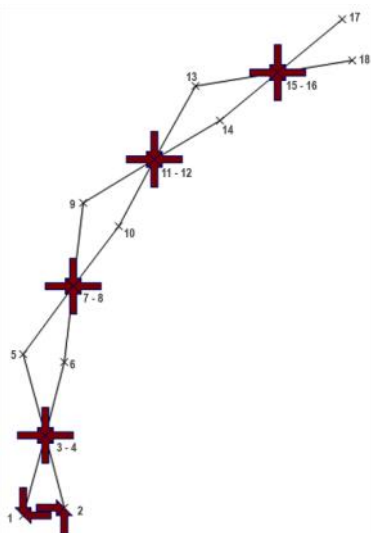


Figura 6.50 Representación de las reacciones que se presentan en los nudos medios, en cada módulo de tijera. Semiarco en posición ideal de despliegue. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136]. Fuente: Elaboración del autor.

Definida la geometría del semiarco en la posición ideal de despliegue, que según el análisis previo genera una deformación que coincide aproximadamente con la geometría establecida por el método geométrico.

Se procede a analizar los demás esquemas y resultados del semiarco en esta posición específica, para entender su comportamiento y esfuerzos resultantes.

Reacciones semiarco en posición ideal

Las reacciones generadas para esta posición calculadas con el peso propio de la estructura, se representan en la figura 6.50 y sus valores en las tabla 6.16. Al igual que en los casos anteriores las reacciones se presentan en los apoyos y en los nudos intermedios de cada módulo de tijera. Siendo las mayores reacciones las que suceden en el primer módulo de tijera, en los nudos tres y cuatro, con un valor de 0.027 T en (x) y en (y) de 0.050 T. Para el caso en estudio habrá que tener en cuenta este valor para escoger el pasador adecuado, según tablas de resistencia de tornillos normalizados.

Las reacciones van disminuyendo a medida que se asciende, siendo menores los valores de los nudos intermedios del último módulo de tijera, nudos 15 y 16, que arrojan un valor de 0.04 T en (x) y 0.001 T en (y) (ver tabla 6.16).

Análisis de axiales y tensiones aproximadas

Para esta posición del semiarco, se observa en la figura 6.51, en el primer esquema, que el mayor esfuerzo de compresión sucede en el primer módulo del semiarco, correspondiente al tramo corto e interior de la tijera, la barra cuatro soporta una compresión (-84,42 kg/cm²), nuevamente sobrepasando el límite admisible para tubos de cartón de $\sigma_c = 54.9$ Kg/cm² [5] y el menor valor está representado en la barra 13 con (-0,83 kg/cm²) (ver tabla 6.17).

Para los esfuerzos a tracción se observa que el mayor valor se encuentra también en la barra cuatro con (80,3 kg/cm²), un valor que está próximo al límite elástico de los tubos de cartón definido en $\sigma_t = 88.7$ kg/cm² [5]. Y el menor valor ocurre en la barra 14 con (1,5 kg/cm²) (ver figura 6.49 y tabla 6.18).

REACCIONES - ARCO POSICIÓN IDEAL				
Módulos tijeras	Nº	Rx	Ry	Rz
	Nudo	T	T	mT
Módulo 1	1	-0.013	-0.022	0.000
	2	0.013	0.034	0.000
	3	0.027	0.050	0.000
	4	-0.027	-0.050	0.000
	5	0.000	0.000	-0.000
	6	0.000	0.000	-0.000
Módulo 2	7	0.026	0.033	0.000
	8	-0.026	-0.033	-0.000
	9	0.000	0.000	-0.000
Módulo 3	10	0.000	0.000	-0.000
	11	0.015	0.012	-0.000
	12	-0.015	-0.012	-0.000
Módulo 4	13	-0.000	-0.000	0.000
	14	0.000	-0.000	0.000
	15	0.004	0.001	-0.000
	16	-0.004	-0.001	0.000
	17	0.000	0.000	-0.000
	18	0.000	0.000	-0.000

 Mayores reacciones de nudos con deformaciones iguales en (x) y en (y)

 Reacciones de nudos con deformaciones iguales en (x) y en (y)

Estos resultados, indican que la estructura colapsara en la base y seguramente habrá que incorporar soluciones técnicas a la estructura del semiarco que sean adecuadas al material, específicamente al primer módulo de tijera que es el más afectado. Las soluciones más comunes a implementar se basan en aumentar la sección de los tubos de cartón de la base, disminuir de sección las barras de los últimos módulos de tijera o implementar cables o sistemas de bloqueo para obtener un despliegue controlado y permitan disminuir los esfuerzos de compresión y tracción, además de evitar el vuelco de la estructura, durante el despliegue y su uso.


Tabla 6.16 Valores numéricos de las reacciones en los nudos. Semiarco en posición ideal de despliegue. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136]. Fuente: Elaboración del autor.

Figura 6.51 Representación de los axiales y las tensiones aproximadas compresión y tracción). Semiarco en posición ideal. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].

(Rojo -> Tracción ; Gris -> Compresión ; Verde -> Variable) (Rojo -> Tracción ; Gris -> Compresión ; Verde -> Variable)



COMPRESIÓN - ARCO POSICIÓN IDEAL												
Módulos	Barra Num	Carga crítica de Euler	Nmin	Mmax	Ej = Exc. mínima	Ea = Mmax/Nmin	Et = Ea + Ei	Mt = Nmin * Et	Coefficiente de esbeltez (Ce)	Compresión por flexión Tflex = (Mt/W) * Ce	Compresión por axial Tax = Nmin/Área	Compresión total (Pandeo)
Módulo 1	1	-2,581 T	-0,024 T	0,004 mT					1	-26,30 kg/cm ²	1,7 kg/cm ²	-24,60 kg/cm ²
	2	-3,172 T	-0,031 T	0,004 mT	0,02 m	0,123 m	0,143 m	0,004 mT	1,012	-30,94 kg/cm ²	-2,19 kg/cm ²	-33,13 kg/cm ²
	3	-2,576 T	0,013 T	0,011 mT					1	-77,28 kg/cm ²	0,90 kg/cm ²	-76,38 kg/cm ²
	4	-3,177 T	-0,030 T	0,011 mT	0,02 m	0,378 m	0,398 m	0,012 mT	1,012	-82,32 kg/cm ²	-2,10 kg/cm ²	-84,42 kg/cm ²
Módulo 2	5	-2,587 T	0,023 T	0,000 mT					1	-2,87 kg/cm ²	1,65 kg/cm ²	-1,22 kg/cm ²
	6	-3,168 T	-0,018 T	0,000 mT	0,02 m	0,023 m	0,043 m	0,001 mT	1,007	-5,39 kg/cm ²	-1,27 kg/cm ²	-6,66 kg/cm ²
	7	-2,574 T	0,008 T	0,006 mT					1	-42,47 kg/cm ²	0,55 kg/cm ²	-41,92 kg/cm ²
	8	-3,190 T	-0,029 T	0,006 mT	0,02 m	214,000 m	0,234 m	0,007 mT	1,011	-46,96 kg/cm ²	-2,04 kg/cm ²	-49,00 kg/cm ²
Módulo 3	9	-2,583 T	0,013 T	0,001 mT					1	-3,65 kg/cm ²	0,95 kg/cm ²	-2,70 kg/cm ²
	10	-3,176 T	-0,005 T	0,001 mT	0,02 m	0,099 m	0,119 m	0,001 mT	1,002	-4,4 kg/cm ²	-0,36 kg/cm ²	-4,78 kg/cm ²
	11	-2,581 T	0,002 T	0,002 mT					1	-13,69 kg/cm ²	0,11 kg/cm ²	-13,58 kg/cm ²
	12	-3,183 T	-0,017 T	0,002 mT	0,02 m	0,116 m	0,136 m	0,002 mT	1,007	-16,14 kg/cm ²	-1,21 kg/cm ²	-17,35 kg/cm ²
Módulo 4	13	-1,288 T	0,004 T	0,000 mT					1	-1,45 kg/cm ²	0,56 kg/cm ²	-0,89 kg/cm ²
	14	-0,397 T	0,000 T	0,000 mT	0,091 m	1,686 m	1,776 m	0,000 mT	1	-1,53 kg/cm ²	-0,01 kg/cm ²	-1,54 kg/cm ²
	15	-0,645 T	-0,001 T	0,000 mT	0,158 m	0,365 m	0,523 m	0,000 mT	1,001	-2 kg/cm ²	-0,04 kg/cm ²	-2,04 kg/cm ²
	16	-3,178 T	-0,005 T	0,000 mT	0,02 m	0,041 m	0,061 m	0,000 mT	1,002	-2,09 kg/cm ²	-0,35 kg/cm ²	-2,44 kg/cm ²

 Mayores valores. Esfuerzo de compresión

 Menores valores. Esfuerzo de compresión

Tabla 6.17 Valores numéricos de los esfuerzos de compresión. Semiarco en posición ideal. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136]. Fuente: Elaboración del autor.

TRACCIÓN - ARCO POSICIÓN IDEAL						
Módulos	Barra Num	Nmax	Mmax	Tracción por flexión	Tracción por axial	Tracción total
Módulo 1	1	-0,025 T	0,004 mT	26,3 kg/cm ²	1,8 kg/cm ²	28,1 kg/cm ²
	2	-0,030 T	0,004 mT	30,9 kg/cm ²	-2,1 kg/cm ²	28,8 kg/cm ²
	3	0,014 T	0,011 mT	77,3 kg/cm ²	1,0 kg/cm ²	78,3 kg/cm ²
	4	-0,029 T	0,011 mT	82,3 kg/cm ²	-2,0 kg/cm ²	80,3 kg/cm ²
Módulo 2	5	0,024 T	0,000 mT	2,9 kg/cm ²	1,7 kg/cm ²	4,6 kg/cm ²
	6	-0,017 T	0,000 mT	5,4 kg/cm ²	-1,2 kg/cm ²	4,2 kg/cm ²
	7	0,009 T	0,006 mT	42,5 kg/cm ²	0,6 kg/cm ²	43,1 kg/cm ²
	8	-0,028 T	0,006 mT	47,0 kg/cm ²	-2,0 kg/cm ²	45,0 kg/cm ²
Módulo 3	9	0,014 T	0,001 mT	3,7 kg/cm ²	1,0 kg/cm ²	4,7 kg/cm ²
	10	-0,005 T	0,001 mT	4,4 kg/cm ²	-0,3 kg/cm ²	4,1 kg/cm ²
	11	0,002 T	0,002 mT	13,7 kg/cm ²	0,2 kg/cm ²	13,9 kg/cm ²
	12	-0,016 T	0,002 mT	16,1 kg/cm ²	-1,2 kg/cm ²	14,9 kg/cm ²
Módulo 4	13	0,004 T	0,000 mT	1,4 kg/cm ²	0,6 kg/cm ²	2,0 kg/cm ²
	14	0,000 T	0,000 mT	1,5 kg/cm ²	0,0 kg/cm ²	1,5 kg/cm ²
	15	0,000 T	0,000 mT	2,0 kg/cm ²	0 kg/cm ²	2,0 kg/cm ²
	16	0,004 T	0,000 mT	2,1 kg/cm ²	-0,3 kg/cm ²	1,8 kg/cm ²

 Mayores valores. Esfuerzo de tracción

 Menores valores. Esfuerzo de tracción

Tabla 6.18 Valores numéricos de los esfuerzos a tracción. Semiarco en posición ideal. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136]. Fuente: Elaboración del autor.

MOMENTOS - ARCO POSICIÓN IDEAL								
Módulo	Barra Num	0	1/6.	2/6.	3/6.	4/6.	5/6.	L
		mT	mT	mT	mT	mT	mT	mT
Módulo 1	1	-0.000	0.001	0.001	0.002	0.003	0.003	0.004
	2	0.004	0.003	0.003	0.002	0.001	0.001	0.000
	3	0.000	0.002	0.004	0.006	0.007	0.009	0.011
	4	0.011	0.009	0.007	0.006	0.004	0.002	0.000
Módulo 1	5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	7	-0.006	-0.005	-0.004	-0.003	-0.002	-0.001	0.000
	8	0.000	-0.001	-0.002	-0.003	-0.004	-0.005	-0.006
Módulo 1	9	0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.001
	10	-0.001	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	0.000
	11	-0.002	-0.002	-0.001	-0.001	-0.001	-0.000	0.000
	12	0.000	-0.000	-0.001	-0.001	-0.001	-0.002	-0.002
Módulo 1	13	-0.000	0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
	14	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
	15	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
	16	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000

Mayores valores. Momento

Menores valores. Momento

Momentos

El comportamiento de los momentos en las barras del semiarco en la posición que se analiza en el presente apartado, es muy similar a la posición anterior estudiada, suceden en las barras colineales de cada módulo de tijera que van desde el nudo interior inferior del semiarco hacia el nudo superior exterior, siendo los mayores momentos los que ocurren en las barras tres y cuatro con (0.011 mT), correspondiente al primer módulo del semiarco; los menores momentos se presentan en las barras cinco y seis, y a partir de la barra 13 hasta la 16 (figura 6.52 y tabla 6.19).

Cortantes

El diagrama de cortantes también presenta los mayores cortantes en las barras colineales de cada módulo de tijera que van desde el nudo interior inferior del semiarco hacia el nudo superior exterior y en el primer módulo del semiarco (figura 6.53). Los momentos de mayor valor ocurren de igual manera en las barras tres y cuatro con (-0.029 mT) y (-0.033 mT) respectivamente, y los menores valores ocurren en las barras 13 y 14 (Tabla 6.19).

Tabla 6.19 Valores numéricos de los momentos. Semiarco en posición ideal. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].

Fuente: Elaboración del autor.

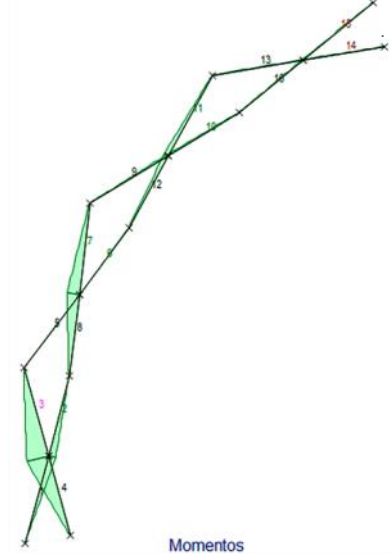


Figura 6.52 Representación de los momentos. Semiarco en posición ideal. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].

Fuente: Elaboración del autor.

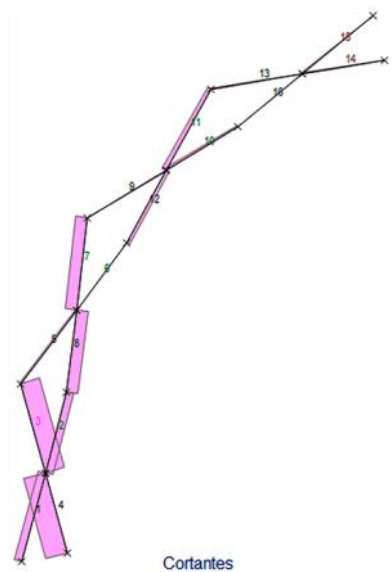


Figura 6.53 Representación de los momentos. Semiarco en posición desplegada. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].

Fuente: Elaboración del autor.

Tabla 6.19 Valores numéricos de los cortantes. Semiarco en posición ideal de despliegue. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136]. Fuente: Elaboración del autor.

CORTANTES - ARCO POSICIÓN IDEAL								
Módul	Barra Num	0 T	1/6. T	2/6. T	3/6. T	4/6. T	5/6. T	L T
Módulo 1	1	0.007	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006	0.006
	2	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007	-0.007
	3	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019	0.019
	4	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021	-0.021
Módulo 2	5	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.000
	6	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
	7	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
	8	-0.011	-0.011	-0.011	-0.012	-0.012	-0.012	-0.012
Módulo 3	9	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001	-0.001
	10	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
	11	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003
	12	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004	-0.004
Módulo 4	13	0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000
	14	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000
	15	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	-0.000
	16	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.000	-0.001	-0.001

Mayores valores. Cortante

Menores valores. Cortante

Desplazamientos

La geometría del semiarco que se expone en el presente apartado corresponde a la posición de despliegue ideal hallada por un método de ponderación para encontrar la apertura aproximada de las tijeras previa a la etapa final de despliegue, y así, a partir de esta geometría lograr que los desplazamientos resultantes, al simular la estructura con el peso propio, se obtenga una deformación del semiarco que coincida aproximadamente con la geometría del semiarco en la posición final de despliegue, determinada por el método geométrico propuesto en el presente documento (ver tabla 6.15).

Básicamente, es hallar aquella geometría donde los nudos 13, 15, 16 y 18 coincidan a la misma altura sobre el eje (x), correspondiente a la barras 13 y 14, que deben posicionarse de forma horizontal en la etapa final de despliegue, y que los nudos 17 y 18 coincidan en el eje (y) (ver tabla 6.15 y figura 6.54).

La tabla 6.20 expone los valores de los desplazamientos en milímetros de los nudos para alcanzar la posición determinada por el método geométrico propuesto. Se observa que el nudo 17 presenta los mayores desplazamientos en (x) y en (y), correspondientes a 359,4 mm y - 336,3 mm respectivamente.

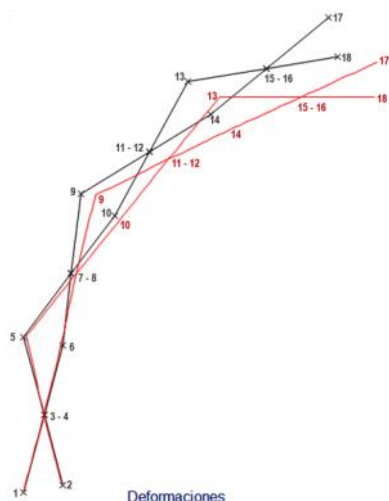




Figura 6.54 Representación de la deformación de la estructura. Semiarco en posición ideal de despliegue. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136]. Fuente: Elaboración del autor.

DEFORMACIONES - ARCO POSICIÓN IDEAL				
Módulos tijeras	Nº	dx	dy	mRad
	Nudo	mm	mm	
Módulo 1	1	0,0	0,0	-4,3
	2	0,0	0,0	10,3
	3	0,2	0,0	8,0
	4	0,2	0,0	-22,3
Módulo 2	5	26,9	7,3	-31,6
	6	-7,9	2,1	-87,6
	7	41,7	-3,7	-30,1
	8	41,7	-3,7	-105,4
Módulo 3	9	111,8	-12,0	-95,3
	10	54,2	-13,1	-183,7
	11	141,3	-60,7	-96,8
	12	141,3	-60,7	-189,3
Módulo 4	13	242,4	-115,6	-168,8
	14	168,5	-105,4	-264,6
	15	258,8	-214,8	-169,2
	16	258,8	-214,8	-265,1
	17	359,4	-336,3	-265,5
	18	273,5	-304,3	-169,6

 Mayores desplazamientos

 Menores desplazamientos

 Reacciones de nudos con deformaciones iguales en (x) y en (y)

El nudo 18 también presenta los mayores desplazamientos para posicionarse sobre el eje (x), colineal con los nudos 13,15, 16 y que coincida sobre el eje (y) con el nudo 17, los desplazamientos corresponden a 273,5 mm en el eje (x) y -304,3 mm en el eje (y).

También se observa el desplazamiento necesario de los nudos 15 y 16, para obtener la deformación esperada, con 258,8 mm en el eje (x) y -214,8 mm en el eje (y). Los desplazamientos van disminuyendo a medida que descendemos en los módulos de tijera, obteniendo desplazamientos de 0,00 m en los nudos uno y dos.

Es importante recalcar que en la práctica se debe tener en cuenta este comportamiento de la estructura tanto para el proceso de diseño como para el proceso de montaje. Las deformaciones resultantes y su análisis expuestas en este capítulo pretenden ser una herramienta de apoyo para realizar un despliegue controlado de este tipo de estructuras y en este caso de estudio específico, logrando un acertado comportamiento durante los procesos de implementación y estabilización de la estructura total.

Tabla 6.20 Valores numéricos de los desplazamientos. Semiarco en posición ideal de despliegue. Simulación en dos dimensiones realizada con WinEva8 © [136].
Fuente: Elaboración del autor.

6.5. Conclusiones

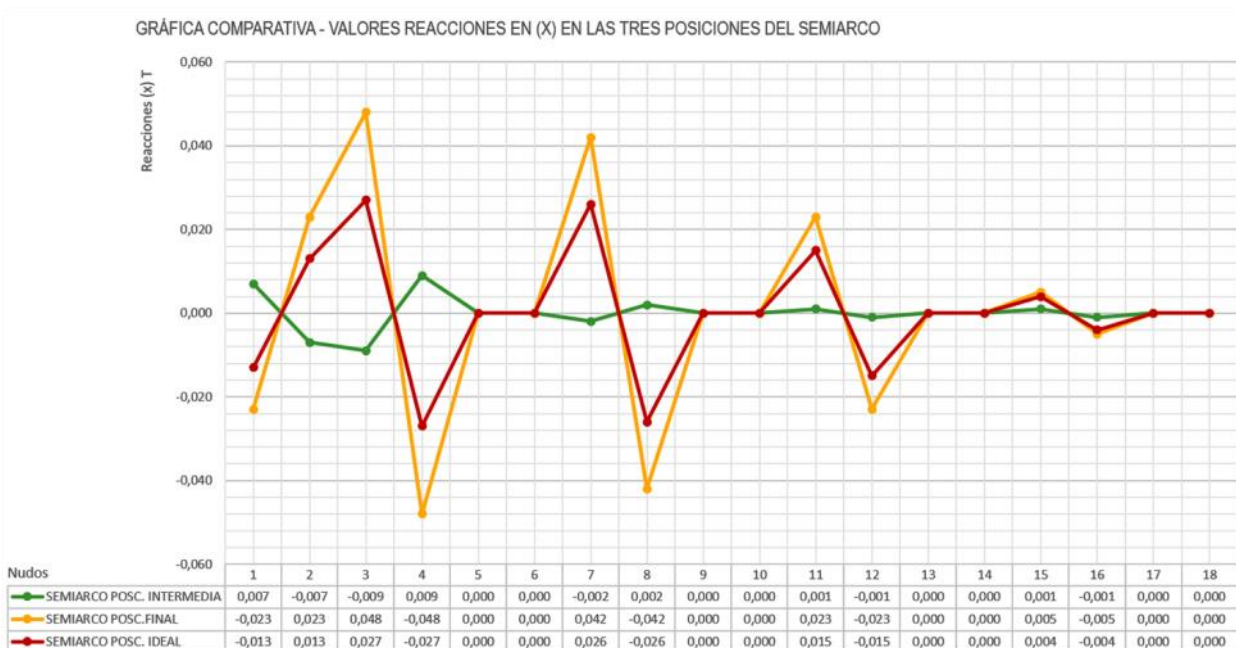
Se exponen a continuación como parte de las conclusiones del presente capítulo, las gráficas comparativas de los resultados obtenidos en cada uno de las posiciones de despliegue analizadas, referidas a:

- Posición de despliegue intermedia, aquella donde el semiarco describe la mayor elevación vertical (figura 6.55 color verde).
- Posición final de despliegue, aquella posición de despliegue determinada por el método geométrico (figura 6.55 color amarillo).
- Posición ideal de despliegue, determinada como aquella posición previa a la etapa final de despliegue, donde la deformación causada por el peso propio coincide con la geometría inicial establecida (figura 6.55 color rojo).

La primera comparación se representa en la figura 6.56 y figura 6.57, la gráfica expone las reacciones de cada nudo del semiarco en (x) y en (y) , que suceden en las posiciones de despliegue analizadas, diferenciadas por colores según cada posición de despliegue y localizando el valor de la reacción en toneladas en la gráfica correspondiente sobre el eje vertical.

Figura 6.56 Comparación de las reacciones en (x) en las tres posiciones de despliegue del semiarco.

Fuente: Elaboración del autor.



Se concluye que la posición intermedia es donde se presenta las menores reacciones en (x) y en (y). En esta posición, el semiarco describe un comportamiento de despliegue más lineal que curvilíneo y los nudos correspondientes a las articulaciones centrales de los módulos de tijera describen unas reacciones máximas de tan solo 0.009 Ten (x) , y 0.016 T en (y).

En cuanto a las otras dos posiciones de despliegue, los valores de los nudos en las articulaciones centrales, aumentan considerablemente, según las gráficas. Para la posición de despliegue final, el valor de las reacciones en los nudos 3 y 4 se incrementan más de cuatro veces con respecto al valor en los mismos nudos de la posición intermedia y si se continúa avanzando en los nudos superiores, el incremento persiste proporcionalmente.

En la posición ideal de despliegue (línea roja) también se describe un incremento en menor proporción de los valores en las reacciones, comparadas con la posición intermedia.

Por lo tanto, se ha de considerar estos valores y su análisis, para realizar el correcto dimensionamiento del pasador, estipuladas en tablas de estandarizadas sobre propiedades mecánicas y resistencias para pernos y tornillos, con el objetivo de seleccionar la mejor alternativa que responda a las solicitudes específicas del caso de estudio.

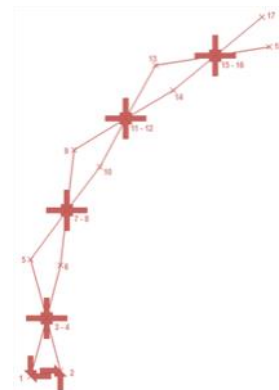
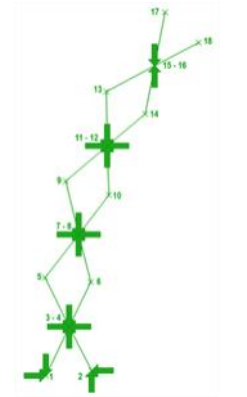
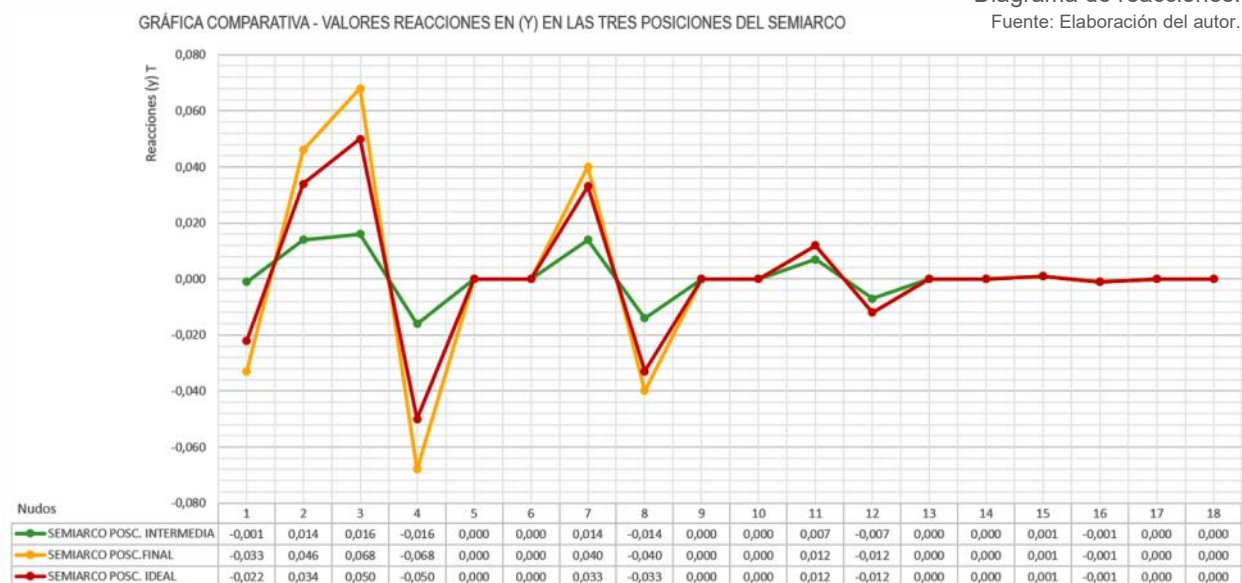


Figura 6.57 Comparación de las reacciones en (y) en las tres posiciones de despliegue del semiarco. Fuente: Elaboración del autor.

Figura 6.55 Nomenclatura de semiarcos por colores según posición de despliegue. Diagrama de reacciones. Fuente: Elaboración del autor.



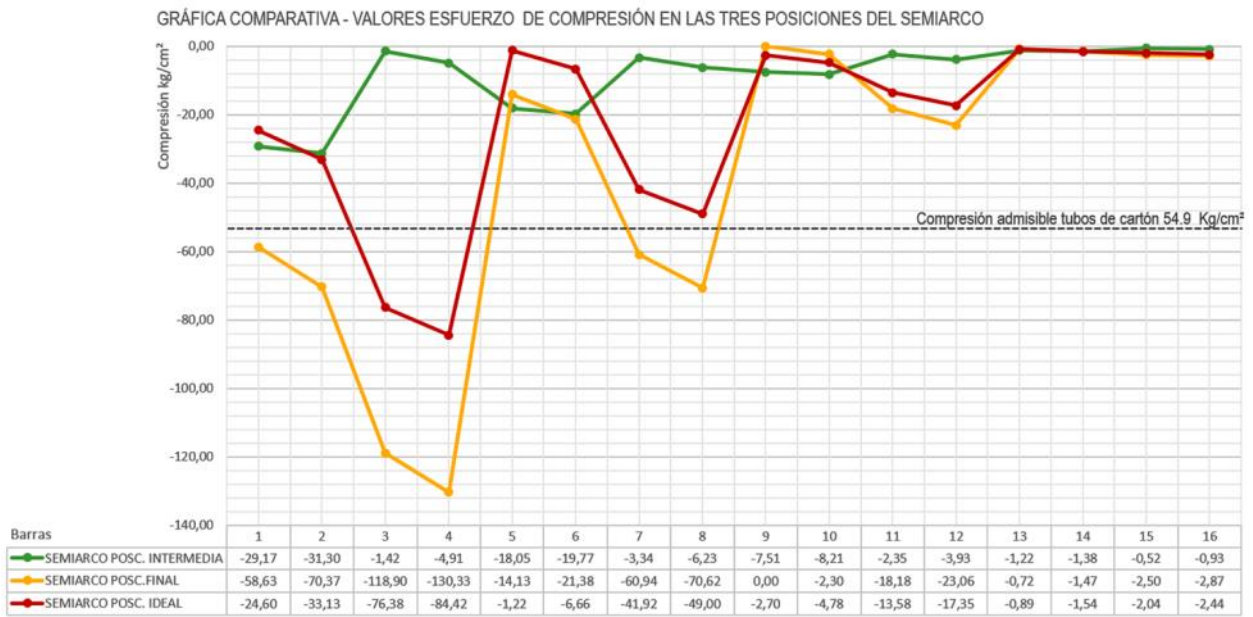


Figura 6.59 Comparación de los esfuerzos a compresión en las tres posiciones de despliegue del semiarco.

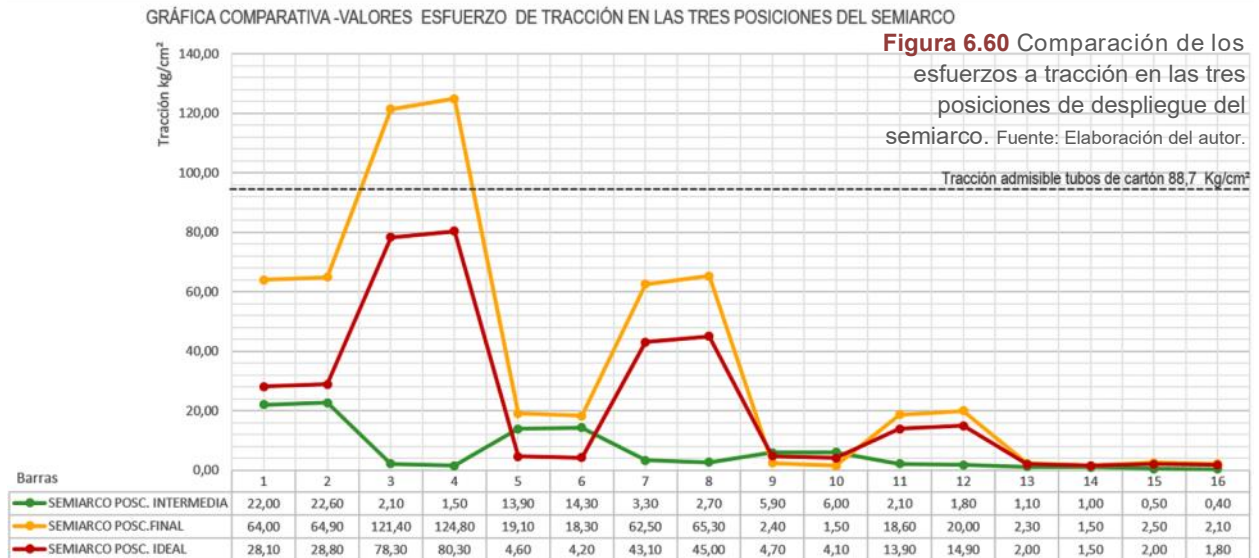
Fuente: Elaboración del autor.

La figura 6.59 representa la gráfica comparativa de los esfuerzos a compresión en las barras del semiarco, en cada una de la posiciones de despliegue analizadas.

Se observa que la única posición de despliegue donde las barras no sobrepasan el valor admisible de la compresión para los tubos de cartón, determinada en $\sigma_c = 54.9 \text{ Kg/cm}^2$ [5], es la posición intermedia.

Una vez el semiarco empieza a describir la curvatura para llegar a su posición final de despliegue, las barras de los módulos correspondiente a la base del semiarco son las más afectadas, en el caso más crítico es la posición final de despliegue, donde se ven afectadas la totalidad de seis barras.

Menos crítico es el caso de la posición ideal de despliegue, específicamente se ven afectadas las barras tres y cuatro, que se localizan en el primer módulo de tijera del semiarco, este módulo de tijera es el soporte del semiarco y en consecuencia habrá que incorporar soluciones técnicas para incrementar la capacidad de las barras y del material en este punto para que soporte los esfuerzos requeridos.



En la gráfica comparativa sobre los esfuerzos a tracción que soporta las barras en cada una de las posiciones de despliegue, representada en la figura 6.60, se observa como los esfuerzos de tracción de la posición intermedia y la posición ideal de despliegue, se encuentran por debajo del límite elástico de los tubos de cartón definido en $\sigma_t = 88.7 \text{ kg/cm}^2$ [5]. Solo en el caso en que el semiarco se posicione hasta la etapa final de despliegue sin que logre conectarse con los demás semiarcos, el semiarco colapsaría al sobrepasar el límite admisible de tracción y de compresión.

Por lo tanto, en la práctica y según el análisis presentado en este capítulo sobre la posición ideal de despliegue, el semiarco no deberá alcázar la posición final de despliegue en solitario, en ese punto todos los semiarcos se conectan en la cúspide y la estructura del domo estará totalmente configurada y se convierte en un conjunto estable que responde a partir de este momento a otro tipo de esfuerzos.

Pero se requiere de implementaciones necesarias para asegurar el correcto despliegue hasta la posición ideal de despliegue o posición segura, donde el diseño debe aportar las garantías de un correcto dimensionamiento de las barras y soluciones técnicas para contrarrestar las compresiones y tracciones que afectan la estructura.

La experiencia y las soluciones exploradas para obtener la viabilidad constructivas de los domos desplegables se describen con mayor detalle en el capítulo diez, el cual expone los prototipos realizados durante la investigación.



Figura 6.58 Nomenclatura de semiarcos por colores según posición de despliegue . Diagrama de compresión y tracción. Fuente: Elaboración del autor.

GRÁFICA COMPARATIVA - VALORES MOMENTOS EN LAS TRES POSICIONES DEL SEMIARCO



Figura 6.62 Comparación de los momentos en las tres posiciones de despliegue del semiarco.
Fuente: Elaboración del autor.

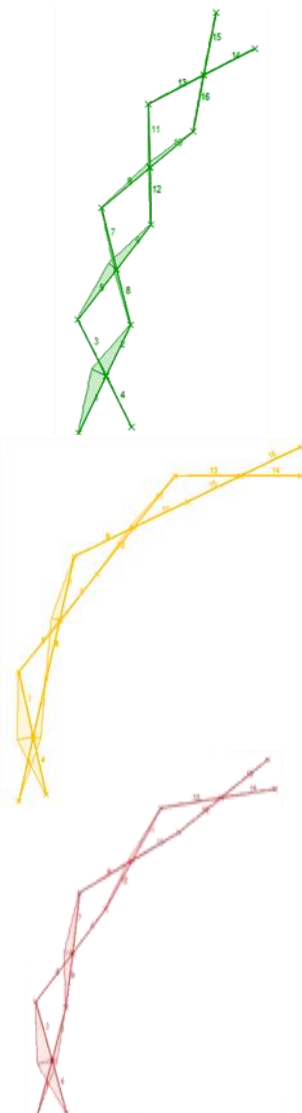


Figura 6.61 Nomenclatura de semiarcos por colores según posición de despliegue . Diagrama de momentos.
Fuente: Elaboración del autor.

Las gráficas comparativas de los mayores momentos que suceden en las barras de los semiarcos analizados en las tres posiciones de despliegue descritas en esta investigación (figura 6.62), exponen que los menores valores siempre suceden en la posición intermedia y se irán reduciendo a medida que el semiarco se pliegue.

Los momentos aumentan considerablemente en las dos últimas posiciones, debido a la geometría que describe el semiarco en la etapa final de despliegue, provocando fallos en las barras tres y cuatro que se localizan en el primer módulo de tijera, generando una tendencia al vuelco o al colapso de la estructura.

Comparando valores, se observa que el incremento en mT que suceden en las barras más afectadas en la posición final y en la posición ideal de despliegue, disminuye proporcionalmente a medida de ascendemos de en las barras y por módulo de tijera, lo cual induce a replantear las secciones utilizadas que en caso estudio, donde todas las barras tiene igual sección, pero podría reducirse la sección de los tubos de cartón en los módulos superiores del semiarco.

Además, según se ha visto en apartados anteriores, los comportamientos del semiarco simulados en el programa WinEva8 © [136], lleva a la conclusión de incorporar alternativas estructurales adicionales que reduzcan las flexiones que se producen en este punto.

GRÁFICA COMPARATIVA - VALORES CORTANTES EN LAS TRES POSICIONES DEL SEMIARCO



Figura 6.64 Comparación de los cortantes en las tres posiciones de despliegue del semiarco. Fuente: Elaboración del autor.

También se observa en la gráfica comparativa de los esfuerzos cortantes que ocurren en cada una de las barras que componen los semiarcos en las diferentes posiciones de despliegue analizadas (figura 6.64), que los menores cortantes suceden en la posición intermedia y seguramente en posiciones previas a esta, además la estructura del semiarco se ve afectada por el incremento de los valores cortantes al tomar la geometría definitiva de semiarco.

Tanto los resultados de los momentos flectores y de los cortantes evidencian la debilidad en las estructuras desplegable tipo tijera, la parte más afectada en las barras se localizada en las articulaciones centrales de los módulos de tijeras.

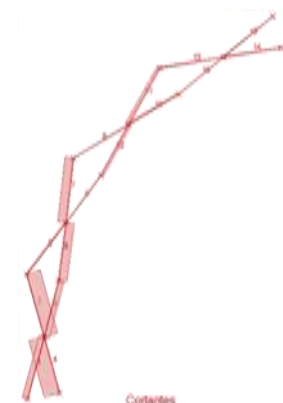
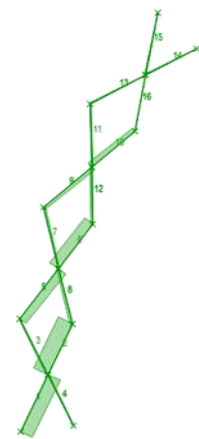


Figura 6.63 Nomenclatura de semiarcos por colores según posición de despliegue . Diagrama de cortantes. Fuente: Elaboración del autor.

GRÁFICA COMPARATIVA - VALORES DESPLAZAMIENTOS EN (X) EN LAS TRES POSICIONES DEL SEMIARCO

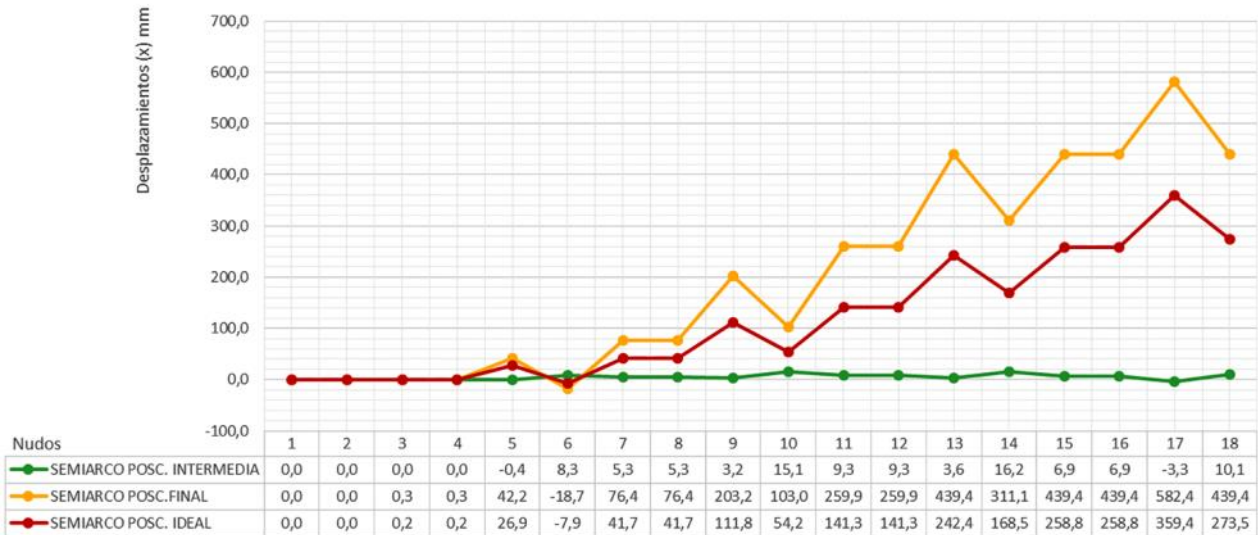


Figura 6.66 Comparación de los desplazamientos en (x) en las tres posiciones de despliegue del semiarco.

Fuente: Elaboración del autor.

GRÁFICA COMPARATIVA - VALORES DESPLAZAMIENTOS EN (Y) EN LAS TRES POSICIONES DEL SEMIARCO

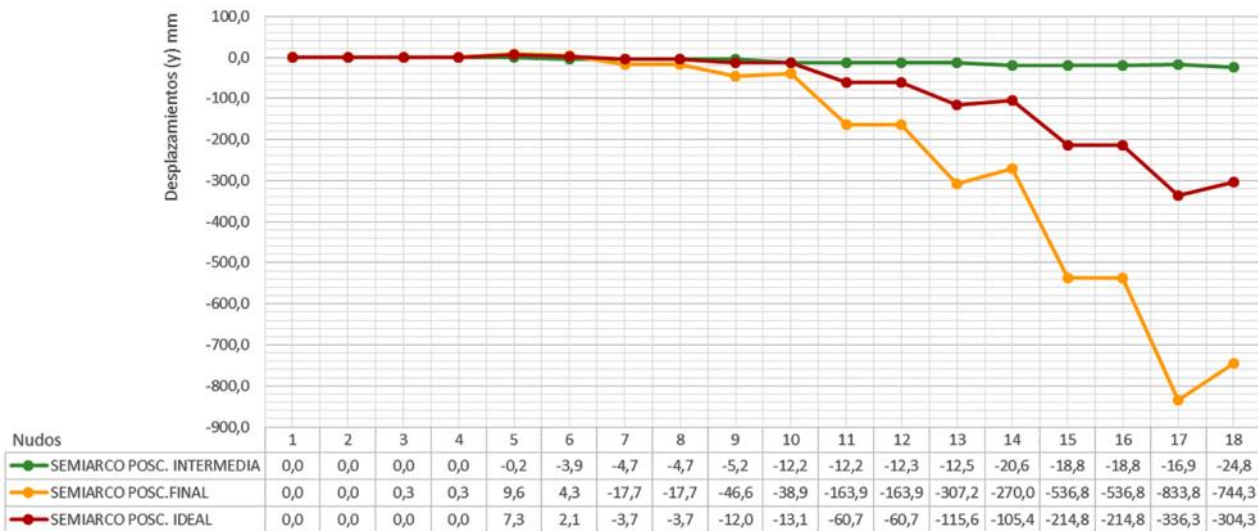


Figura 6.67 Comparación de los desplazamientos en (y) en las tres posiciones de despliegue del semiarco.

Fuente: Elaboración del autor.

Las deformaciones de los semiarcos en las tres posiciones de despliegue se ven representadas a manera de desplazamientos en (x) y en (y) en las figuras 6.66 y 6.67, aquí se representa a modo de gráfica comparativa los desplazamientos en milímetros que ocurren en cada uno de los nodos del semiarco.

Es a partir de la observación de la deformación del semiarco en la posición final de despliegue, que la investigación pretende buscar aquella posición de despliegue ideal, cuya deformación coincida con la geometría inicial establecida por el método geométrico propuesto.

Es importante enfatizar, que los desplazamientos que se obtienen en la posición ideal de despliegue, dependen de las características de la estructura, como la geometría seleccionada, número de módulos de tijeras incorporados, número de barras, longitud y sección de las barras, junto a la selección del material. Estos parámetros influyen directamente en el valor de k (distancia requerida de apertura de las tijeras, para hallar la posición ideal de despliegue del semiarco) y será variable según el caso de estudio.

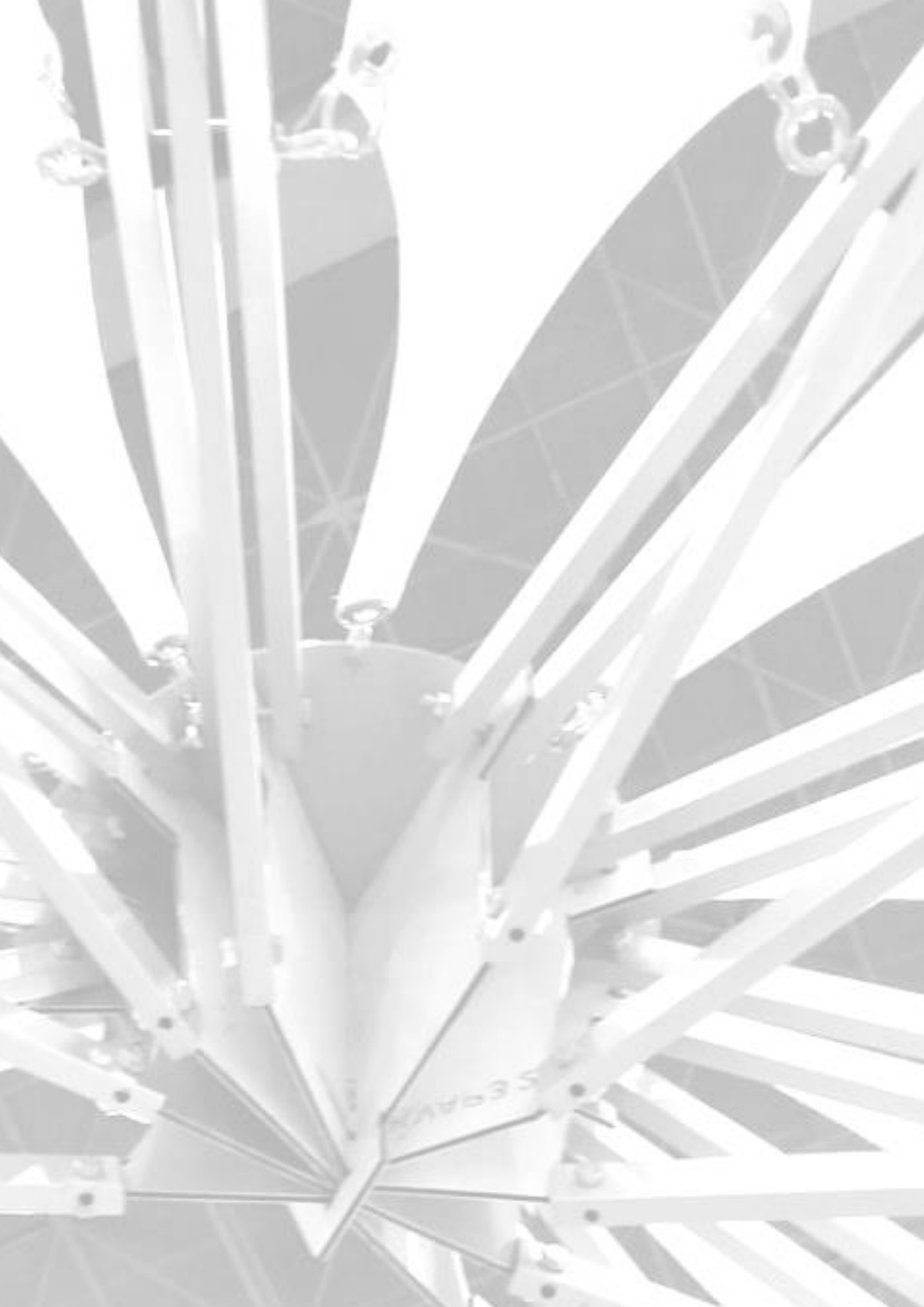
Para el caso de estudio analizado en este apartado, se observa que los desplazamientos son mínimos en la posición intermedia de despliegue y seguramente se mantienen así en las posiciones previas a esta posición, en coherencia con los esfuerzos resultantes vistos en anteriores apartados. Los mayores desplazamientos ocurren en los nudos más elevados cuando el arco se posiciona en la etapa final de despliegue.

Por lo tanto, el objetivo de comprender este comportamiento es resaltar la importancia de hallar la posición de despliegue ideal, donde la deformación resultante permitirá que el semiarco describa un comportamiento acertado, antes de llegar a la etapa final de despliegue, y es allí donde se debe garantizar la correcta conexión con los demás semiarcos a través del nodo principal y finalmente configurar la totalidad de la estructura.

Así mismo implementar las medidas estructurales necesarias de seguridad y bloqueo para el correcto proceso de montaje del semiarco durante todas las etapas de despliegue

Figura 6.65 Nomenclatura de semiarcos por colores según posición de despliegue. Diagrama de deformaciones. Fuente: Elaboración del autor.





Nodo principal

El encuentro de los extremos superiores de los semiarcos, una vez logran su posición de despliegue ideal, requiere de un conector que resuelva constructivamente la unión entre barras, garantizando la estabilidad estructural del domo en su posición final de despliegue y posterior uso de la estructura.

El presente capítulo describe las principales características y requerimientos del nodo a proponer en la implementación de domos desplegables, configurados a partir de semiarcos planos desplegables conformados por la agrupación de tijeras. Su estudio, desarrollo y diseño está basado en los referentes de conectores desarrollados en la aplicación de estructuras espaciales laminares y geodésicas, que fundamentan la exploración científica realizada, para hallar las soluciones idóneas en el tipo de estructuras que propone la investigación.

Se describe la evolución del diseño para la propuesta del nodo, junto con las diferentes herramientas y materiales utilizados para la fabricación de diferentes soluciones de nodos, que se implementaron en su momento a modo conceptual a través de modelos 3D, modelos físicos y durante la construcción de prototipos, que permitieron analizar la viabilidad constructiva y de fabricación de las diferentes opciones.

Este capítulo pretende dar a conocer los conceptos generales, proceso de búsqueda de la forma, parámetros y variables a tener en cuenta para el proceso de diseño y evolución del nodo principal para la tipología de domos desplegables que se desarrollan en el presente estudio.



Figura 7.50 Propuesta de nodo 4.
Impresión 3D, material PLA.
Para domo en bambú.
Fuente: Elaboración del autor

Contenido del capítulo

7.1 Definición nodo principal	316
7.2 Principales referentes de nodos	317
7.2.1 Sistema Mero	318
7.2.2 Sistema Triodedic	319
7.2.3 Nodos para domos geodésicos	320
7.3 Diseño de nodos para nodos desplegados	323
7.3.1 Propuesta de nodo. Impresión 3D	325
7.3.2 Propuesta de nodos prototipos construidos	339
7.4 Conclusiones	346

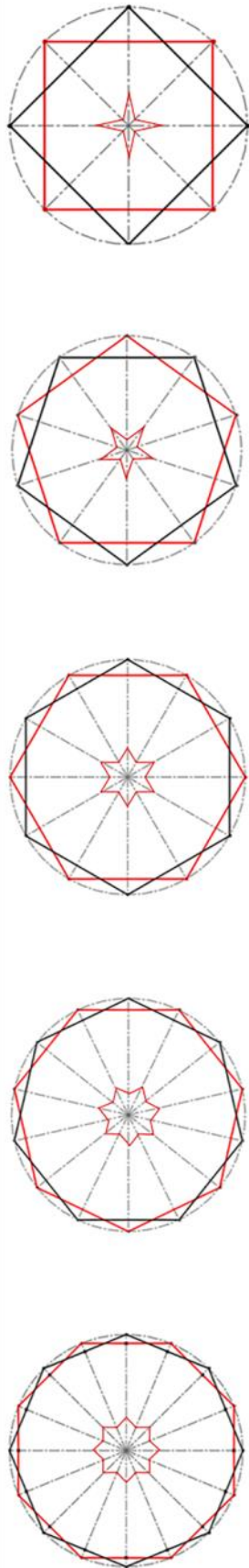


Figura 7.2 Proyección de nodos en planta, sobre el polígono regular específico.

Fuente: Elaboración del autor

7.1 Definición nodo principal

Los anteriores capítulos describen las características y proceso geométrico para configurar domos desplegables, a partir de semiarcos planos que se despliegan siguiendo la ruta de los ejes meridionales en una sección de esfera. Una vez los semiarcos se posicionan en la etapa final de despliegue, estos deben conectarse simultáneamente al nodo principal para obtener la estabilidad de la estructura, entendiendo el término *nodo* como el conector entre varios elementos.

De esta manera, el nodo principal es la pieza fundamental donde se articula los extremos superiores de los semiarcos desplegados y debe garantizar que la estructura, una vez llegue a la etapa final de despliegue, se posicione en un estado de equilibrio, tal como se han desarrollado históricamente los procesos constructivos tradicionales de arcos y cúpulas (Ver apartado 6.2. Cúpulas nervadas).

Básicamente, el nodo específico para esta investigación consiste en una pieza o conector diseñado para recibir los extremos de las barras correspondientes al último módulo de tijera de cada semiarco y que han de concurrir en un mismo punto de intersección (figura 7.1)

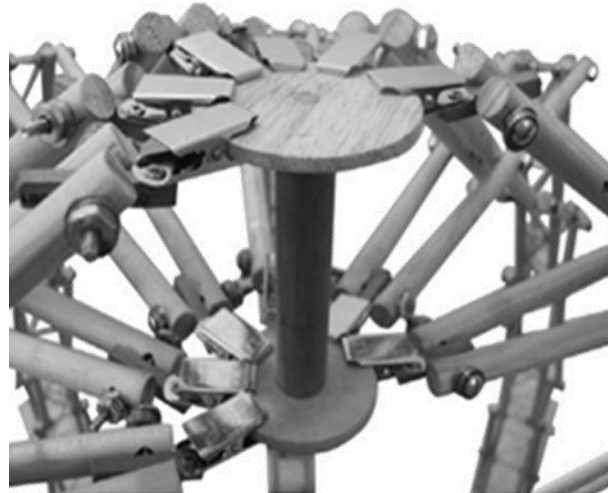


Figura 7.1 Propuesta inicial de nodo TDES. Teatro Desplegable. Maqueta escala 1:10 [88]. Fuente: Elaboración del autor

El diseño del nodo dependerá de la geometría seleccionada a partir del método geométrico propuesto y el polígono regular seleccionado, es decir la geometría seleccionada definirá las características de forma del nodo, determinando la cantidad y las posiciones de las pletinas o sistema de sujeción que recibirán los extremos de las barras (figura 7.2).

7.2 Principales referentes de nodos

Se precisa que el nodo a proponer debe contemplar la unión de los semiarcos en la cúspide, de una forma sencilla que facilite su montaje, desmontaje y estabilidad estructural. Las características estructurales de esta pieza hace referencia a los sistemas de conectores universales ampliamente desarrollados para retículas espaciales y domos geodésicos. A continuación se realiza una breve revisión de los principales referentes de nodos que por su diseño, geometría o sistema de ensamblaje se consideran relevantes para la presente investigación.

Es importante aclarar que el estudio de los nodos en las estructuras desplegables es un tema de relevancia en el desarrollo y viabilidad de este tipo de estructuras, la importancia radica en que esta conexión es la pieza que une los módulos de tijera para configurar redes espaciales desplegables, por lo tanto debe permitir el correcto movimiento de las barras y responder adecuadamente en las en todas las etapas de despliegue, sobretodo en las etapas más críticas del despliegue.

El apartado 2.2 describe ejemplos de nodos teóricos, patentados y otros implementados, desarrollados por diferentes autores, diversas soluciones idóneas que intentan resolver las dificultades de los procesos de despliegue en las etapas críticas, aportando al presente estudio soluciones geométricas y sistemas de conexiones altamente desarrollados.

La figura 7.3 representa en resumen, el concepto y solución geométrica básica para el nodo en estructuras desplegables del tipo domos desplegables, donde configuran una red continua de módulos de tijeras agrupados. Se expone esta solución para enfatizar que este tipo de conexión hace parte de la estructura en todas las etapas de despliegue, es decir las barras y el nodo están conectados siempre y debe responder a los esfuerzos de las mismas, una solución que no es la que se busca para el planteamiento de domos que desarrolla esta investigación.

El interés radica en una pieza adicional, una piedra angular que se agrega a la estructura en la etapa final de despliegue para cerrar el domo conectando todos los extremos superiores de los semiarcos y convertirlo en una estructura estable.

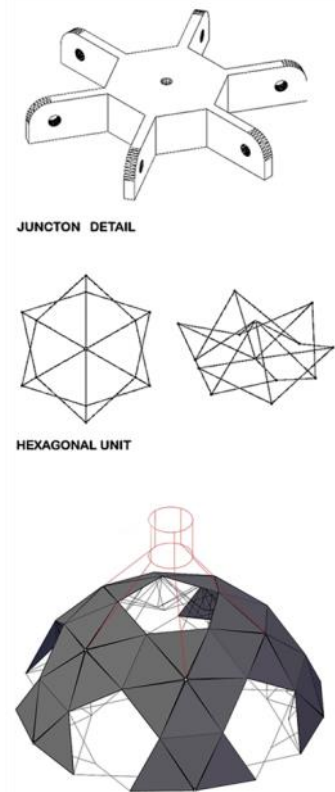


Figura 7.3 Nodo tipo para domos desplegables. Red triangular a partir de la agrupación módulos de tijeras.
Fuente: <https://cargocollective.com/zipizip/10>
Recuperado [15/04/2020]



Figura 7.3 Nodo refugio domo desplegable [123].

De esta manera, es de gran interés para el presente estudio, la propuesta desarrollada por Daniel Kerber [123], al igual que en esta investigación el nodo no hace parte del proceso de despliegue, el nodo es una pieza adicional, y que en este caso cumple la función de piedra angular para estabilizar la estructura en la posición final de despliegue y configurar la geometría del domo.

Se observa en la figura 7.3, las pletinas horizontales que reciben mediante anclajes articulados con pernos, los extremos de las barras. El aporte de esta solución se encuentra en la implementación de las barras verticales, las cuales restringen el despliegue de cada semiarco y así, a su vez conforma el conjunto de nodo en la cúspide.

Para ampliar los referentes de las diferentes tipologías de nodos, se describen a continuación los ejemplos que refieren al estudio de conectores universales, caracterizados por ser piezas que reciben múltiples barras en diferentes direcciones, que deben garantizar una conexión entre barra y nodo de forma fija y estable. Además de incluir mecanismos simples o en algunos casos más complejos que faciliten el proceso de montaje y desmontaje, conexión o desconexión entre barras y nodo. Su estudio permite conocer mecanismos y diseños desarrollados en diferentes soluciones que aportan a la investigación.

7.2.1 Sistema Mero

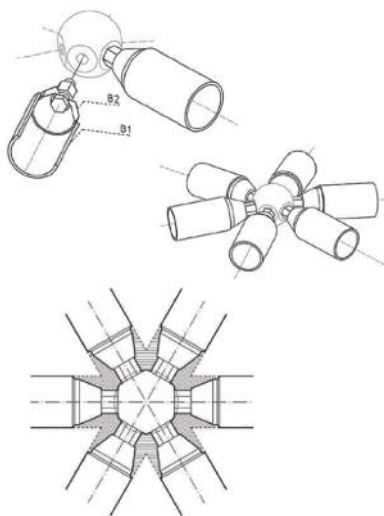


Figura 7.4 Nodo refugio domo desplegable.

Fuente: https://www.mero.com.sg/our_services/exhibit-systems/
Recuperado [20/04/2020]

Diseñado por ingeniero Max Mengerhausen y fundador de la empresa MERO (1928) es uno de los sistemas constructivos más conocidos que desarrolla sistemas estructurales prefabricados de mallas espaciales con dos únicos componentes, barras tubulares y nodos con forma poliédrica que recibe hasta 18 barras (figura 7.4).

El sistema de unión se realiza mediante el mecanizado de tornillo y tuerca. El nodo contiene los agujeros roscados posicionados en las caras del mismo y que reciben de forma perpendicular la conexión con la barra, estas contienen en cada extremo el tornillo que esta fijo, posicionado de forma colineal al eje de la barra, lo que permite que todos los ejes coincidan en el centro del nodo poliédrico y no existan excentricidades.

De interés para esta investigación, es la unión entre barra y nodo, la sección total de la barra no se conecta con el nodo, es a través del perno y de un manguito de menor diámetro que permite el mecanizado entre ambos componentes. Además incluye un remate tipo cono en cada extremo de la barra, para reducir la sección y evitar que no se intercepten las barras al momento de conectarse al nodo (figura 7.4).

7.2.2 Sistema Triodetic

Desarrollado en Canadá durante la década de 1950 por Fentiman Bros, quien lo introdujo comercialmente en 1960 [15]. El nodo esta inspirado en el sistema de ensamblaje tipo cola de milano para estructuras de madera (figura 7.5), consiste en una sección cilíndrica con ranuras dentadas posicionadas radialmente y a largo de la sección longitudinal.

El mecanismo de conexión entre elementos, barra y nodo, consiste en que el nodo recibe los extremos aplanados de las barras de sección circular, estas a su vez también incluyen ranuras en sus extremos para ajustarse y sujetarse al nodo una vez se introduzcan dentro de la ranura específica (figura 7.6). El sistema se asegura con un tornillo central y dos tapas del tipo arandela, superior e inferior, que fija y comprime todos elementos impidiendo que se salgan las barras de las ranuras por movimientos verticales.

El tipo de mecanismo entre elementos, es de interés para el presente estudio, ya que debido a la forma en que llegan las barras de los semiarcos desplegados a la cúspide del domo, para enlazarse al nodo a proponer, el tipo de conexión no describe una línea de recorrido entre barras y nodo perpendicular entre ellos, debido a la geometría que describe el semiarco en cada posición de despliegue. Es así, que el método de conexión a proponer deberá ir sujeto al modo en que llegan las barras, el cual esta definido por el recorrido que presenta los semiarcos justo antes de posicionarse en la cúspide del domo (figura 7.7).

El sistema triodetic, genera la posibilidad de incorporar el sistema de ranuras al planteamiento de nodo a proponer, sus características técnicas y constructivas permiten un fácil montaje y desmontaje de la conexión tomando en cuenta el proceso de despliegue, siendo un referente importante a contemplar dentro de la propuesta a desarrollar.

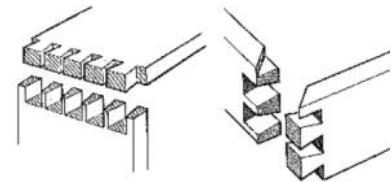


Figura 7.5 Conexión estructuras de madera tipo cola de milano.

Fuente: <https://dokumen.tips/documents/ensamble-cola-de-milanodocx.html>
Recuperado [20/04/2020]

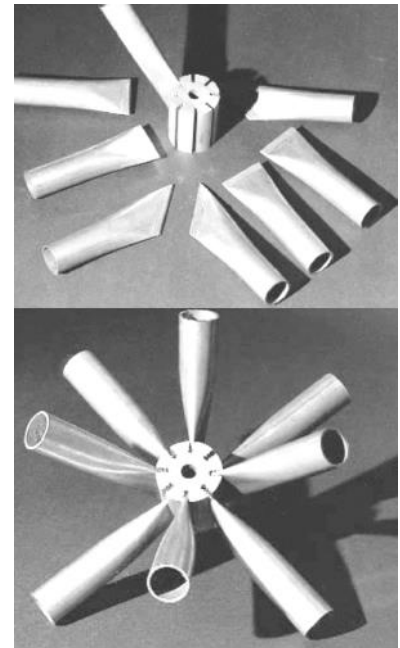


Figura 7.6 Sistema triodetic [15]

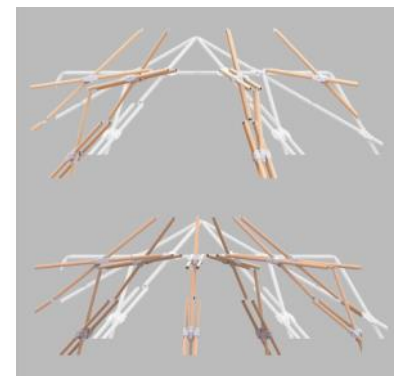


Figura 7.7 Posición de los semiarcos previa a la conexión al nodo principal

Fuente: Elaboración del autor

7.2.3 Nodos para domos geodésicos.

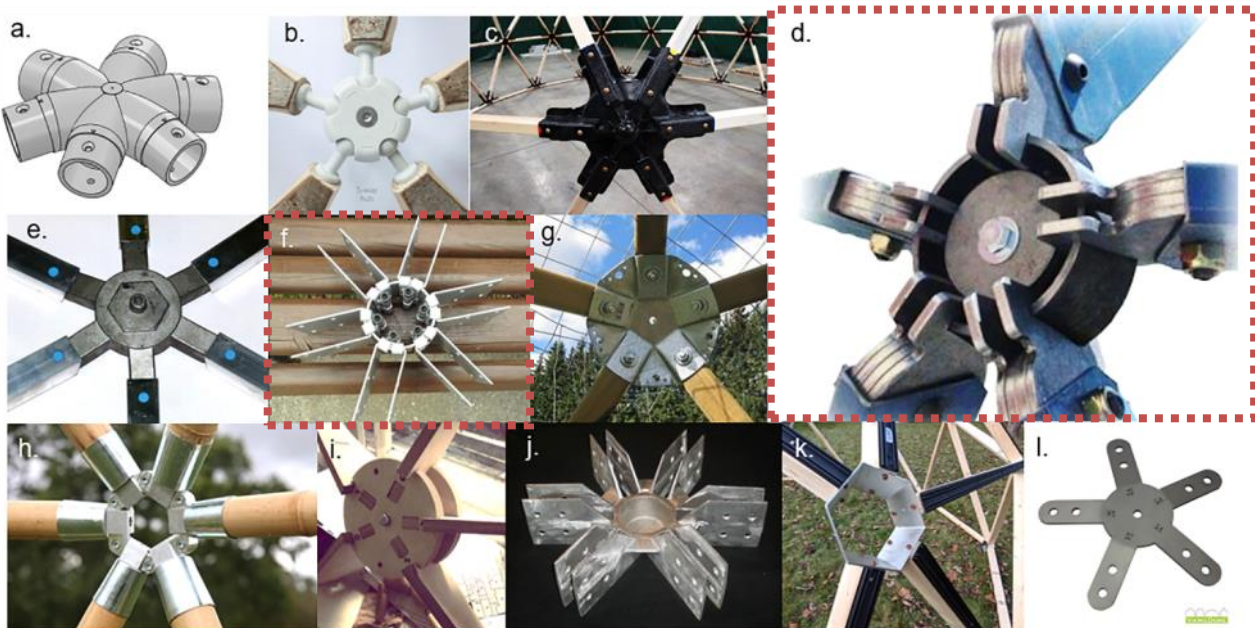
Los nodos empleados para la configuración de domos geodésicos presentan una gran versatilidad en forma, uso de materiales y tipos de mecanismos para conectar los elementos. Lo importante al revisar todo el abanico de posibilidades, es que las diferentes soluciones existentes tienen en común su funcionalidad estructural, este componente debe ser diseñado para recibir la intersección de varias barras en un mismo punto, de tal forma que garantice la estabilidad de la estructural y el posicionamiento de las barras según la geometría de la geodésica a construir.

Las propuestas son diversas, desde las más tecnificadas hasta soluciones de bajo costo (figura 7.8), se resaltan aquellas que por su tipo de sujeción al nodo aportan al presente estudio, entendiendo que el sistema de nodo a emplear en los domos desplegables, debe prever la forma en que llegan las barras, sujetas a un recorrido de despliegue específico, además que el sistema debe contemplar un proceso de fácil y rápido desmontaje para replegar la estructura.

Figura 7.8 Diversas soluciones de conectores para la construcción de domos geodésicos.

Fuente:

- a. <https://www.sonostarhub.com/>
 - b. <https://buildwithhubs.co.uk/>
 - c. <https://www.geodesicdomekits.net/>
 - d. <http://www.domerama.com/>
 - e. <http://www.domerama.com/>
 - f. <http://www.domerama.com/>
 - g. <https://www.pinterest.es/pin/444800900688946757/>
 - h. <http://www.insideoutstructures.com/>
 - i. <https://www.pinterest.es/pin/349732727312126746/>
 - j. <https://www.domeincorporated.com/>
 - k. <https://thunder-domes.com/>
 - l. <https://www.vikingdome.com/>
- Recuperados [03/05/2020]



Las figuras 7.8 (d) y (f) representan una conexión entre barra y nodo con un anclaje tipo mordaza en los extremos de las barras, que se articula a una sección de tubo con el espesor adecuado para recibir el anclaje de las barras, este mecanismo permite suponer un sistema de fácil desmontaje al momento de replegar la estructura del domo, ya que no requiere de un proceso de atornillado, sino de un proceso mecánico manual de palanca y agarre al anillo central.

En el caso de la construcción de domos geodésicos, la estabilización de las barras y evitar el giro o desplazamiento de las mismas, se obtiene gracias al proceso de conformación de triángulos y configuración de los módulos pentagonales y hexagonales entre barras y nodos, que una vez agrupados y conectados, el conjunto estructural del domo geodésico es estable. En el caso de los semiarcos despleables, la aplicación de este tipo de solución con mordaza, la estabilidad en el otro sentido estaría comprometida y habría que adaptar el nodo con guías o algún tipo de sujeción adicional para evitar el vuelco de cada semiarco.

Este sistema de sujeción se asemeja a la tipología de conexión en los sistemas de andamios, pero a diferencia del anterior ejemplo (figura 7.8, f), los nodos para andamios incorporan una pletina tipo anillo con agujeros, distribuidos radialmente, que recibe las mordazas y se asegura con el sistema de palanca-cuña (figura 7.9).

Para su aplicación en el presente estudio, la solución empleada en los sistemas de andamios, es una alternativa factible y de gran interés para implementar, debido a que es un sistema ampliamente desarrollado que funciona tanto estructural como constructivamente y podría ser compatible con el sistema estructural de los semiarcos despleables.

El inconveniente radica en su fabricación y adaptabilidad a los perfiles de barras utilizados en los diferentes prototipos realizados, pero no se descarta su implementación y aplicación en la proyección de un prototipo diseñado para que incorpore en el diseño de las barras este tipo de sujeción y conectores.

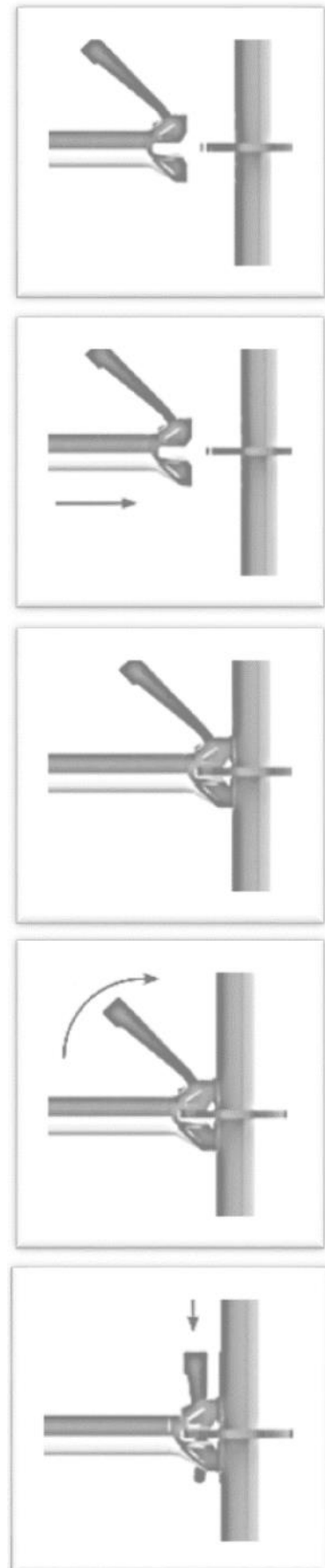


Figura 7.9 Sistema de conexión componentes de andamios
Fuente: <https://tectonica.archi/materials/sistema-de-nudos-multidireccionales/>
Recuperado [03/04/2020]



Figura 7.10 Nodo para domo geodésico en bambú.

Fuente <http://www.insideoutstructures.com/>
Recuperado [25/05/2020].



Figura 7.11 Nodo para domo geodésico en madera.

Fuente : <http://domeofvisions.dk/>
Recuperado [25/05/2020].

La solución de nodo desarrollada por Bamboo Inside Out Structures para su domo geodésico, es un concepto diferente a los ejemplos vistos anteriormente. En esta solución, la pletina de anclaje sujeta al extremo de la barra, es una sección del nodo. Cuando concurren las seis barras al punto de intersección, la geometría de las pletinas conforman la totalidad del nodo a través de conexiones laterales tipo machihembrado con el anclaje adyacente (figura 7.10).

Se toma de referente esta solución, para modelar un nodo adaptado a un domo desplegable configurado a partir del método propuesto, y de esta manera observar, si esta solución es viable y aplicable al concepto de los domos desarrollados en esta investigación (figura 7.37 y 7.38).

La tipología de nodo más común en la construcción de domos geodésicos, refiere a una sección circular de un tubo con pletinas soldadas radialmente que incorpora agujeros para la articulación mediante pernos. Los anclajes de las barras, respondiendo al tipo de sujeción, también incorporan pletinas con los correspondientes agujeros para poder sujetarse al nodo de forma coplanar y fijar la conexión a través de pernos.

Pueden existir variaciones en la cantidad de pletinas que incorpora el nodo para articularse a la barra, siendo el nodo el que contiene doble pletina y la barra incluye un anclaje con pletina simple centrada en el eje (figura 7.8 j); también puede suceder que la pletina de la barra sea doble y el nodo incorpore pletinas simples, o el mismo material de la barra permita funcionar como anclaje de pletina doble y se sujete al nodo mediante pernos que atraviesan toda la sección de la barra (figura 7.11).

Finalmente en el caso que ambos componentes implementen pletinas simples, constructivamente una de las alternativas más sencillas, la barra debe contemplar el desplazamiento de la pletina de eje, para ensamblarse correctamente al nodo y coincidan los ejes longitudinales de las barras en un mismo punto de intersección.

Este último caso se aplica en la solución de nodo desarrollado por Shigeru Ban en el proyecto Paperdome. Se observa en la figura 7.12 que la pletina perteneciente a la barras, esta desplazada fuera de eje longitudinal hacia la izquierda, este desplazamiento debe corresponder al espesor de la pletina del nodo para que al momento de ensamblar el conjunto puedan conectarse de forma coplanar y de esta manera coincidan los ejes longitudinales en un mismo punto.

El uso de tubos de cartón como material principal demuestra la capacidad estructural que se logra en una estructura modular al agrupar dos simples componentes, nodos y barras bajo el concepto estructural de la conformación de triángulos a partir de la geometría de la geodésica.

7.3 Diseño de nodos para domos desplegables

La revisión de las tipologías de nodos del anterior apartado que exponen la validez constructiva y estructural de diversas soluciones de nodos, aplicados en sistemas de andamios, geodésicas y estructuras laminares, establece la base teórica para reinterpretar, adaptar y proponer el nodo idóneo para los domos desplegables que se desarrollan en esta investigación.

Se proponen varias alternativas que fueron evolucionando gracias a la incorporación de herramientas como el uso de la tecnología de la impresión 3D y otras que quedaron en modelos 3D digitales como posibles alternativas a desarrollar en el futuro, debido a su complejidad en fabricación o como soluciones descartadas por su complejidad en el sistemas de anclaje, peso u otras razones.

Tal como se especificó en la justificación de la investigación, el montaje y despliegue de los domos propuestos será un proceso manual, que incorpore un sistema de montaje y desmontaje sencillo y práctico, acorde a la escala propuesta, así que las diversas soluciones de nodo desarrolladas en el presente apartado intentan responder a estos requerimientos.

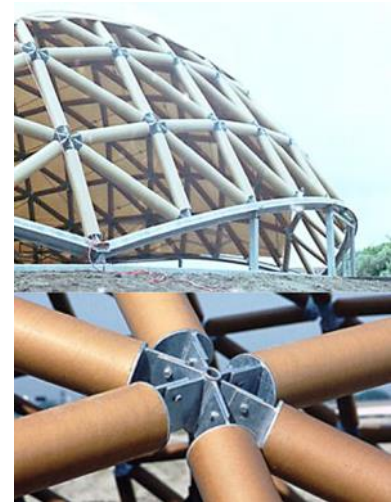
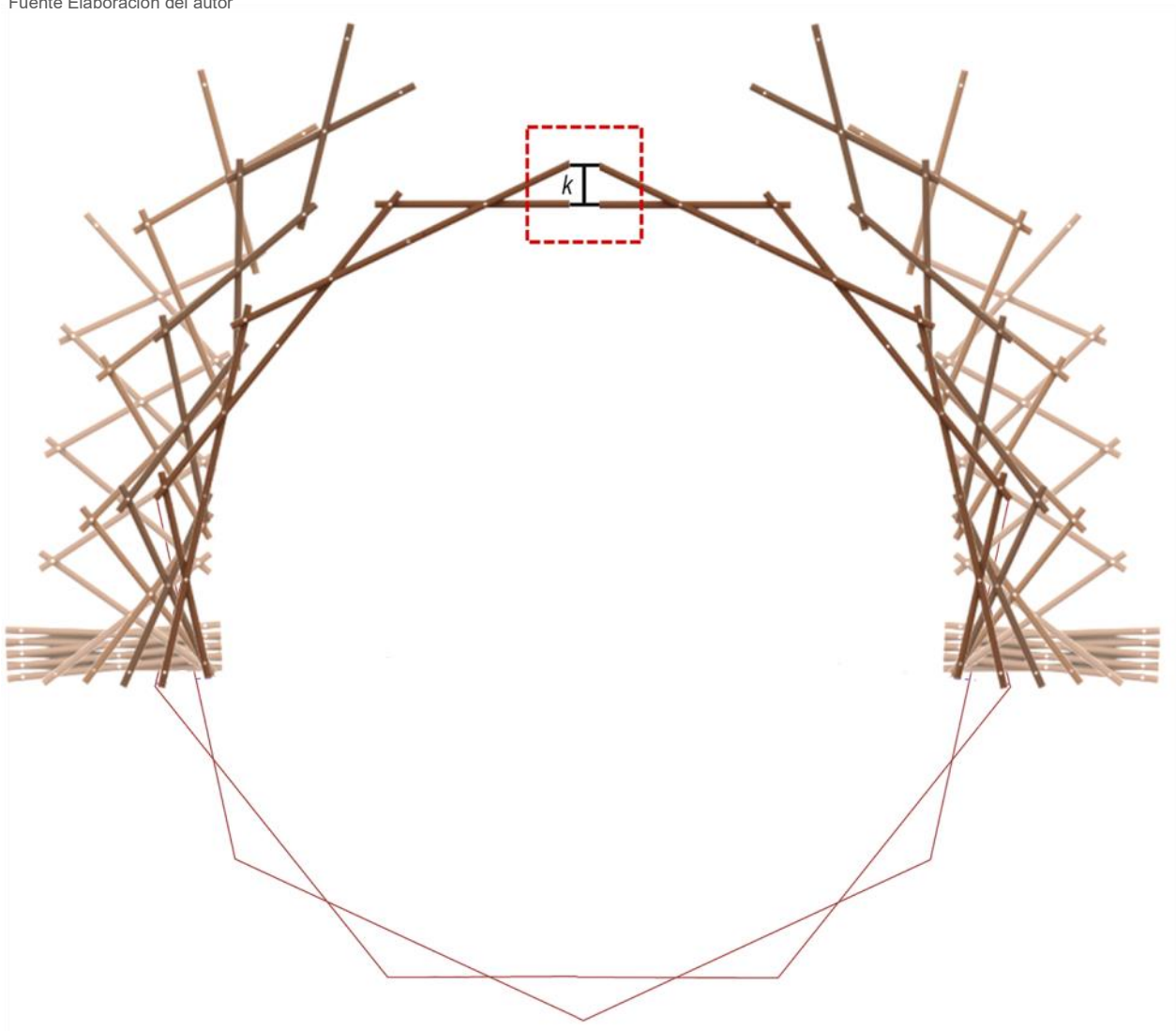


Figura 7.12 Nodo Paperdome Shigeru Ban. Ámsterdam, Utrecht, Holanda 2003
Fuente: http://www.shigerubanarchitects.com/works/2003_paper-theater/index.html
Recuperado [3/05/2020]

Adicionalmente, se ha de considerar que el diseño del nodo requiere la sujeción de las barras en dos alturas diferentes (figura 7.13), un anclaje en un plano superior, correspondiente a la sujeción de los extremos de los tramos largos del último módulo de tijera de cada semiarco.

Y un anclaje en un plano inferior correspondiente a la sujeción de los extremos de los tramos cortos del último módulo de tijera de cada semiarco, la distancia entre ambos planos y límite del despliegue de los semiarcos, esta definida por la longitud del canto (k) según el polígono implementado, longitud de barra o diámetro utilizado (ver figura 5.29 y tabla 5.8 capítulo 5).

Figura 7.13 Proyección geométrica y altura del nodo, determinada por la distancia (k)
Fuente Elaboración del autor



7.3.1 Propuestas de nodos impresión 3D

Todo el soporte técnico, material, equipo humano y utilización de las impresoras 3d, se desarrollo gracias a la colaboración del **Ateneu de Fabricació Ciutat Meridiana** [100] ...una plataforma d'innovació ciutadana, incubadora d'idees i de projectes per a fomentar l'aprenentatge tecnològic entre iguals i les dinàmiques d'emprenedoria amb la fabricació digital, l'ocupació, la renovació urbana y la sostenibilitat com referents.

Las siguientes soluciones de nodos son modelados con el programa paramétrico SolidWorks® [135], la preparación como archivos validos para la impresión 3D se realiza en el programa Cura-BCN3D-0.1.5 y el material de impresión corresponde a filamento de plástico PLA. Son nodos diseñados para maquetas a escala que permiten visualizar los sistemas de ensamble entre elementos y analizar la viabilidad en la fabricación y funcionamiento estructural.

Se establece que los nodos a proponer incluirán una solución de anclaje o pletina simple y las barras incorporan la tipología de pletina doble, pletina excéntrica o de anclaje especial según el caso de estudio, pero intentando mantener siempre el menor número de pletinas o componentes en el nodo.

Una primera propuesta teórica, se plantea como un nodo complejo para un domo desplegable configurado a partir de la geometría de un cuadrado, donde llegan ocho semiarcos (figuras 7.14 y 7.15). Para el diseño del nodo se propone dos partes, una superior y otra inferior, para facilitar su proceso de impresión por capas de PLA y evitar material adicional en el refuerzo en partes diseñadas como voladizo, la propuesta es la primera aproximación que se realiza en cuanto a forma, cantidades y tipos de anclaje que deben incorporar un nodo específico (figura 7.16).

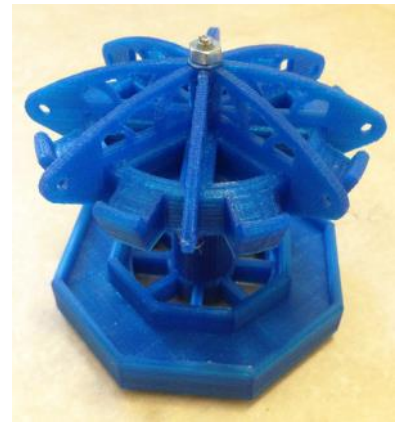


Figura 7.14 Propuesta de nodo 1 en impresión 3d. Anclaje tipo ménsula y pletinas para la sujeción de la cubierta textil.
Fuente: Elaboración del autor

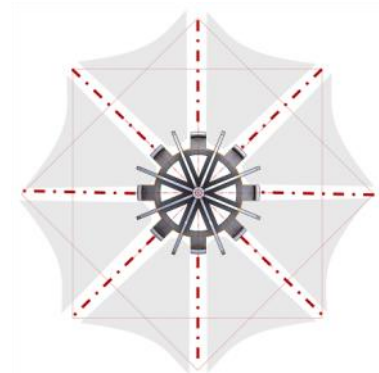


Figura 7.15 Geometría nodo a partir del cuadrado e incorporación de tensoestructura entre semiarcos.
Fuente: Elaboración del autor

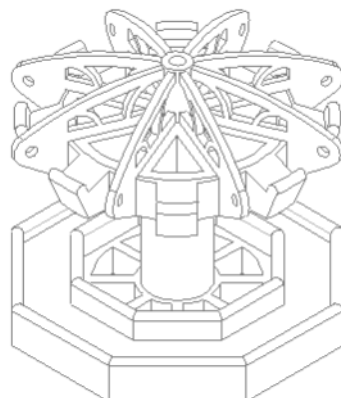
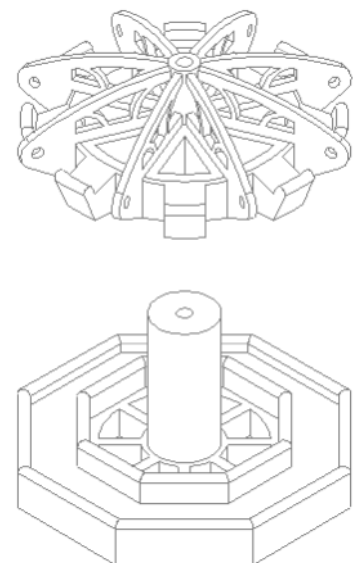


Figura 7.16 Axonometría nodo pieza completa y axonometría nodo explosionada
Fuente: Elaboración del autor



La figura 7.17 expone la parte superior de nodo, un anillo alrededor de la sección tubular central que soporta ocho anclajes tipo ménsula para recibir el anclaje correspondiente al extremo de la barra del semiarco correspondiente. Y ocho pletinas aligeradas pensadas para la sujeción de la cubierta, una tensoestructura que se posiciona en los husos esféricos que se genera entre semiarcos, sujeta a lo largo de cada semiarco en los puntos de articulación entre módulos de tijera y con un anclaje superior, similar a un gancho de arnés, que se conecta a las pletinas del nodo.

La forma de las pletinas corresponde a idear un remate acorde con la geometría del domo y a su vez, en el supuesto de cubrir en su totalidad el domo, y que el nodo genere un remate superior estético.

El nodo se complementa con su sección inferior (figura 7.18), mucho más sencilla en comparación con la parte superior. La parte inferior contiene la sección tubular central, con la altura apropiada para establecer la etapa final de despliegue y estabilidad de la estructura. Ambas partes se ensamblan a través de un tornillo de un largo apropiado que agrupe las dos secciones y se asegura mediante tuercas en ambos extremos del tornillo (figura 7.14).

Alrededor de la sección circular y como parte de la misma pieza inferior, se define una pletina horizontal de forma ortogonal, todo su perímetro describe la sujeción tipo ménsula para recibir el anclaje de las barras (figura 7.18)

Esta solución se presenta como una alternativa poco viable, genera un sensación de elemento pesado nada acorde con el lenguaje del domo desplegable y requiere un alto grado de complejidad para su fabricación, además el sistema de anclaje denota inestabilidad al momento de sujetar los semiarcos al nodo. Aunque cabe destacar que el nodo incluya anclajes para la sujeción de la cubierta y que de alguna forma busque una geometría estética para el remate superior del domo.

El objetivo de dar a conocer esta propuesta de nodo, es exponer en esta investigación la evolución que llevo la búsqueda de la forma, en algunos casos acertada y en otros no, y que seguramente sirven de referente a futuras investigaciones relacionadas con el tema.

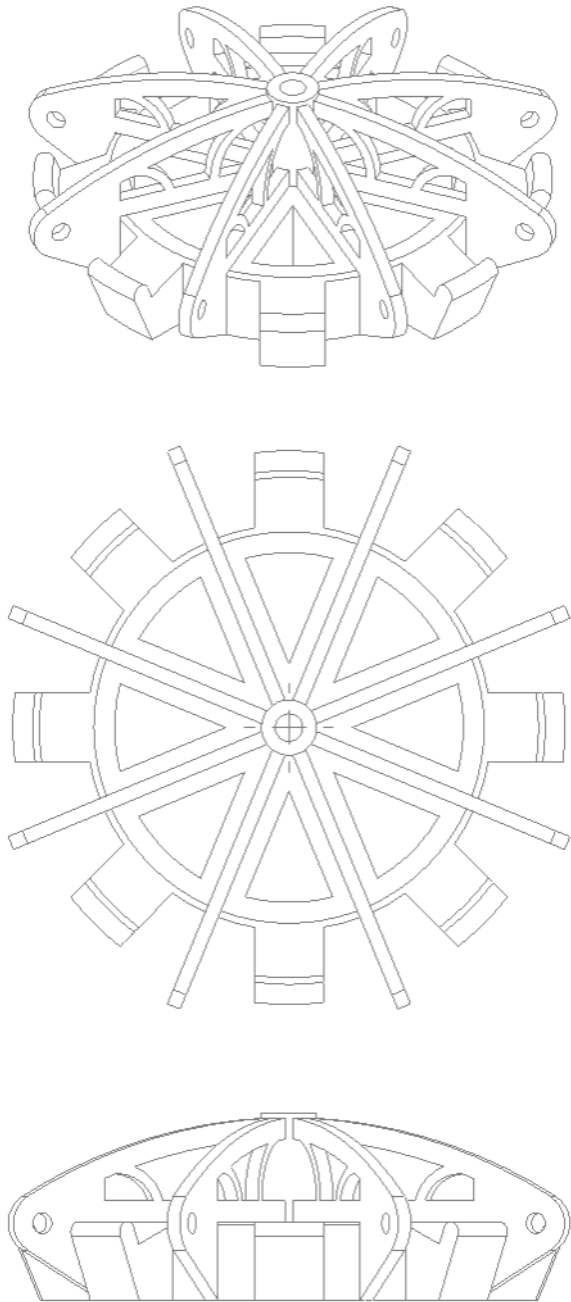


Figura 7.17 Parte superior del nodo.
De arriba hacia abajo: Axonometría, planta y elevación. Fuente: Elaboración del autor

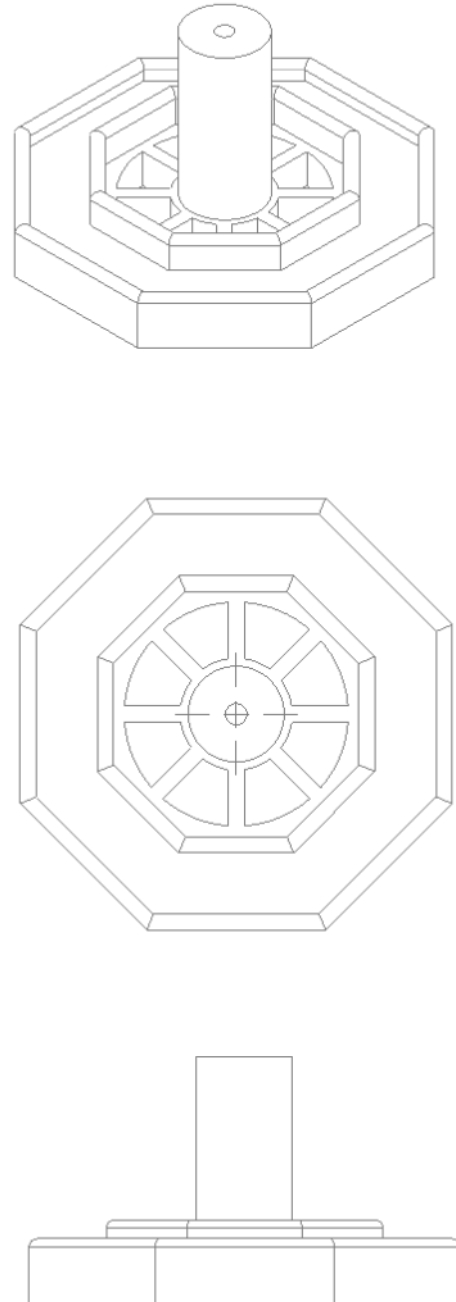


Figura 7.18 Parte inferior del nodo.
De arriba hacia abajo: Axonometría, planta y elevación. Fuente: Elaboración del autor

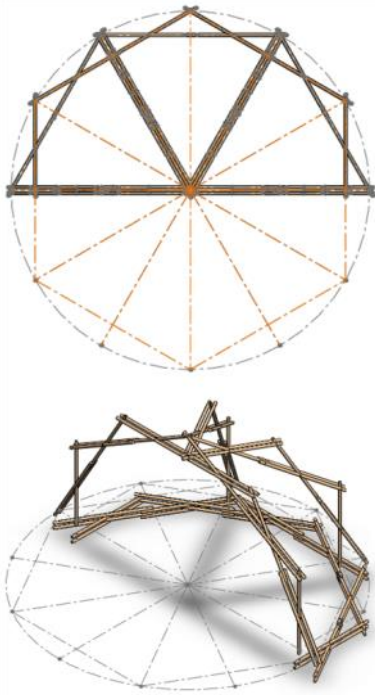


Figura 7.19 Propuesta espacial de medio domo desplegable a partir de la geometría del hexágono y eliminando semiarcos intercalados.

Fuente: Elaboración del autor

Figura 7.20 Maqueta escala 1:10. Medio domo desplegable.

Fuente: Elaboración del autor

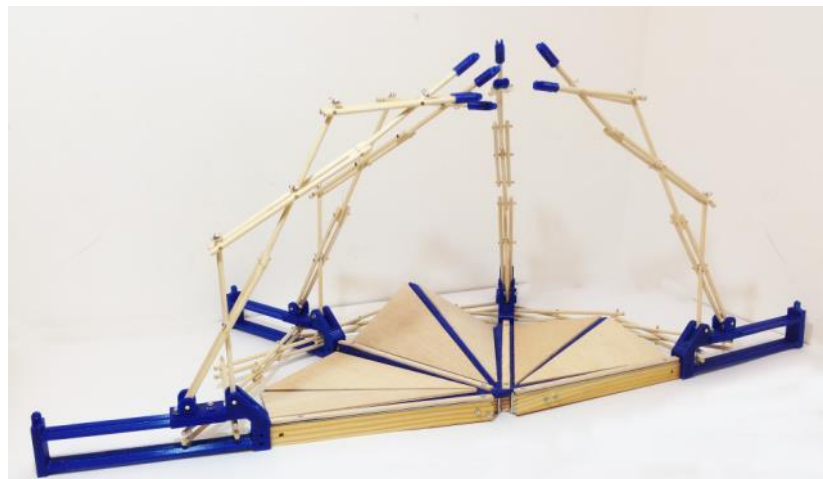


Figura 7.22 Propuesta de nodo 2. Impresión 3D, material PLA.

Fuente: Elaboración del autor

La siguiente línea de diseño de nodos se fundamenta en simplificar el sistema e incorporar solo pletinas para la sujeción de los semiarcos y agujeros para sujetar la propuesta de tensoestructura como cubierta.

Para esta alternativa de nodo, se parte de una propuesta espacial basada en medio domo desplegable configurado a partir de la geometría de un hexágono, se opta por eliminar semiarcos de forma intercalada y de esta manera, la espacialidad final del medio domo se compone de cuatro semiarcos que se conectan en la cúspide (figura 7.19).

Se diseña una nueva propuesta espacial referida a la aplicación de un escenario, para cubrir una luz de seis metros y una geometría de arco de medio punto en elevación. Su proyección a nivel constructivo se realiza a través de un modelo físico escala 1:10, que incorpora barras de madera de sección circular y piezas especiales para las bases, el nodo y anclajes de conexión al nodo realizadas en impresión 3D (figura 7.20).

Se propone como solución un nodo como pieza completa, con la altura determinada para establecer la forma final del domo. El nodo incluye pletinas simples, posicionadas radialmente según el polígono utilizado para recibir la pletina doble del extremo de la barra correspondiente y realizar el ensamble y aseguramiento entre elementos mediante tornillos, arandelas y tuercas, garantizando la correspondencia geometría entre el eje de la barras y el centro del agujero correspondiente. El modelado del nodo incluye dos remates, superior e inferior, a modo de pletinas horizontales con agujeros para sujetar la membrana de cubierta (figura 7.21)

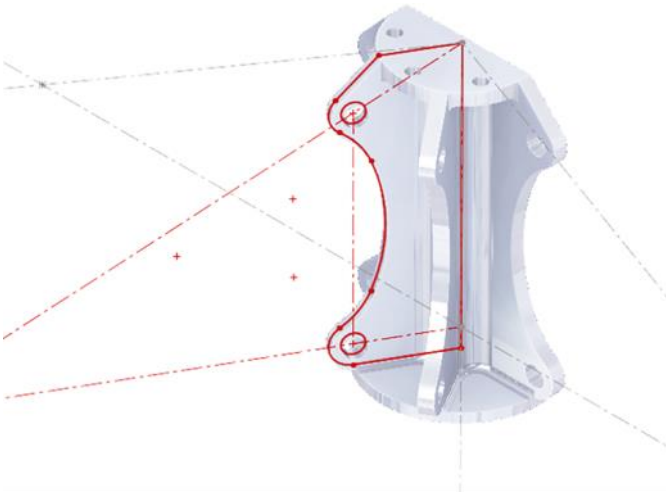


Figura 7.21 Izq. Modelado de nodo 2. Correspondencia de los ejes longitudinales de las barras con la geometría de las pletinas y centro de los agujeros del nodo
Der. Sobreposición nodo en geometría de domo
Fuente: Elaboración del autor



Figura 7.23 Detalle ensamble de nodo 2 y semiarcos en maqueta.
Fuente: Elaboración del autor

Se debe considerar también el recorte de las barras que se conectan al nodo, eliminando la sección necesaria para sobreponer el nodo, de tal manera que sujete de forma precisa a las pletinas de las barras y conforme la geometría exacta del domo.

Definido el modelo digital del nodo, se procede a su fabricación con la tecnología de impresión 3D (figura 7.22). Adicionalmente para la conexión del nodo a las barras del semiarcos, se diseñó piezas tubulares dobles y sencillas que encajan en las barras de madera e incorporan el sistema de sujeción al nodo, basado en la terminación de doble pletina.

La figura 7.23 muestra el ensamble realizado a nivel de maqueta, aunque debido a la escala, los agujeros son de un diámetro reducido e impide asegurar el sistema con tornillo, se implementa en este caso alambre para sujetar el nodo y analizar las ventajas, inconvenientes y viabilidad de esta solución.

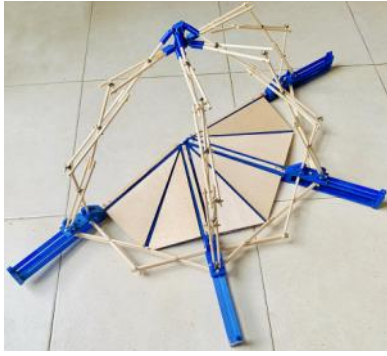


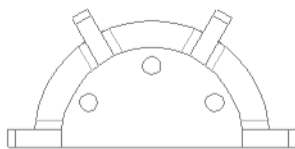
Figura 7.24 Ensamble nodo 2 en modelo físico escala 1:10.
Fuente: Elaboración del autor

A nivel de maqueta la segunda alternativa de nodo denota un aspecto más liviano, elimina excentricidades y la conexión entre componentes se realiza de manera sencilla. A escala del modelo físico, se describe un buen comportamiento, la estructura del medio domo es estable cuando es asegurado todo el sistema de barras y nodo (figura 7.24).

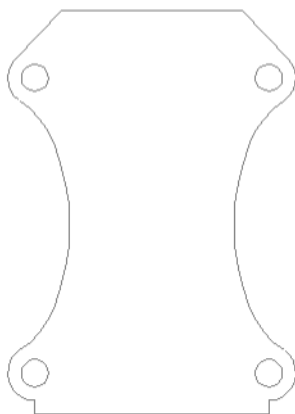
Ahora, para las previsiones del montaje y desmontaje, se requiere que exista el personal necesario que desde abajo controle y proceda al despliegue y repliegue de los semiarcos. Además, es necesario contar con una escalera adicional para que sea posible posicionar el nodo en la cúspide y manipular los semiarcos individualmente para que encajen en las conexiones precisas, un proceso que puede presentar dificultades y requiere de precisión para acertar en la coincidencia de los agujeros entre componentes.

Para la viabilidad en la fabricación del nodo a una escala 1:1, se proyecta a manera de pletinas soldadas sobre las bases horizontales, posicionadas en su ángulo correcto o, a través de lamina doblada, una solución muy factible que se retoma más adelante en la construcción de los prototipos, no se descarta su fabricación a través de mecanizado en CNC, un proceso de mayor coste pero igualmente viable.

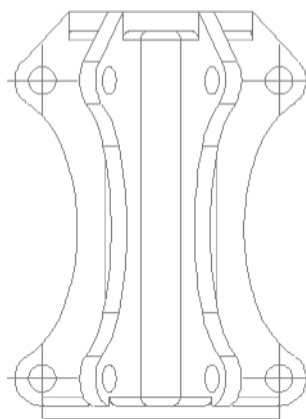
Figura 7.25 Propuesta de nodo 2.
a) Planta.
b) Elevación frontal.
c) Elevación posterior.
d) Axonometría
Fuente: Elaboración del autor



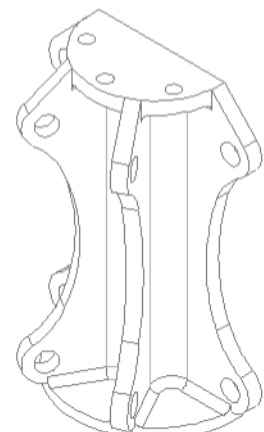
a.



b.



c.



d.

El modelo a escala construido permite mostrar que la solución desarrollada (figura 7.25), se considera un diseño acertado, sencillo y de fácil fabricación, que resuelve de manera funcional la conexión entre barra-nodo y sujeción de la membrana, garantizando las posiciones y estabilidad de cada componente, obteniendo una estructura en equilibrio.

Partiendo del mismo modelo físico a escala 1:10 se plantea una nueva propuesta de nodo, una tercera alternativa que mantiene el mismo concepto de pletinas radiadas, pero para esta nueva solución, las pletinas sobresalen de un anillo o sección tubular central, basado en los referentes estudiados en apartados anteriores.

El objetivo es buscar posibilidades geométricas del nodo que reduzcan material y esto se logra al optimizar la forma del nodo entre la conexión superior de las barras con la conexión inferior. La figura 7.26 expone la propuesta desarrollada.

Se observa que las pletinas inferiores son más alargadas para evitar la intersección entre barras dobles que llegan a este punto y de esta manera permitir el proceso de ensamble al nodo sin dificultades, es decir considerando el espacio suficiente para manipular la barra, el nodo y las herramientas necesarias para fijar el sistema de conexión, disminuyendo la posibilidad de intersección de componentes. Las pletinas superiores, se proyectan alineadas con los ejes longitudinales correspondientes a las barras y se incorpora el remate superior para la sujeción de la membrana (figura 7.26).

Para facilitar el proceso de fabricación se fracciona el nodo en dos partes, cada parte contempla la tipología de ensamble machihembrado, la parte inferior se introduce dentro de la parte superior y es a través de un perno del largo específico que se conectan ambas partes y conforman la unidad del nodo (figura 7.27).



Figura 7.27 Propuesta de nodo 3. Impresión 3D, material PLA.
Fuente: Elaboración del autor

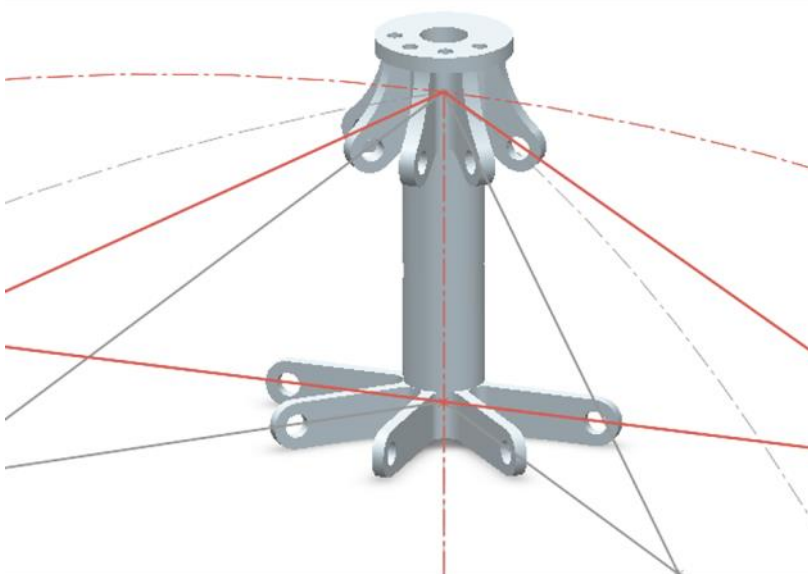


Figura 7.26 Modelado de nodo 3. Correspondencia de los ejes longitudinales de las barras con la geometría de las pletinas y centro de los agujeros del nodo
Fuente: Elaboración del autor

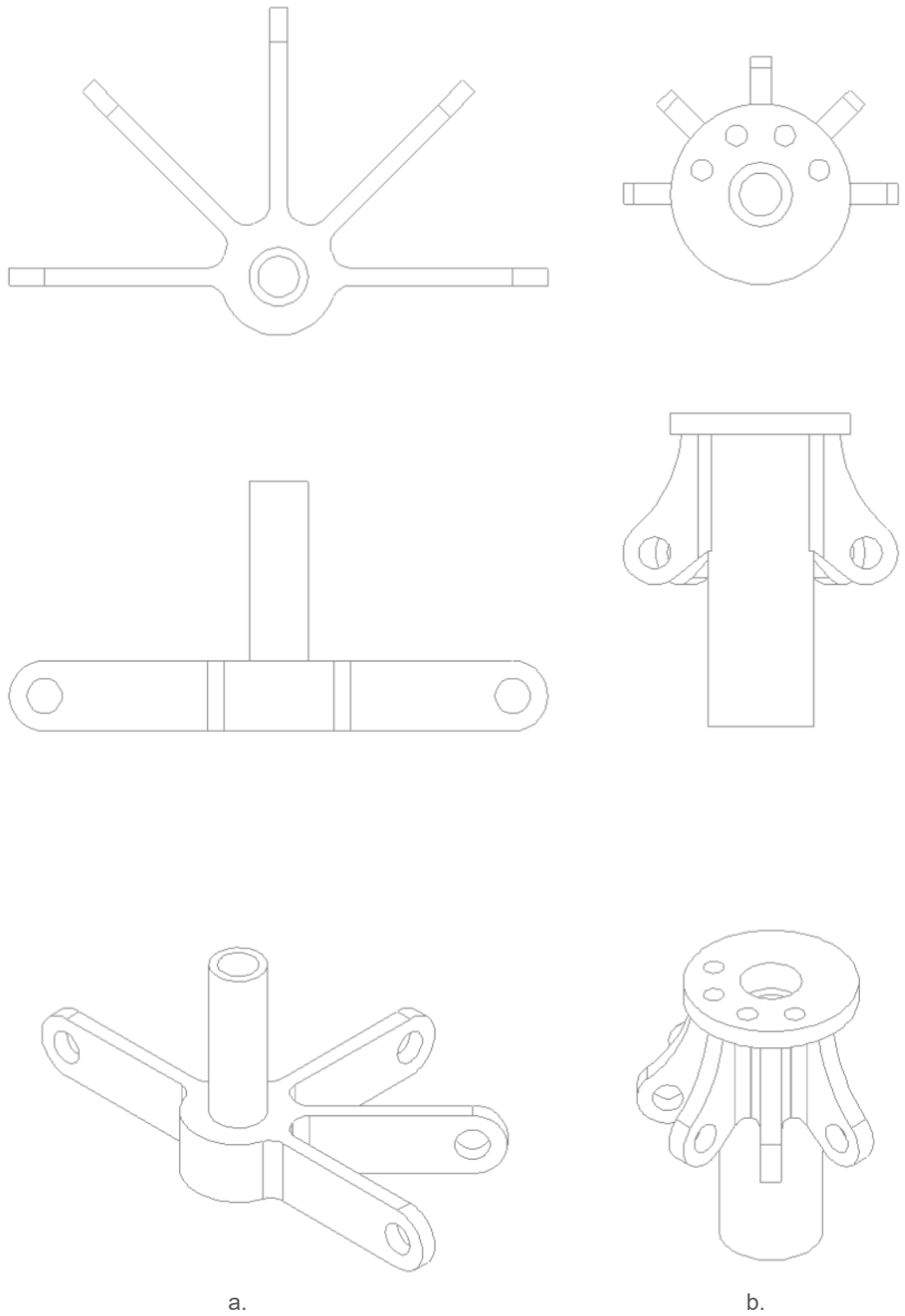


Figura 7.28 Propuesta nodo 3.
De arriba hacia abajo. a) Parte inferior del nodo. Planta, elevación frontal y axonometría.
b) Parte superior del nodo. Planta, elevación frontal y axonometría.

Fuente: Elaboración del autor

El modelo físico construido permite observar a escala la compatibilidad del nodo al posicionarse en la cúspide y ensamblarse con las barras, así como analizar el proceso de sujeción entre componentes, el montaje y desmontaje del nodo, aunque la simulación es a nivel de maqueta los resultados son favorables (figura 7.29 y 7.30).

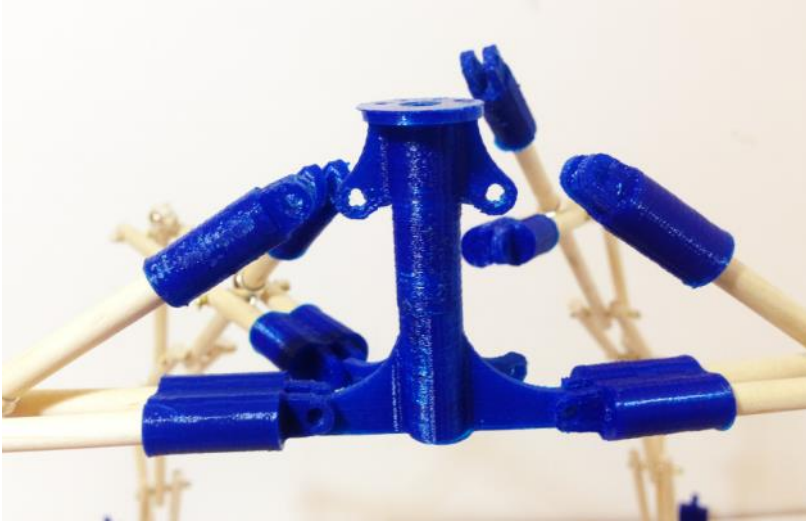


Figura 7.29 Detalle ensamble nodo 3 en modelo físico esc 1:10.
Fuente: Elaboración del autor

Se puede concluir que el diseño del nodo es acertado, funciona estructuralmente garantizando la estabilidad del domo, además se obtiene una reducción del material al implementar la sección tubular central. Adicionalmente esta solución considera mayores tolerancias y distanciamientos entre componentes para facilitar el montaje manual y uso de herramientas para asegurar el sistema.

Su fabricación es viable, incorpora componentes sencillos, que con procesos de corte laser de las pletinas y posterior soldadura se obtendría la pieza completa, aunque también se contempla el mecanizado CNC, como posible alternativa de fabricación.

La idea de considerar el nodo en dos secciones, se reinterpreta en una variación de esta última propuesta, en nueva una solución de nodo para un domo desplegable en bambú [85] (figura 7.32) .

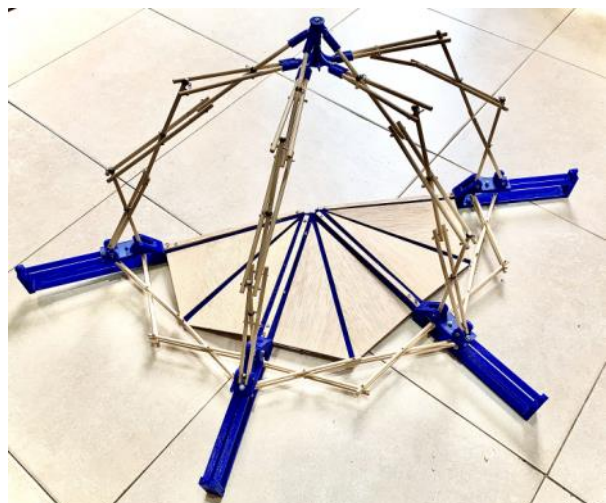


Figura 7.30 Ensamble nodo 3 en modelo físico escala 1:10.
Fuente: Elaboración del autor

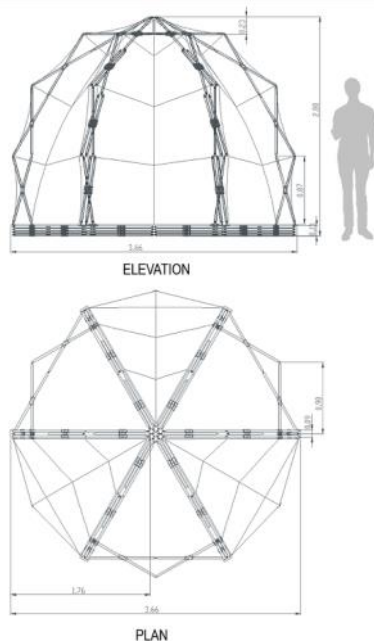


Figura 7.31 Geometría para domo desplegable en bambú.

Fuente: (Torres et al, 2019)
Elaboración del autor

Figura 7.32 Maqueta domo desplegable en bambú escala 1:20

Fuente: (Torres et al, 2019)
Elaboración del autor



Figura 7.33 Modelado nodo 4 para domo desplegable en bambú

Fuente: (Torres et al, 2019)
Elaboración del autor

El nodo responde a la geometría de un hexágono y recibe la totalidad de seis semiarcos de la tipología de arcos en herradura (figura 7.31), la variación en esta solución se realiza en la sección tubular de nodo .

Para este caso se reemplaza el tramo vertical, por una barra de bambú con una longitud coincidente a la distancia (k) (longitud del canto del semiarco), y con el diámetro acorde para introducirse dentro de las dos secciones de nodo; estas se ensamblan y se fijan a través de tornillos transversales en cada uno de los extremos de la barra de bambú implementada, para conformar finalmente la totalidad del nodo (figura 7.33).

Para visualizar esta solución y observar el comportamiento y viabilidad constructiva de un domo desplegable completo, se construye un nuevo modelo físico a escala 1:20 en barras de madera de sección circular para simular las barras de bambú (figura 7.32).

Las dos secciones de nodo para el modelo físico, se fabrican nuevamente con la tecnología de la impresión 3D, a diferencia de la anterior solución, al nuevo nodo se le adicionan cartelas transversales en la sección superior, de tal forma que permitan rigidizar las pletinas y evitar posibles roturas durante la implementación del nodo en la maqueta. Adicionalmente se aumenta la altura para la sujeción de la membrana a través de los agujeros previstos en la pletina superior (figura 7.34).

La figura 7.34 expone el nodo impreso y las partes que lo componen. Una vez ensamblado el nodo, se procede a su colocación y fijación en el modelo físico realizado.

Para su implementación en el modelo a escala, es necesario mencionar la experiencia en los anteriores casos sobre la utilización de los anclajes tipo pletinas en las barras, realizados con impresión 3D. En las piezas impresas se demuestra que el PLA permite la fabricación de cualquier tipo de pieza mecánica y poder proyectarla físicamente en tres dimensiones, pero es un material poco resistente, las pletinas de las barras se rompen con facilidad al manipularlas, al ejercer la conexión entre componentes y fallan rápidamente, y sin la sujeción al nodo, la estructura no es estable.

Por esta razón, y acorde a la escala de esta nueva maqueta, para el sistema de sujeción se implementan pinzas eléctricas tipo cocodrilo en aluminio, una solución práctica a nivel del modelo físico, que simula la doble pletina sujeta al nodo, logra una capacidad portante en proporción a la escala y garantiza la estabilidad del domo en su posición final de despliegue y uso.

También como estrategia para conservar la integridad estructural de nodo en PLA, no se consideraran las perforaciones de los agujeros en sus respectivas pletinas, en cambio se incluyen unas pequeñas guías o rieles que permiten fijar y posicionar la pinza con mayor firmeza (figura 7.34, 7.35 y 7.36).

El resultado es favorable, una vez están todos los semiarcos conectados al nodo, la estructura es totalmente estable, con bastante rigidez y describe un buen comportamiento a la compresión. Se obtiene un proceso de montaje y desmontaje de fácil ejecución, fundamentalmente gracias a tipo de anclaje y por el distanciamiento entre barras y nodo que permite manipular la pinza para la sujeción correspondiente.

No obstante, la estabilidad de los semiarcos se obtiene al incorporar elementos adicionales de rigidización entre ellos o al incorporar la cubierta textil como tensoestructura.



Figura 7.34 Propuesta de nodo 4. Impresión 3D, material PLA.
Fuente: Elaboración del autor

Figura 7.35 Planimetría nodo para domo desplegable en bambú.

a) Axonometría explosionada.

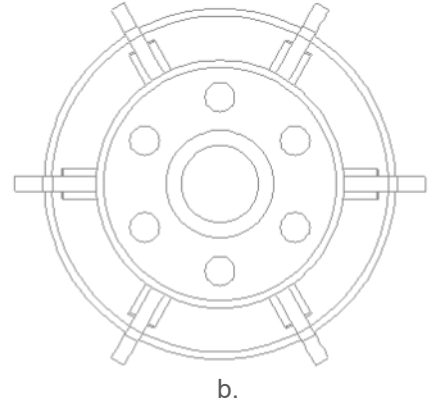
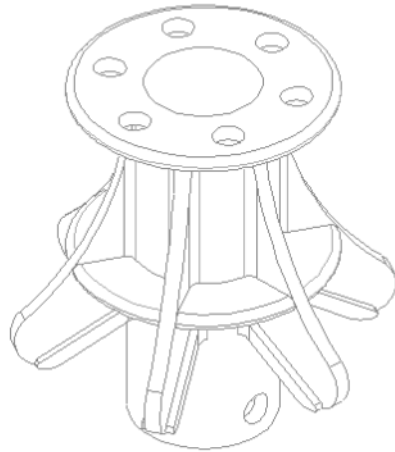
b) Vista superior.

Elevación.

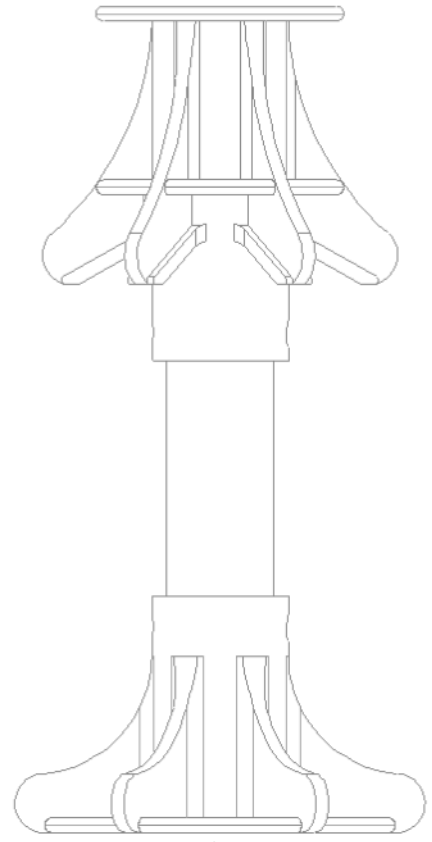
d) Vista inferior

Fuente: (Torres et al, 2019)

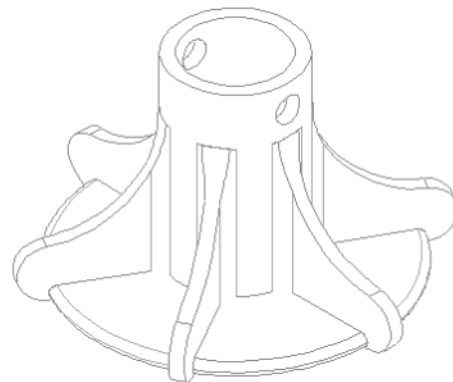
Elaboración del autor



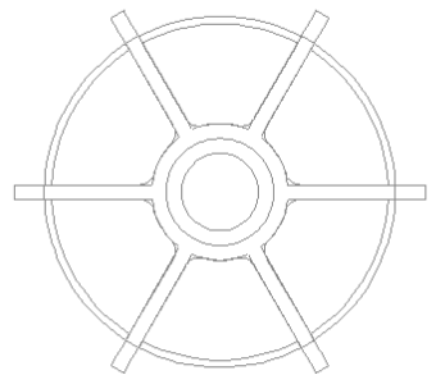
b.



c.



a.



d.



Figura 7.36 Maqueta domo desplegable en bambú escala 1:2. Implementación nodo
Fuente: (Torres et al, 2019)
Elaboración del autor

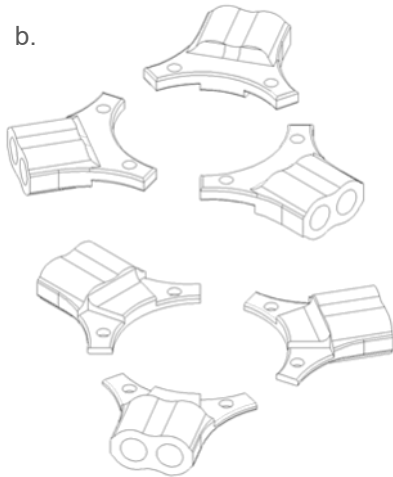
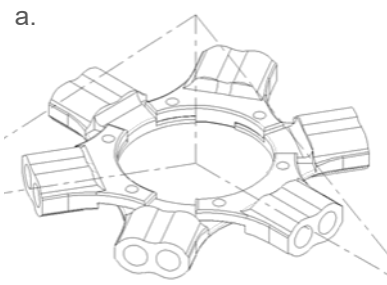


Figura 7.37 Modelado digital de pletinas barras dobles para nodo 5
Fuente : Elaboración del autor

Las posibilidades del diseño del nodo compatibles con los domos desplegables que se desarrollan en esta investigación, pueden tener una gran variedad de alternativas, que dependen del material, proceso de fabricación o grado de tecnología que se quiera implementar.

Se llegaron a idear muchas más soluciones basadas en los referentes estudiados, pero que por su complejidad o desaciertos en el diseño no se llegaron a concluir, ni a implementar por completo (figura 7.37 y 7.38).

Por otro lado, las soluciones de nodos que se materializan en esta investigación gracias a la fabricación digital e impresión 3D, describen una evolución en cada caso, ventajas e inconvenientes que según su implementación en cada modelo físico aportan sugerencias para el siguiente diseño de nodo.

De esta manera, se considera que el nodo para el domo desplegable en bambú es la solución más favorable, que con la tecnología de fabricación adecuada es viable para realizar e implementar constructivamente a escala real. Su diseño se estima como una aportación y proyección para futuras investigaciones o aplicaciones estructurales, y no cabe duda que es necesario continuar con su análisis para corroborar su comportamiento estructural en futuros estudios que complementen esta investigación (figura 7.32 a 7.36).

Figura 7.38 Propuesta nodo 5. a) Proyección encaje de pletinas en barras que conforman el nodo, parte inferior. b) Acoplamiento de pletinas. c) Modelado digital pletinas parte superior e inferior. d) Modelo de nodo realizado con impresión 3D.

Fuente : Elaboración del autor

7.3.2 Propuestas de nodos en prototipos construidos.

Las soluciones que se presentan a continuación describen dos propuestas de nodos diseñados y fabricados manualmente para dos aplicaciones arquitectónicas temporales, construidas a escala real correspondientes a un escenario y stand desplegable (figura 7.39 y 7.40).

El proceso de diseño, fabricación, montaje y utilización de estas estructuras se desarrolla durante la estancia de investigación, bajo la coordinación y asesoramiento técnico del Dr. Arq. Pedro Pacheco y Arq. Ernesto Ramos. Director y coordinador respectivamente, de los laboratorios y talleres de la Escuela de Arquitectura, Arte y Diseño del Instituto Tecnológico de Monterrey. Campus Monterrey, México.



Figura 7.39 Escenario Desplegable.

Fuente: Elaboración del autor



Figura 7.40 Stand Desplegable.

Fuente: Elaboración del autor



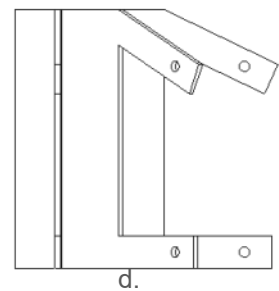
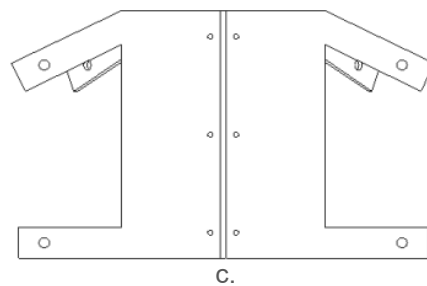
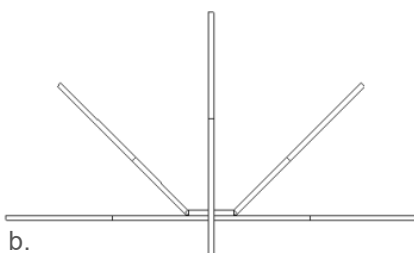
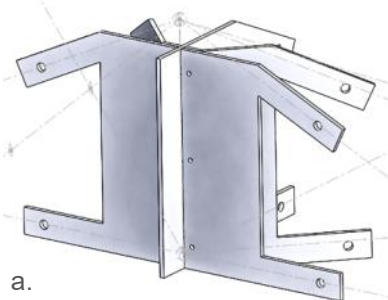
Figura 7.41 Montaje nodo en escenario desplegable.
Fuente: Elaboración del autor

Por cronología, la primera aplicación arquitectónica corresponde a medio domo desplegable, aplicado a un escenario dentro de un recinto cerrado, su principal características es la utilización de tubos de cartón para el ensamble de los semiarcos (caso de estudio del capítulo anterior) (figura 7.41).

El diseño del nodo para esta aplicación, se basa en el concepto desarrollado en una pieza de impresión 3D, descrita en el anterior apartado, correspondiente a la figura 7.22. Para el caso específico, no se implementa la tecnología de la impresión 3D, se opta por materializar las pletinas a partir de planos doblados y encajados, utilizando como material un panel composite formado por dos láminas de cubierta de aluminio y un núcleo relleno de agregado mineral, comúnmente conocido por su marca Alucobond®.

Según la geometría del escenario, que configura medio domo, el nodo se articula a cinco semiarcos, de esta forma el diseño del nodo responde a proyectar pletinas sencillas en cada plano, trazadas según los ejes longitudinales de las barras del último módulo de tijera, en su posición final de despliegue (figura 7.42).

Figura 7.42 Proyección nodo compuesto por laminas de aluminio Alucobond®.
a) Axonometría
b) Planta
c) Elevación frontal
d) Elevación lateral
Fuente: Elaboración del autor



La fabricación y ensamble del nodo se forma a través de tres planos de Alucobond®, dos ensamblados perpendicularmente a manera de machihembrado y el tercer plano, coplanar y remachado al plano frontal del nodo, este último incorpora dobleces para posicionar las pletinas en su ángulo correspondiente para recibir al semiarco específico (figura 7.43).

Para evitar la intersección entre barras, se considera una distancia apropiada del largo de las pletinas. La unión entre barras y nodo se realiza a través de la colocación de la pletina dentro de la barra del tubo de cartón, en la parte inferior y la pletina en medio de las dos barras de tubo de cartón, en la parte superior; finalmente su acoplamiento se asegura a través del sistema tornillo, arandela y tuerca, para asegurar y fijar el nodo en su posición (figura 7.41).

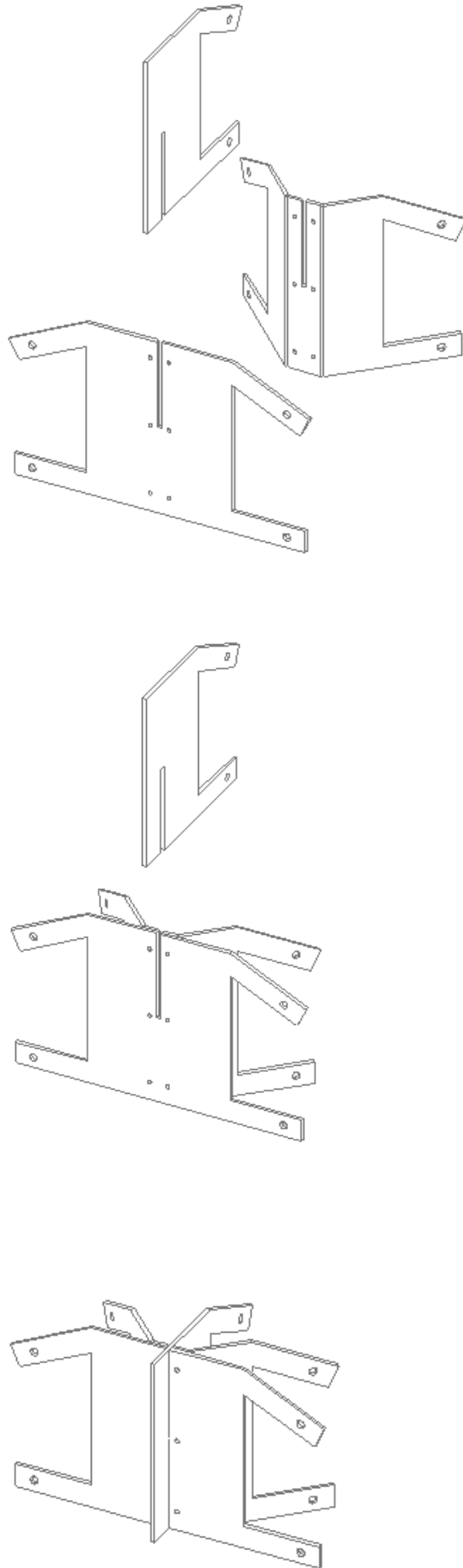


Figura 7.43 Proceso de ensamble de laminas para conformar el nodo.
Escenario desplegable
Fuente: Elaboración del autor

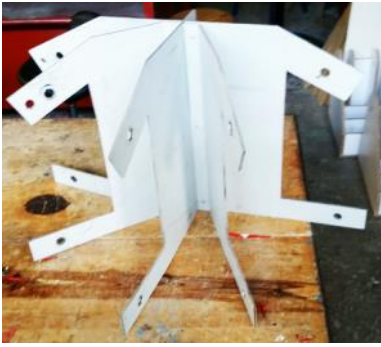


Figura 7.44 Nodo ensamblado a partir de laminas de aluminio para Escenario Desplegable.
Fuente: Elaboración del autor

La figura 7.44 expone el nodo con todos los planos ensamblados y fijados para formar una única pieza que ejerce la función de conector para los extremos superiores de los semiarcos.

Ensamblado el nodo se procede a su implementación, para este proceso se requiere una escalera adicional para posicionar el nodo en la cúspide y el personal necesario para estabilizar cada semiarco en la posición ideal de despliegue, aquella posición de despliegue previa a la etapa final (ver apartado 6.4.4).

El proceso de montaje y conexión se realiza manualmente y es necesario manipular levemente cada semiarco para lograr la conexión entre componentes. Primero se procede a introducir las pletinas inferiores dentro de cada barra de cartón respectivamente y asegurando la conexión por medio de pernos y a continuación se aseguran las barras superiores a las pletinas correspondientes, en este punto la pletina se sitúa en medio de las dos barras, igualmente el sistema es asegurado a través de un perno (figura 7.45).

Instalado el nodo, la estructura es estable y su durabilidad cumplió lo previsto como estructura temporal. La solución del nodo se caracteriza por ser una solución simplificada, liviana, de fácil fabricación, rápido ensamble e implementación. Pero con varios detalles a mejorar, como garantizar el posicionamiento de las pletinas en su ángulo respectivo, e incorporar la solución para fijar la cubierta en tela.

La siguiente solución de nodo tiene en cuenta estas observaciones.



Figura 7.45 Fijación del nodo a la cúspide del escenario
Fuente: Elaboración del autor

La nueva propuesta de nodo refiere a una aplicación de un stand plegable, un domo desplegable configurado a partir de la geometría de un heptágono, construido con barras de aluminio de sección tubular rectangular. Para esta solución se propone una variación del nodo desarrollado en el escenario desplegable (figura 7.40).

Se retoma el mismo principio de los planos en Alucobond®, pero esta versión incluye cinco planos necesarios para recibir nueve semiarcos. El sistema de ensamble entre planos es a través del machihembrado, donde es el plano transversal el que recibe de forma perpendicular el encaje de los cuatro planos restantes, los cuales a su vez incorporan dobleces para posicionar las pletinas en el ángulo conveniente para recibir el semiarco respectivo.

Para esta solución se añade un remate horizontal en la parte superior del nodo, que permite fijar las pletinas en su ángulo preciso e incorporar los agujeros para sujetar el extremo final de la cubierta textil, posicionada entre semiarcos (figura 7.46).

La figura 7.47 ilustra las láminas de aluminio que componen esta versión de nodo y su proceso de ensamble para formar la pieza completa (figura 7.48).

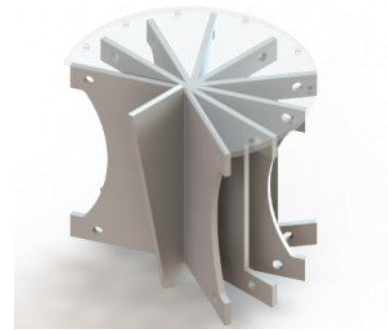


Figura 7.46 Nodo para stand desplegable

Fuente: Elaboración del autor

Figura 7.47 Componentes y ensamble de nodo para stand desplegable

Fuente: Elaboración del autor

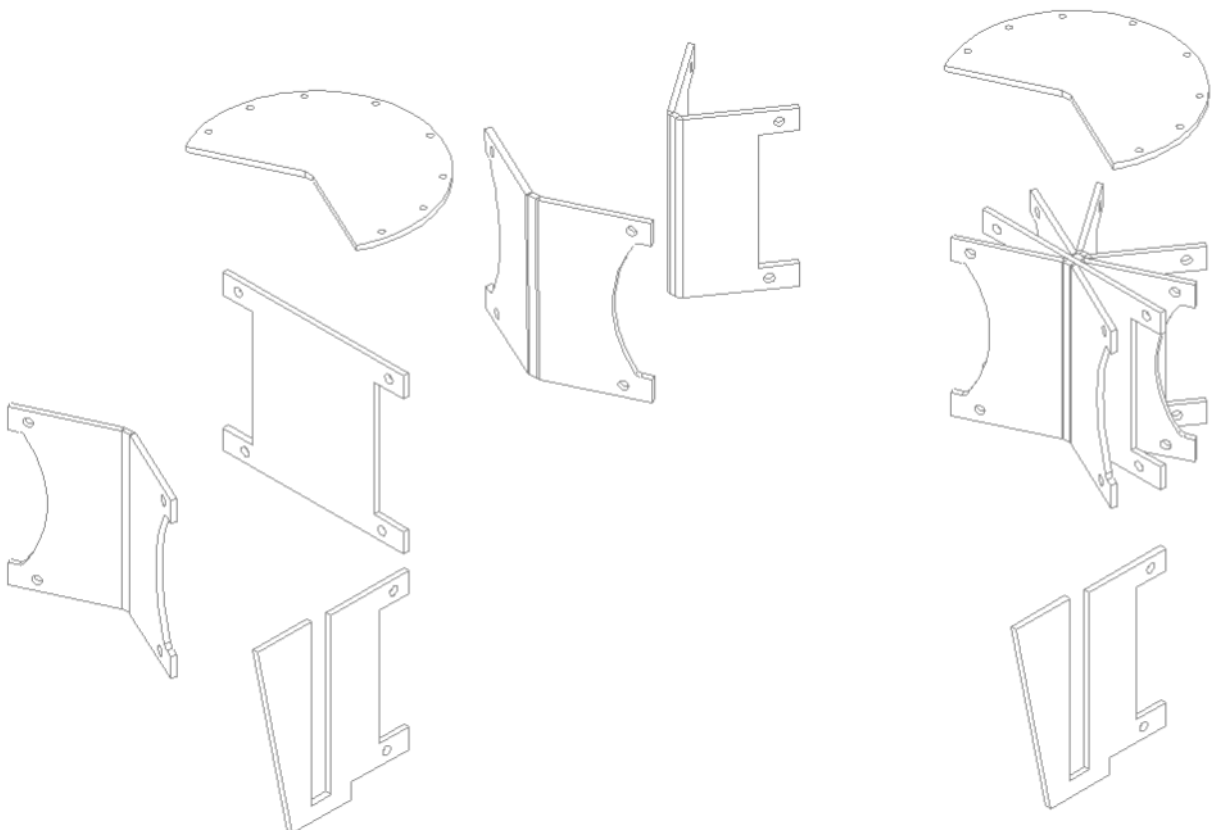
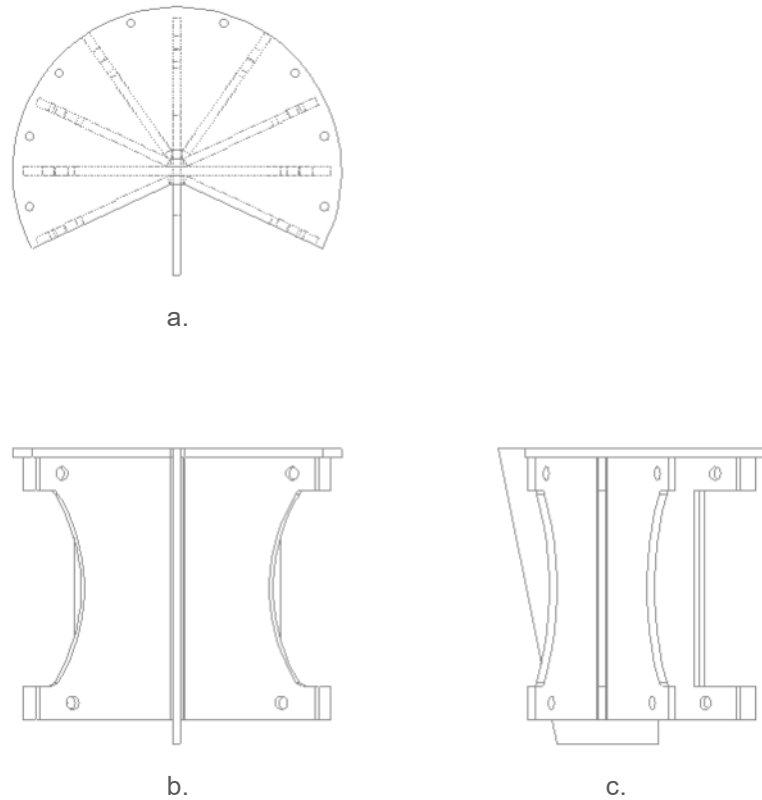


Figura 7.48 Planimetría nodo para Stand Desplegable.

- a) Planta.
- b) Elevación frontal.
- c) Elevación lateral

Fuente: Elaboración del autor



Al igual que el caso anterior, se ha de conectar los extremos de las barras, correspondientes a los tramos finales de los semiarcos, al nodo y para ello es necesario contar con una escalera adicional para poder acceder a la altura determinada por la geometría del domo, la cual no sobrepasa los tres metros.

Basta con una persona para manipular los componentes, soportar el nodo, proceder al ensamble y realizar la fijación entre componentes, es un proceso sencillo y manual que implementa tornillos, arandelas, tuercas y las herramientas correspondientes para realizar este proceso.

Aunque se ha de prever por seguridad, el personal necesario en cada semiarco para controlar un posible repliegue de los semiarcos.

Esta nueva versión de nodo, contempla como remate superior una pletina horizontal, su función además de garantizar la posición de las pletinas en su ángulo correspondiente para recibir el semiarco respectivo, incorpora agujeros para sujetar una cubierta textil total que cubra toda la estructura o como se realizó en este caso, sujetar las secciones de cubierta textil en medio de los semiarcos.



En la figura 7.49 se puede observar a mayor detalle la resolución del nodo para el stand desplegable, la propuesta demuestra una validación constructiva y estructural una vez están todos los semiarcos conectados. Se puede concluir que es una solución favorable y adaptable a diferentes geometrías de domos, ya que su fabricación y proceso de ensamble se acopla a diferentes cantidades de planos que reciban la cantidad de semiarcos necesarios.

Su configuración a partir de planos modulares y la tipología de ensamble permite el reemplazo de los componentes del nodo con facilidad, en caso de que algún plano sufra algún daño durante la implementación.

Finalmente, no hay que olvidar que por la tipología de la estructura, esta siempre requerirá un proceso de desmontaje, de esta forma el sistema de anclaje entre barras y nodo debe ser práctico y sencillo. Se considera que la fijación de tornillo es un sistema eficaz, tradicional, de fácil adquisición en el mercado y que no requiere de personal especializado para su ejecución, lo que la hace económicamente posible.

Figura 7.49 Componentes y ensamble nodo para stand desplegable

Fuente: Elaboración del autor

7.4 Conclusiones

Las alternativas de nodos y tipologías de anclajes para obtener la conexión entre componentes, barra - nodo, en la implementación de los domos desplegables que se proponen esta investigación, pueden ser uniones de diversas categorías, según el material, método de fabricación que se utilice y la tecnología implementada. Lo cierto es que a través de la tecnología de impresión 3D es posible fabricar toda clase de piezas complejas en menor tiempo y evitar procesos de producción más costosos.

De esta manera, se subraya la importancia del uso de esta tecnología en el desarrollo de la investigación, su utilización permite explorar, fabricar y sobretodo comprobar en modelos físicos reales, diversas posibilidades de nodos con el objetivo de determinar su viabilidad estructural, constructiva y de fabricación.

Cada una de las propuestas de nodos diseñadas, fabricadas y validadas en modelos físicos aportan soluciones técnicas al presente estudio, ya sea por los aciertos o desaciertos durante los procesos de diseño e implementación, contribuyen científicamente al estado del arte específico. Lo importante de este recorrido experimental es obtener una resolución adecuada, o varias, de la conexión entre barras y nodo.

Por consiguiente, de las propuestas realizadas por impresión 3D, se destaca la solución de nodo para el domo el bambú (figura 7.32 a 7.36 y 7.50). Se considera una propuesta acertada de fácil fabricación e implementación, sus componentes son pletinas simples radiadas a un anillo central, junto con pletinas horizontales a modo de tapas, para rigidizar la pieza y funcionales para sujetar la cubierta textil. Se propone como material aluminio y un proceso de fabricación a partir de corte laser para la definición de la forma de las pletinas y de los agujeros, posteriormente se procede a un proceso de soldadura para unir las piezas. Además para reducir material y que el nodo sea más liviano se incorpora una barra de bambú del largo adecuado que enlaza las dos partes del nodo. Cabe aclarar que el diseño del nodo esta sujeto a cambios según simulaciones de esfuerzos, cargas y optimización del material que seguramente afinaran más el diseño, contenidos que no hacen parte del presente estudio pero que se tienen en cuenta para

Figura 7.50 Propuesta de nodo 4.
Impresión 3D, material PLA.
Para domo en bambú.
Fuente: Elaboración del autor



Se concluye que el sistema de anclaje de pletina simple para el nodo es el más práctico para los procesos de montaje, ya que requiere de elementos sencillos para asegurar el sistema, como son pasadores, pernos o tornillos. A su vez es fácil de desmontar con herramienta de fácil adquisición y manipulación, no se requiere personal especializado. Finalmente los extremos de las barras, según el diseño, se pueden adaptar a las posibilidades de anclaje de doble pletina o simple, si es el último caso respetando la conciencia de los ejes longitudinales a un único punto de intersección.

Cuando se procede a la construcción de aplicaciones arquitectónicas de domos desplegables para uso temporal, el cambio de escala, el material y la tecnología con la que se cuenta, determinan los factores fundamentales que deciden el diseño del nodo para el escenario y stand desplegable.

Por esta razón, se propone una solución de nodo de fabricación manual, de fácil ensamblaje y lo más ligero posible. Utilizando conexiones atornilladas simples, obviando la necesidad de desarrollar un tipo de articulación o piezas especiales.

El resultado es un nodo liviano configurado a partir de planos de Alucobond® encajables, radiados y coplanares, que se distribuyen en forma de abanico según la cantidad de semiarcos a recibir. Ambas soluciones se desarrollan bajo el mismo concepto y resultan ser una conexión acertada que funcionan estructuralmente y garantizan la estabilidad del domo durante su uso.

Aunque toma más relevancia el nodo para el stand desplegable debido a la complejidad de la geometría, la cantidad de semiarcos que recibe y que el proceso de diseño es una evolución de nodo realizado para el escenario desplegable. Se puede concluir de este nodo, que es un conector estable que simplifica la proyección y posicionamiento de las pletinas a través del detalle de la lamina doblada.

Se reducen tiempos de fabricación y ensamble entre componentes al implementar encajes del tipo machihembrado y remaches simples. La simplicidad de su fabricación se debe a que se contempla como una única pieza, no en dos secciones como en ejemplos anteriores, esta decisión facilita su construcción, pero puede optimizarse su peso al proyectar el nodo en dos piezas.

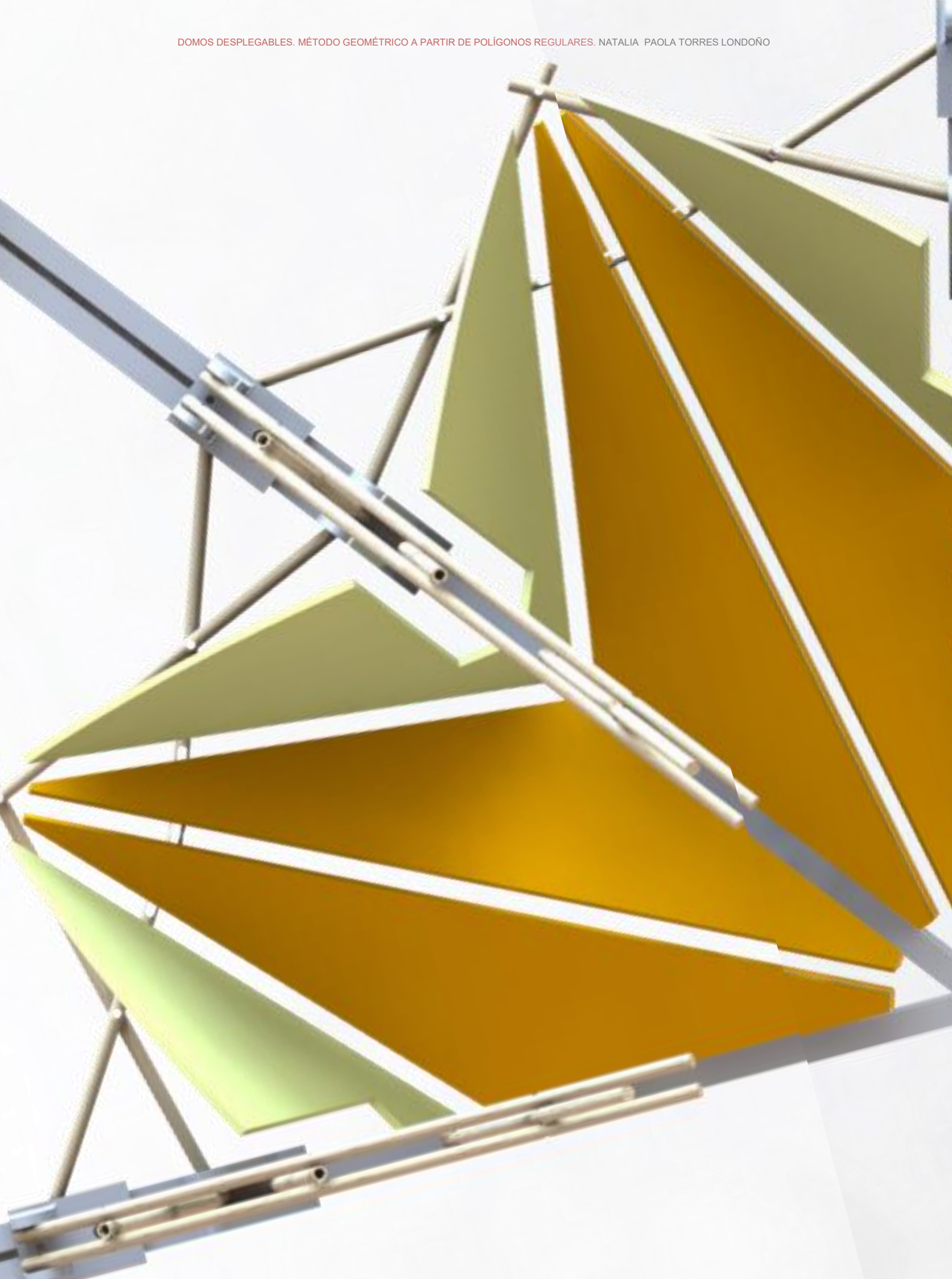
Además es un formato de diseño modulable y adaptable, que se puede aplicar a diferentes geometrías de domos, ya que el sistema de fabricación permite agregar o eliminar planos según el requerimiento espacial, para ello se propone como proyección, optimizar el proceso de machihembrado para obtener un sistema de nodo versátil a diferentes configuraciones de domos desplegados.

La voluntad de experimentación que conlleva todas las propuestas realizadas en el presente apartado, son oportunas para mejorar en cada solución de nodo, e intentar llegar a la solución idónea para los domos desplegados, muchas de ellas quedan en propuestas conceptuales debido a la tecnología y recursos con los que se contaban en cada proyecto y otras se convierten en nuevos diseños y aportaciones tecnológicas para su difusión académica.

Pero no se descartan las bases teóricas estudiadas para la implementación de soluciones de nodos ya desarrollados ampliamente por el sector de las estructuras, por eso a manera de proyección, se considera que adaptar el sistema de nodos utilizado en las estructuras de andamiaje, es una alternativa factible que aporta muchas ventajas, ya que el sistema incorpora en sí mismo el proceso de conexión y desconexión entre componentes a través del mecanismo palanca-cuña, garantizando la seguridad y estabilidad de la estructura. Una estrategia que encaja perfectamente para asegurar el nodo en su posición y proceder al montaje o desmontaje de la estructura desplegable de forma rápida y sencilla.

Al igual que el sistema Triodedic, que por su diseño, mecanismos y tipología de anclajes incorporados, se determina que es una solución compatible para el nodo en los domos desplegados. Claro está, habrá que adaptar la propuesta de nodo tipo Triodedic a las variables de cada geometría de domo y a los requerimientos según el tipo de barra y material a utilizar.

Finalmente todos los sistemas de nodos desarrollados en este apartado, resuelven o proponen de alguna manera u otra, la conexión entre barra y nodo, su aplicación esta sujeta a simulaciones y ensayos pertinentes para garantizar la validación estructural, una temática que se considera para futuras investigaciones.





8

CAPÍTULO

Plataforma plegable

La plataforma plegable es el componente estructural de los domos desplegables que incluye los soportes para los semiarcos y para el suelo plegable. En el presente capítulo se describen las características geométricas, requerimientos constructivos y análisis de los mecanismos necesarios de este componente estructural, para obtener un despliegue simultáneo entre plataforma y semiarcos.

Para ello es necesario analizar los procesos de despliegue y estudio del movimiento de las agrupación de tijeras generadas a partir del método geométrico propuesto y de esta manera hallar la mejor alternativa de estructura y suelo plegable, para obtener un proceso de despliegue viable, compatible con todos los demás componentes estructurales del domo.

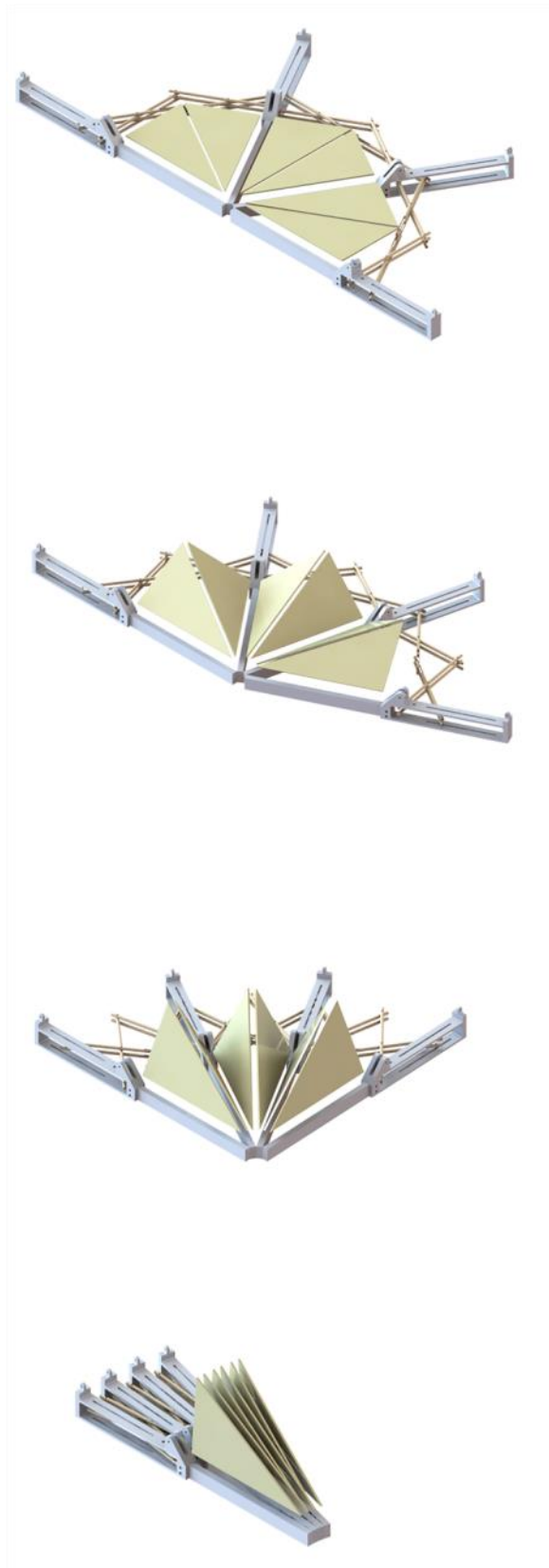


Figura 8.19 Proceso de despliegue plegadura con triángulos rectángulos, Tijeras de suelo a la vista Simulación SolidWorks® [135]. Fuente: Elaboración del autor

Contenido del capítulo

8.1 Tijeras de la plataforma plegable	354
8.2 Soportes semiarcos	356
8.3 Despliegue con curvatura constante	360
8.3.1 Desarticulación tramos cortos entre tijeras adyacentes	362
8.3.2 Desarticulación tramos largos entre tijeras adyacentes	364
8.3.3 Desarticulación central en módulos de tijeras.....	366
8.4 Geometría plegadura.	368
8.4.1 Estudio del movimiento	369
8.5 Plataforma plegable. Detalles	379
8.6 Modelo físico	382
8.7 Conclusiones	388

8.1 Tijeras plataforma plegable.

El método geométrico propuesto en la presente investigación para la configuración de domos desplegables a partir del sistema tipo tijera (STT), permite conformar arcos planos desplegables basados en la agrupación de módulos de tijeras con articulación excéntrica, con una relación geométrica constante durante el proceso de despliegue en planta y en elevación del domo propuesto.

Es así que la agrupación de tijeras del suelo, determinadas con las mismas características geométricas de los semiarcos desplegables, controlan el proceso de despliegue de toda la estructura. Es decir que, a medida que las tijeras de suelo se despliegan, los semiarcos se elevan simultáneamente para conformar la espacialidad del domo.

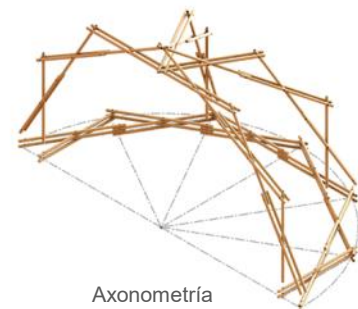
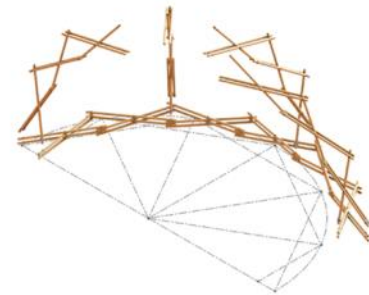
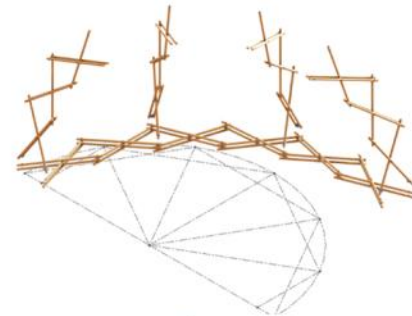
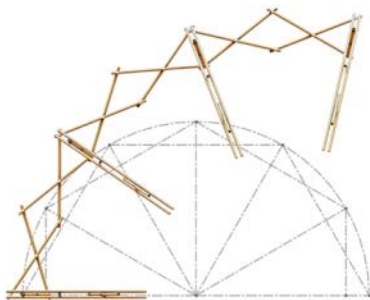
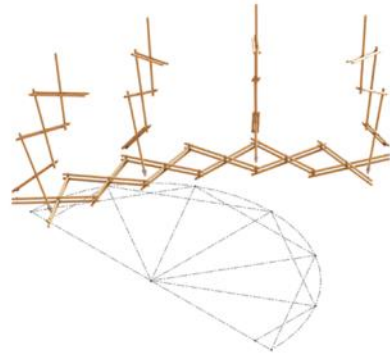
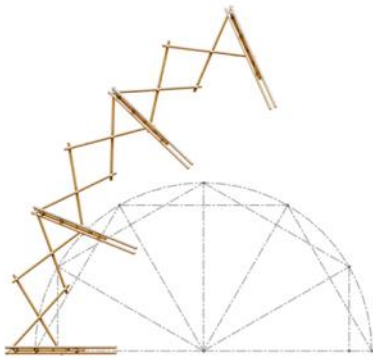
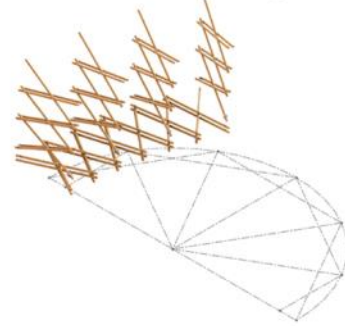
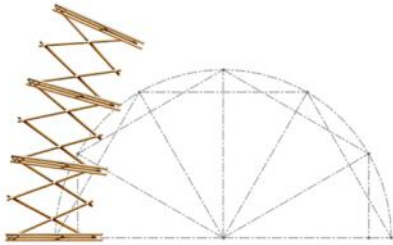
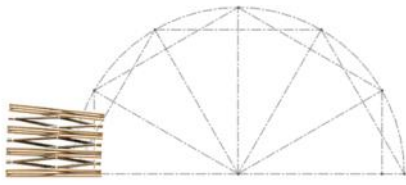
La figura 8.1 expone una secuencia de imágenes en planta y axonometría del proceso de despliegue de medio domo configurado a partir del hexágono, geometría de arcos de medio punto y eliminación de semiarcos de forma intercalada (figura 7.19). Se representa básicamente la simulación del movimiento de despliegue, resultante en el programa SolidWorks® [135], donde se introduce la totalidad de las barras como componentes articulados entre sí.

La simulación permite observar que el recorrido y proceso de despliegue de las tijeras del suelo, describe una curvatura de radio variable generando una extensión del conjunto fuera del diámetro determinado por la geometría base y la cantidad de módulos de tijeras enlazados, como ya se ha descrito en capítulos anteriores (ver capítulos 3 y 5).

En la práctica, el sistema estructural es viable y funcional si se cuenta con el área suficiente en planta para realizar el despliegue, es una aplicación que aunque en este caso no cuenta con una tarima propia de la estructura puede ejercer de pabellón a modo de limitar un espacio con la posibilidad de cubrirlo o no. Su representación e implementación se realiza a mayor detalle con la construcción de un prototipo a escala que resuelve los detalles de conexión entre las tijeras del suelo y las tijeras de los semiarcos (ver capítulo 11).

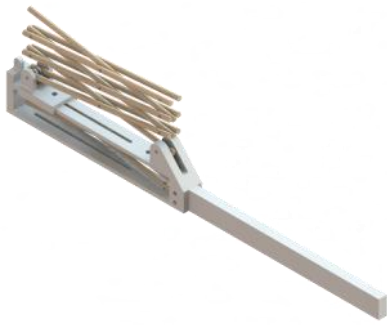
Pero el principal interés de este capítulo, radica en incorporar una plataforma a modo de tarima desplegable compatible con la estructura y el proceso de despliegue STT del domo desplegable.

Figura 8.1 Siguiendo página.
Proceso de despliegue en planta y axonometría de medio domo.
Relación tijeras de suelo y semiarcos.
Simulación SolidWorks® [135].
Fuente: Elaboración del autor



Planta

Axonometría



Para cumplir con este fin, se propone un soporte que contemple la conexión de los semiarcos correlacionado con la tijeras del suelo, que sirva de apoyo a la plataforma plegable y a los semiarcos en todas las etapas de despliegue (figura 8.2).

8.2 Soporte semiarcos

El diseño propuesto corresponde a un soporte tipo viga-riel compuesto por tres componentes (figura 8.3).



1. Soporte-riel: Es la parte que corresponde al elemento de apoyo de los semiarcos en las diferentes posiciones de despliegue, la longitud mínima de este componente debe corresponder a la distancia que describe un semiarco en posición plegada (figura 8.2).

El soporte-riel incorpora en un extremo, los agujeros que a través de pasadores, permiten el punto de rotación de los tramos cortos del primer módulo de tijera del semiarco, y sobre ese mismo punto, en el plano vertical, se sobrepone el eje para la articulación de los tramos cortos correspondientes a las tijeras del suelo (figura 8.2).

Para obtener un proceso de despliegue correlacionado tanto en altura como en planta, el soporte incorpora un riel que recibe un componente móvil que articula el tramo faltante de las tijeras del suelo y del semiarco, obteniendo un pliegue sin interferencias (figura 8.2 y 8.3).



Además el diseño del soporte-riel se diseña como una estructura aligerada que permite alojar en una cavidad los módulos de tijeras del suelo en las diferentes etapas de despliegue, evitando posibles interferencias con el terreno (figuras 8.2 a 8.4)

2. Soporte móvil: Es la pieza que articula el extremo faltante del semiarco, el cual se desplaza sobre el soporte-riel y al mismo tiempo articula los tramos largos de las tijeras del suelo. Este componente se diseña como un pequeño carro deslizante que incorpora, las pletinas adecuadas para articular el semiarco e incluye el agujero que recibe el perno o pasador que articula perpendicularmente el tramo faltante de las tijeras del semiarco con las tijeras de suelo (figuras 8.2 a 8.4).

Figura 8.2 Soporte para semiarcos y plataforma desplegable. Proceso de despliegue
Simulación SolidWorks® [135].
Fuente: Elaboración del autor

3. Viga: Es el elemento estructural que soporta la plataforma plegable, se diseña como un elemento desmontable alineado al soporte-riel, ya sea para facilitar su transporte, proyección de una estructura adaptable a diferentes tipos de plataformas o simplemente considerar un recinto cubierto que no requiere de la plataforma plegable.

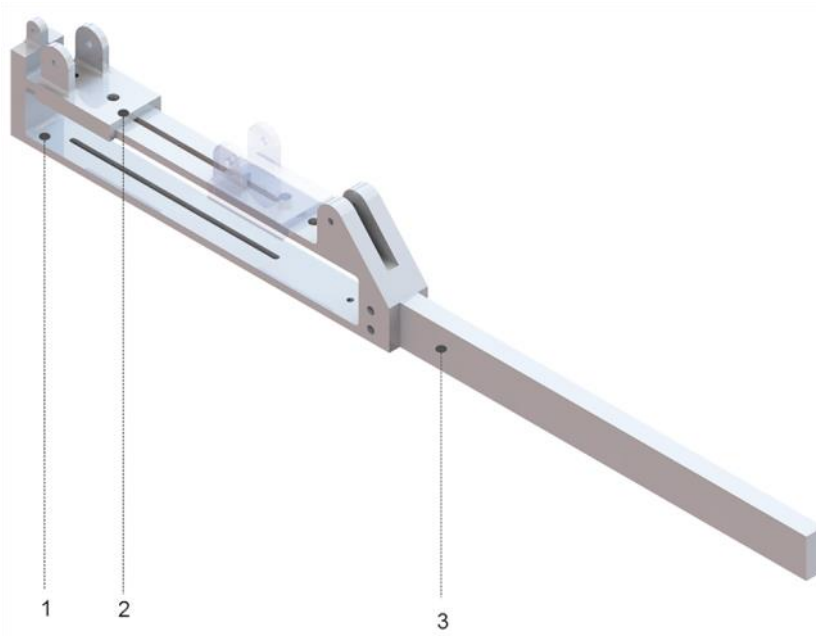


Figura 8.3 Axonometría componentes soporte semiarcos y plataforma plegable

1.Soporte-riel

2.Soporte móvil

3.Viga

Fuente: Elaboración del autor

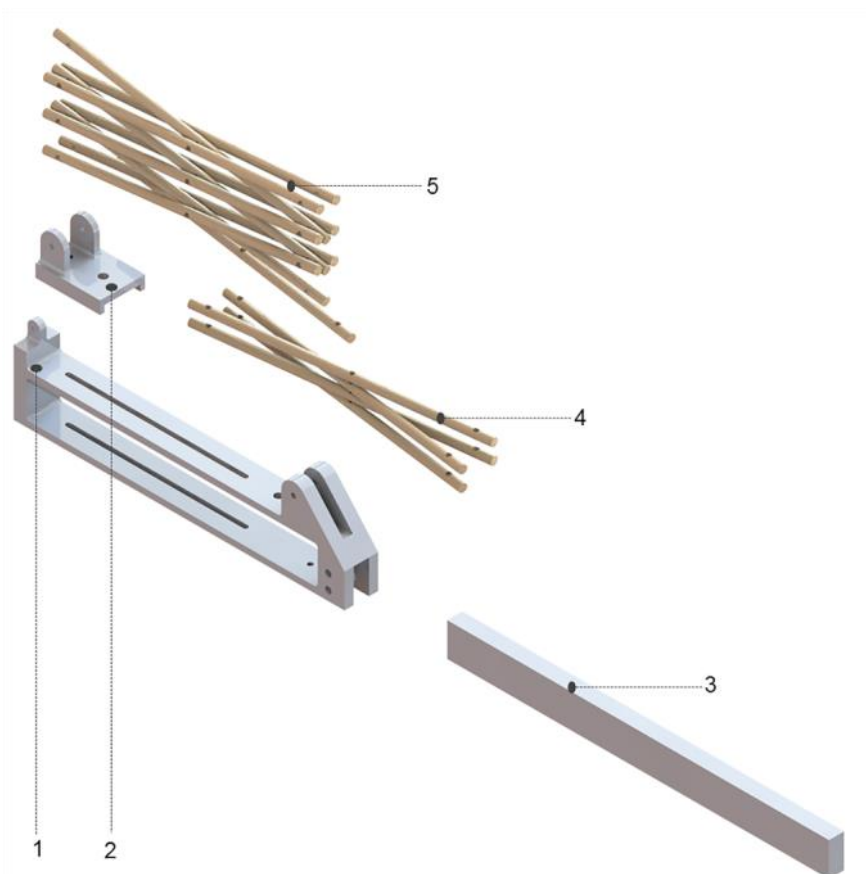


Figura 8.4 Axonometría explosionada componentes soporte semiarcos y plataforma plegable

1.Soporte-riel

2.Soporte móvil

3.Viga

4. Tijeras suelo

5. Tijeras semiarco

Fuente: Elaboración del autor

Definido el soporte, se analiza el proceso de despliegue del domo al incluir el nuevo componente. La figura 8.5 representa la secuencia del despliegue específico, donde se observa que el área necesaria para realizar el proceso de despliegue se aumenta, es decir, el despliegue describe la misma curvatura variable pero tiene mayor área de ocupación, ya que se suma, al diámetro exterior del semiarco, la longitud del soporte-riel.

Ahora, al proyectar en una sección del domo, supuestos paneles modulares sobre las vigas de forma trapezoidal, para que conformen una tarima plegable, se observa durante las secuencias de apertura de las tijeras del suelo, que en cada etapa de despliegue se configuran trapezoides cambiantes, donde los lados que coinciden sobre las vigas y las tijeras mantienen una longitud constante, pero el lado que coincide con el centro del polígono y las diagonales del trapecio son longitudes variables durante el despliegue (figura 8.5).

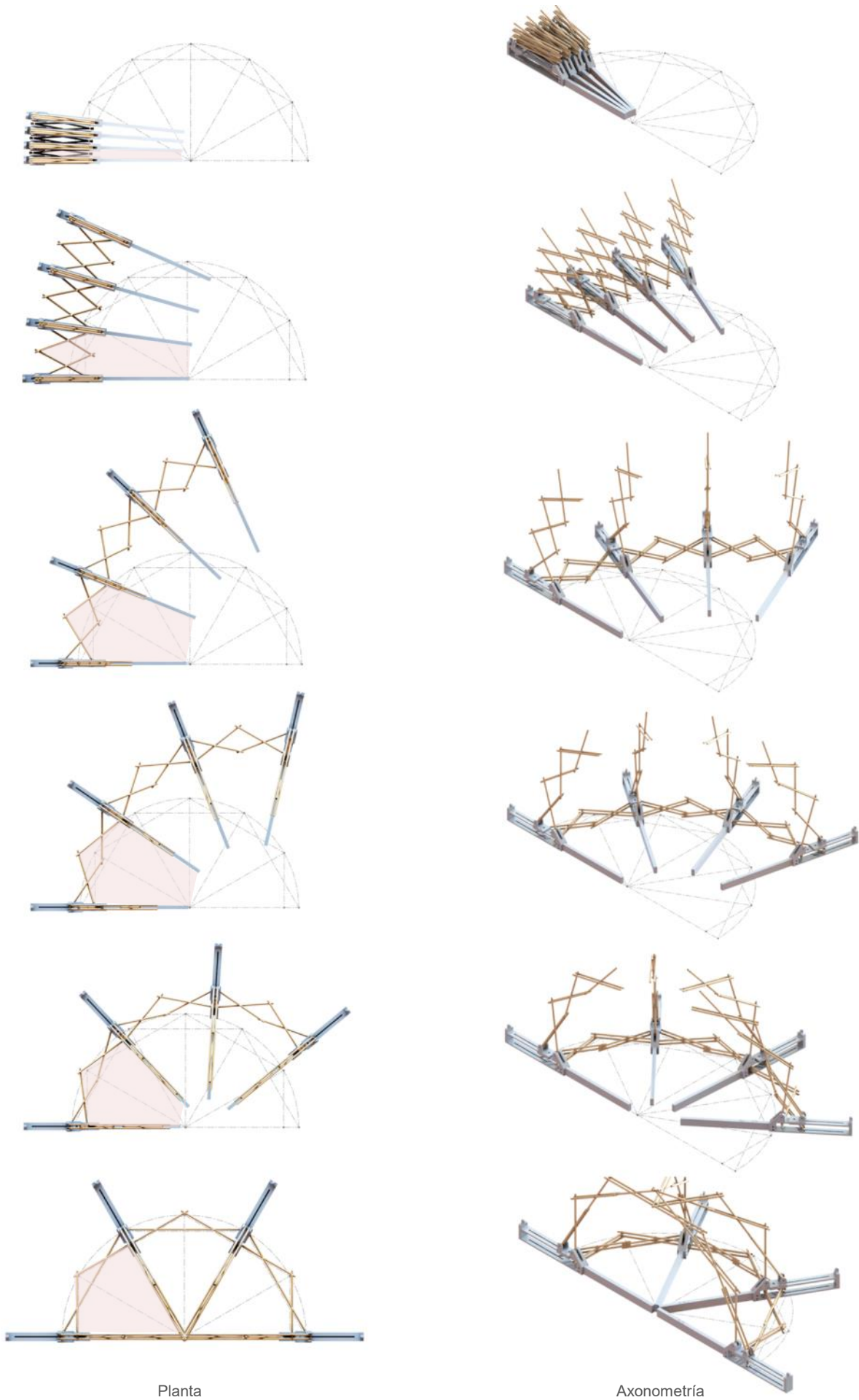
Una determinante que dificulta la definición de los patrones en la plataforma plegable, ya que las posibles soluciones llevarían a proyectar mecanismos telescópicos o materiales expansibles en los paneles, para dar respuesta a todas las etapas de despliegue.

Una alternativa más sencilla para proyectar paneles modulares, es modificar el recorrido de despliegue de las tijeras del suelo, sin alterar la correlación de despliegue simultáneo entre semiarcos y tijeras del suelo.

En este momento el recorrido del despliegue de toda la estructura, está definido como una curvatura de radio variable, característico de la agrupación de tijeras con articulación excéntrica con barras de la misma longitud, enlazadas de tal forma que se unen los tramos cortos con la tijera adyacente direccionados hacia el centro de una circunferencia y tramos largos unidos con la tijera adyacente direccionados hacia el exterior de una circunferencia (ver capítulo 3).

Se propone de esta manera, obtener un despliegue en las tijeras del suelo que describa una curvatura de radio constante, con el objetivo de proyectar paneles modulares que mantengan sus dimensiones en todas las etapas de despliegue, que logren un proceso de plegado a través de mecanismos simples tipo bisagra y en coherencia con el movimiento de la estructura total del domo.

Figura 8.5 Siguiente página.
Proceso de despliegue en planta y axonometría de medio domo.
Incluye soporte para los semiarcos y plataforma
Simulación SolidWorks® [135]
Fuente: Elaboración del autor



Planta

Axonometría

8.3 Despliegue con curvatura constante

Para lograr este movimiento de curvatura de radio constante en la agrupación de las tijeras de suelo, en primer lugar se debe disponer de un enlace tipo bisagra entre vigas adyacentes, localizado en los extremos de las mismas. Esta conexión define el centro de la geometría a desplegar y se obtiene un movimiento tipo abanico, es decir un despliegue con curvatura constante (figura 8.6 a 8.8).

Para el caso de estudio, la decisión de eliminar semiarcos de manera intercalada, establece que la disposición de los semiarcos resultantes suceda cada dos tijeras de suelo, esto permite explorar varias alternativas de conexión entre barras como soluciones para obtener el despliegue esperado.

Lo que se busca, es que la agrupación de tijeras del suelo, mantengan la relación de apertura simultánea con los semiarcos y permita un proceso de despliegue con curvatura constante, para ello es necesario eliminar alguna articulación entre las barras de las tijeras del suelo que elimine la restricción de curvatura variable en el despliegue de la misma.

Se presentan tres posibilidades:

La primera representada en la figura 8.6, es una propuesta que desarticula el enlace de los tramos cortos entre módulos de tijeras adyacentes, esta desarticulación solo sucede entre módulos de tijeras donde no coinciden con un semiarco, la secuencia total de despliegue se expone en la figura 8.9.

La segunda posibilidad, correspondiente a la figura 8.7, se procede a desarticular el enlace de los tramos largos entre módulos de tijeras adyacentes, y de igual manera que el caso anterior, esta desarticulación solo sucede entre módulos de tijeras donde no coinciden con un semiarco, la secuencia total de despliegue se expone en la figura 8.11.

Y la tercera posibilidad (figura 8.8), opta por desconectar las articulaciones centrales en los módulos de tijera, la secuencia total de despliegue para este caso se expone en la figura 8.12.

A continuación, se analiza con más detalle el comportamiento del despliegue de cada propuesta con las imágenes específicas que describen las diferentes posiciones de despliegue en cada caso.

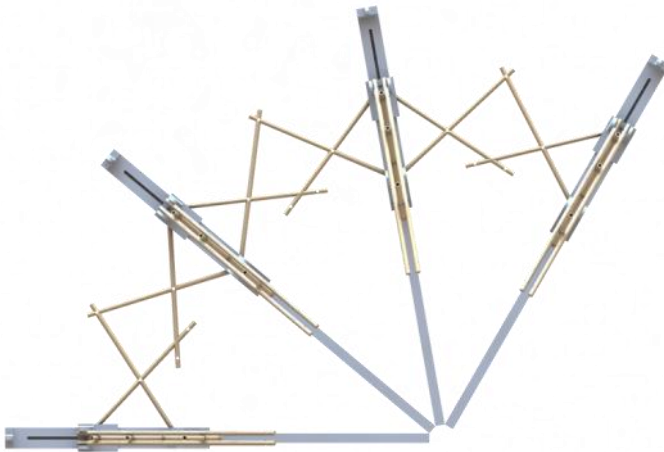


Figura 8.6 Agrupación de tijeras de suelo. Proceso de despliegue con curvatura constante. Desarticulación de los tramos cortos entre tijeras adyacentes, donde no coinciden con un semiarco. Simulación SolidWorks® [135]
Fuente: Elaboración del autor



Figura 8.7 Agrupación de tijeras de suelo. Proceso de despliegue con curvatura constante. Desarticulación de los tramos largos entre tijeras adyacentes, donde no coinciden con un semiarco. Simulación SolidWorks® [135]
Fuente: Elaboración del autor

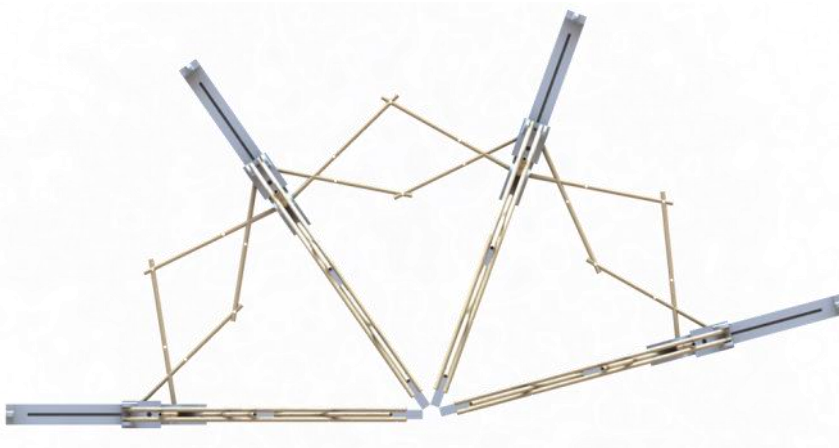


Figura 8.8 Agrupación de tijeras de suelo. Proceso de despliegue con curvatura constante. Desarticulación central entre módulos de tijeras. Simulación SolidWorks® [135]
Fuente: Elaboración del autor

Primero se ha de aclarar que el principio del despliegue simultáneo entre las tijeras del suelo y las tijeras de los semiarcos, radica en que se utilizan los mismos módulos de tijeras, con las mismas características geométricas, las mismas longitudes y los mismos puntos de articulación, generados a partir del método geométrico propuesto en la investigación.

Pero, para obtener el despliegue con curvatura constante es necesario eliminar alguna conexión entre barras, que modifique el recorrido de curvatura variable y habilite el desplazamiento de las vigas como radios abatibles.

Si se observa con atención el proceso de apertura del caso de estudio que se analiza en el presente apartado (figura 8.5), la relación de despliegue simultáneo sucede en la situación donde coincide la articulación de un módulo de tijera de suelo enlazado perpendicularmente con el primer módulo de tijera perteneciente al semiarco, concretamente donde se proponen los soportes-riel. Por ende, estas articulaciones no se deben de alterar ya que controlan en principio del despliegue que se quiere obtener.

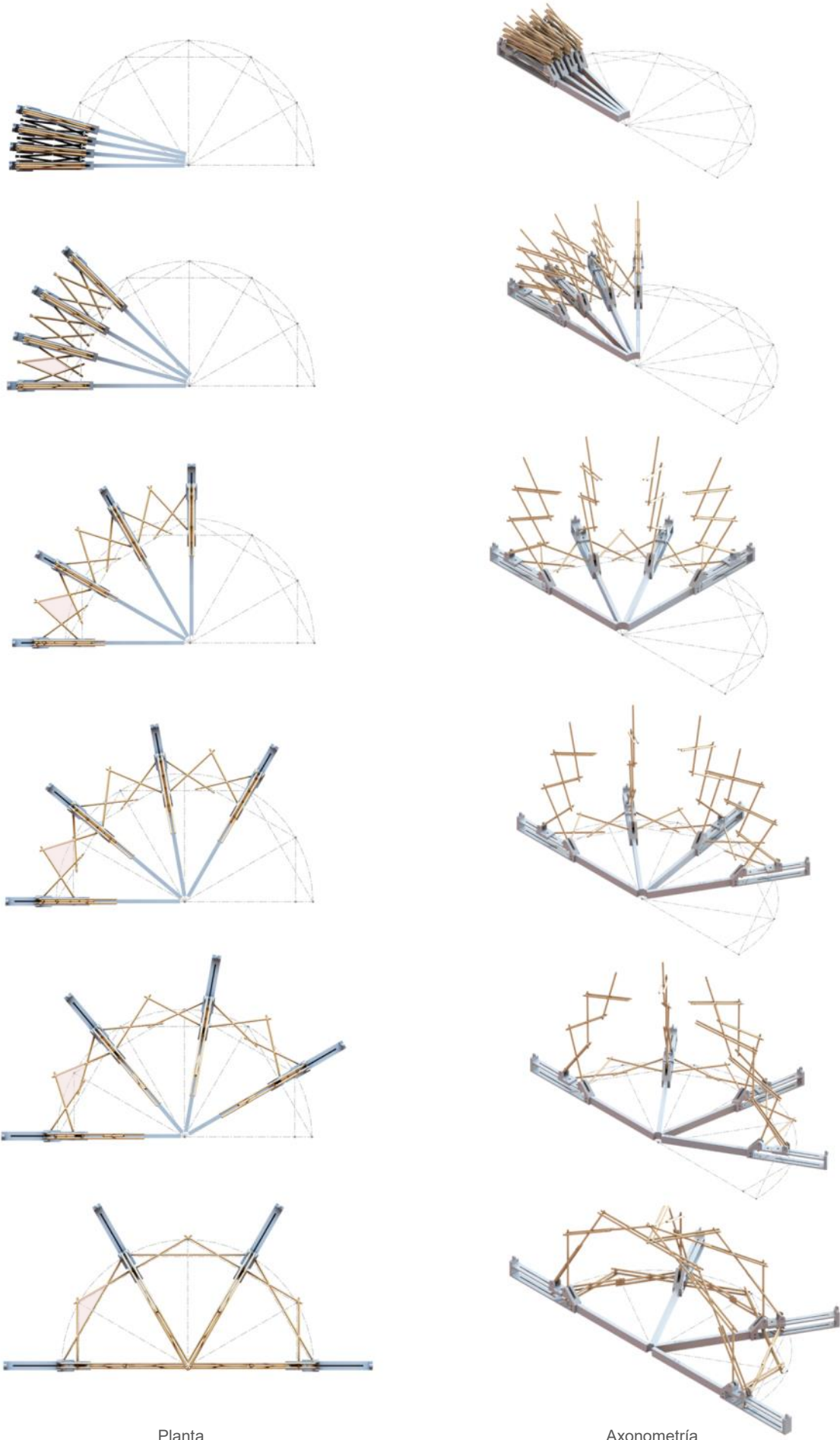
Queda por descartar, las conexiones entre módulos de tijeras adyacentes que no se relacionan con un semiarco y las articulaciones centrales.

8.3.1 Desarticulación tramos cortos entre tijeras adyacentes

Como primera opción se propone la desarticulación de los tramos cortos entre módulos de tijeras adyacentes, en los enlaces donde se descartaron semiarcos. Se observa en la figura 8.9, que esta solución permite un proceso de despliegue del domo sin incompatibilidades y describiendo un recorrido con curvatura constante, una alternativa que demuestra ser viable para realizarla constructivamente.

Lo que sucede en la agrupación de tijeras del suelo, se visualiza en el espacio geométrico, que se forma entre módulos de tijeras adyacentes, donde se realiza la desarticulación. Se observa en las primeras etapas de despliegue, la transformación de un trapecioide simétrico, (lados continuos iguales, pero no paralelos), hasta completar la etapa final, donde el trapecioide se convierte en un triángulo isósceles, coincidiendo de forma colineal dos de sus lados, correspondientes a los tramos cortos de los módulos de la tijeras, estableciendo la posición final de despliegue en concordancia con la geometría base del diseño del domo (figura 8.9).

Figura 8.9 Siguiente página.
Proceso de despliegue en planta y axonometría de medio domo.
Proceso de despliegue con curvatura constante.
Desarticulación de los tramos cortos
Simulación SolidWorks® [135].
Fuente: Elaboración del autor



Planta

Axonometría



Figura 8.10 Mecanismo de riel en los tramos cortos de las tijeras de suelo par obtener el despliegue con curvatura constante
Fuente: Elaboración del autor

Figura 8.11 Siguiente página. Proceso de despliegue con curvatura constante. Desarticulación de los tramos largos
Simulación SolidWorks® [135]
Fuente: Elaboración del autor



La viabilidad constructiva y mecánica para desarrollar esta solución, lleva a proyectar en los tramos cortos de las tijeras, la implementación de un sistema tipo riel o una guía de desplazamiento en las barras, con la longitud necesaria para que se realice el despliegue sin incompatibilidades, que incluya algún tipo de pasador que enlace las barras, pero al mismo tiempo permita el proceso de despliegue sin dificultades y preservando el recorrido de curvatura con un radio constante (figura 8.10).

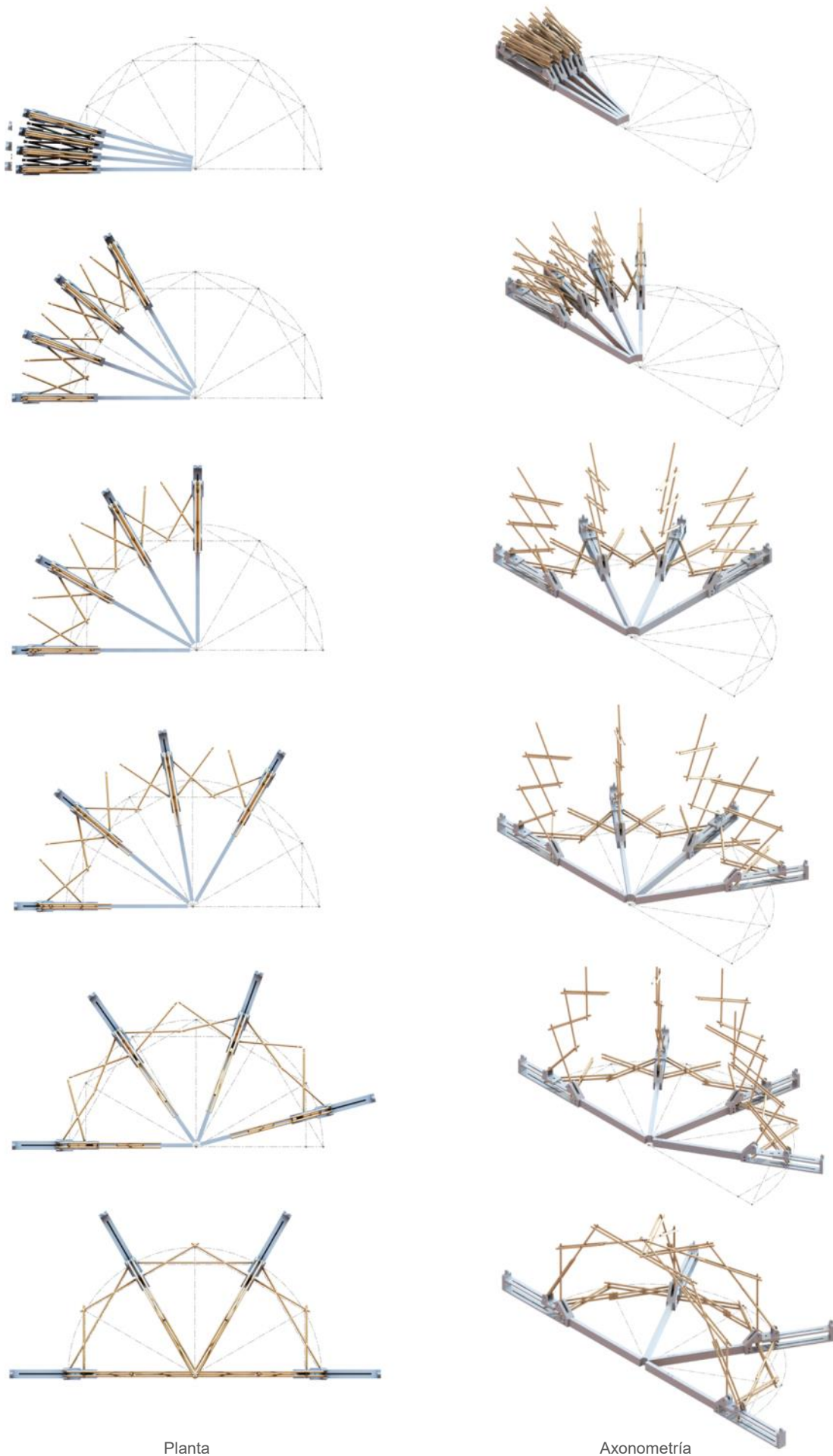
Y como opción más simple, aquella donde los elementos están por libre, sin ninguna conexión entre barras en el punto de desarticulación propuesto en las etapas iniciales de despliegue y una vez se posicionen en la etapa final de despliegue, por medio de un pasador se bloquee el movimiento y se establezca la estructura en su geometría final.

8.3.2 Desarticulación tramos largos entre tijeras adyacentes

Al igual que el caso anterior, la desarticulación sucede en el enlace entre módulos de tijeras adyacentes que no coinciden con un semiarco, pero para esta solución se opta por desarticular los tramos largos entre módulos de tijeras.

Según la figura 8.11 para conservar la mismas longitudes de barras en toda la estructura, es necesario que en las primeras etapas de despliegue los tramos largos se mantengan totalmente desconectados hasta llegar a la posición final de despliegue, donde se configura el triángulo isósceles entre módulos de tijeras adyacentes, llegada a esta posición es necesario incorporar un pasador para juntar los tramos largos y de esta manera bloquear y asegurar la estructura en su estado final de despliegue.

Esta solución no requiere de mecanismos adicionales, y al estar la articulación posicionada hacia el perímetro exterior de la estructura, puede que su implementación y sistema de bloqueo sea más sencillo que en el anterior caso, al tener mejor accesibilidad a este punto.



Planta

Axonometría

8.3.1 Desarticulación central en módulos de tijeras

Al proceder a desconectar la articulación central en cada módulo de tijera, se elimina las correlaciones de despliegue simultáneo.

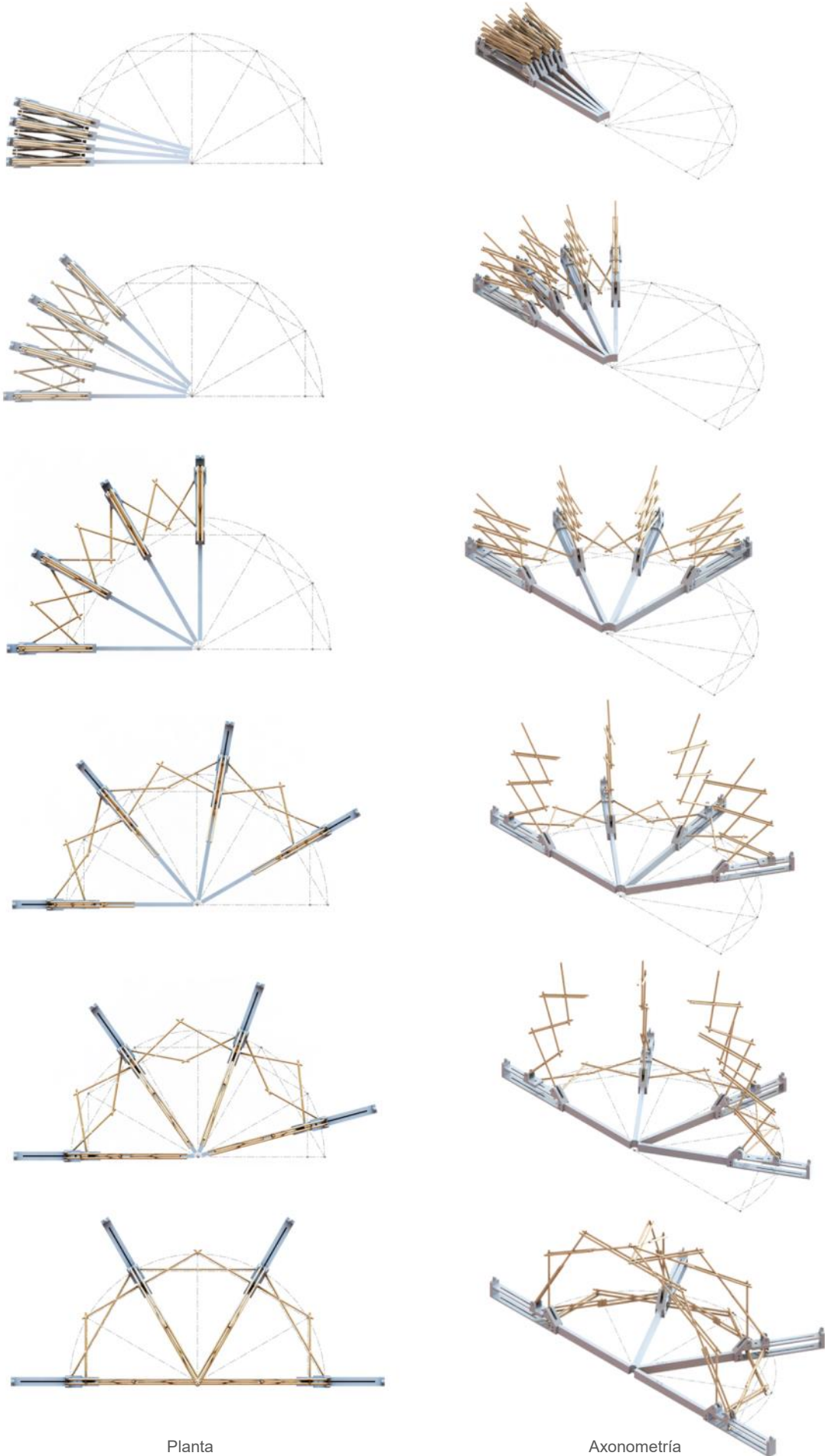
Sucede que al eliminar esta conexión, que define en sí, a un módulo de tijera, se describe que durante las primeras etapas de despliegue de la estructura, el ángulo de apertura de las tijeras de suelo que se correlaciona directamente con el ángulo de apertura de los semiarcos de manera perpendicular en los soportes, no mantiene el mismo grado de apertura entre componentes, el despliegue no es simultáneo.

Las tijeras del suelo, se comportan como barras independientes articuladas solo en los extremos, las cuales se van posicionando poco a poco hasta llegar a la etapa final de despliegue y definir la geometría en planta. Durante esas primeras etapas los semiarcos no se elevan de manera simultánea.

En las últimas etapas de despliegue donde la geometría y el recorrido radial de las vigas, obliga a las barras del suelo a colocarse en su posición y arrastrar el soporte móvil de los semiarcos, se obtiene un despliegue parcial de los mismos, pero para obtener la forma definitiva del domo, es necesario aplicar manualmente la fuerza adicional sobre los semiarcos para que alcance su posición final de despliegue.

Para efectos constructivos, el resultado del despliegue configura el domo igualmente y con esta alternativa se tendrá que contemplar adicionalmente, el ajuste final de los semiarcos a su estado final de despliegue, una circunstancia que para la investigación no es la ideal, pero es factible al demostrar que tiene viabilidad constructiva. Las tijeras de suelo no se comportan como módulos de tijeras, aunque si que colaboran al ejercer la fuerza inicial para lograr un despliegue previo de los semiarcos.

Figura 8.12 Siguiente página.
Proceso de despliegue en planta
y axonometría de medio domo.
Proceso de despliegue con
curvatura constante.
Desarticulación central de los
módulos de tijera del suelo.
Simulación SolidWorks® [135]
Fuente: Elaboración del autor



Planta

Axonometría

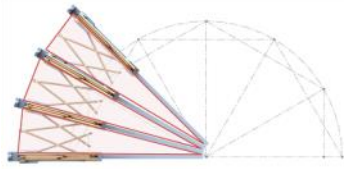


Figura 8.13 Geometría plegadura de suelo a partir de triángulos equiláteros
Fuente: Elaboración del autor

8.4 Geometría plegadura.

Se define como plataforma plegable el conjunto de paneles, elementos y mecanismos correlacionado con la geometría y el despliegue de un domo específico. Para este apartado, la plegadura sólo se refiere a la forma y geometría del entarimado, compuesto por elementos modulares para obtener un despliegue simultáneo entre estructura y plataforma.

La geometría de la plegadura es definida gracias al recorrido del despliegue de la estructura del domo, que ahora describe una curvatura de radio constante, de esta manera los soportes y las vigas se posicionan radialmente y permiten trazar en la posición final de despliegue, un primer esquema geométrico para la forma y los patrones que definirá los paneles que conforman la plegadura.

Sobre la geometría de medio domo configurado a partir del hexágono, se trazan entre los espacios de las vigas posicionadas radialmente, triángulos equiláteros que abarcan hasta cubrir la agrupación de tijeras de suelo. Fijando el interés sobre estos triángulos, se observa que a medida que se pliega la estructura, cambia la longitud del lado orientado hacia el perímetro de la base, transformando los triángulos equiláteros en triángulos isósceles (figura 8.13).

Entendiendo que los triángulos equiláteros corresponden a la geometría de la plegadura como una superficie plana, cuando esta se encuentra en su posición final de despliegue, se define la bisectriz de cada triángulo coincidente con el eje radial correspondiente, para obtener de esta forma dos triángulos rectángulos simétricos que se proyectan como dos paneles abisagrados entre vigas (figura 8.14).

Para el caso de estudio específico, la plegadura en principio se compone entonces de seis triángulos rectángulos.

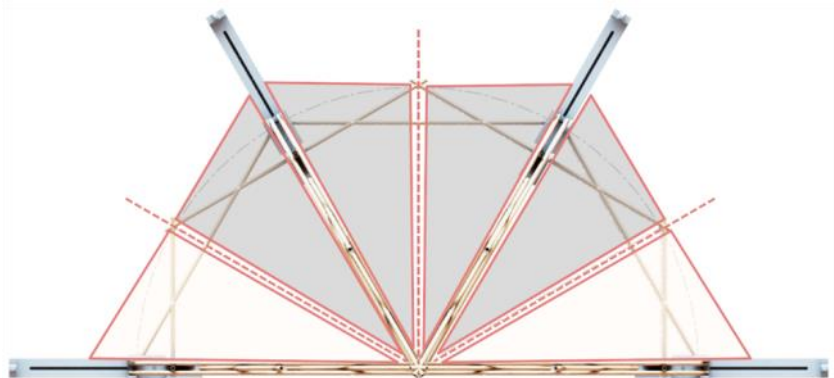


Figura 8.14 Geometría plegadura de suelo a partir de triángulos rectángulos
Fuente: Elaboración del autor

8.4.1 Estudio del movimiento

Para incorporar la plegadura al movimiento de despliegue de la estructura y pueda plegarse de manera eficiente con todo el conjunto, es necesario comprender el movimiento que realizan los paneles en las diferentes etapas de despliegue. El objetivo de este apartado, basado en los estudios y propuestas desarrolladas por Tachi (2011) (ver apartado 2.3.1), es comprender los puntos de rotación de los paneles para proponer el mecanismo ideal que complete el despliegue simultáneo entre estructura y plataforma plegable.

La figura 8.15 representa un esquema de los puntos de pivote que suceden en una sección del domo durante diferentes etapas de despliegue, implementando dos triángulos rectángulos como dos paneles abisagrados. La imagen esquemática permite proyectar el posicionamiento y tipologías de bisagra a implementar para dar respuesta a estos movimientos desde la posición total de despliegue hasta el plegado de la estructura.

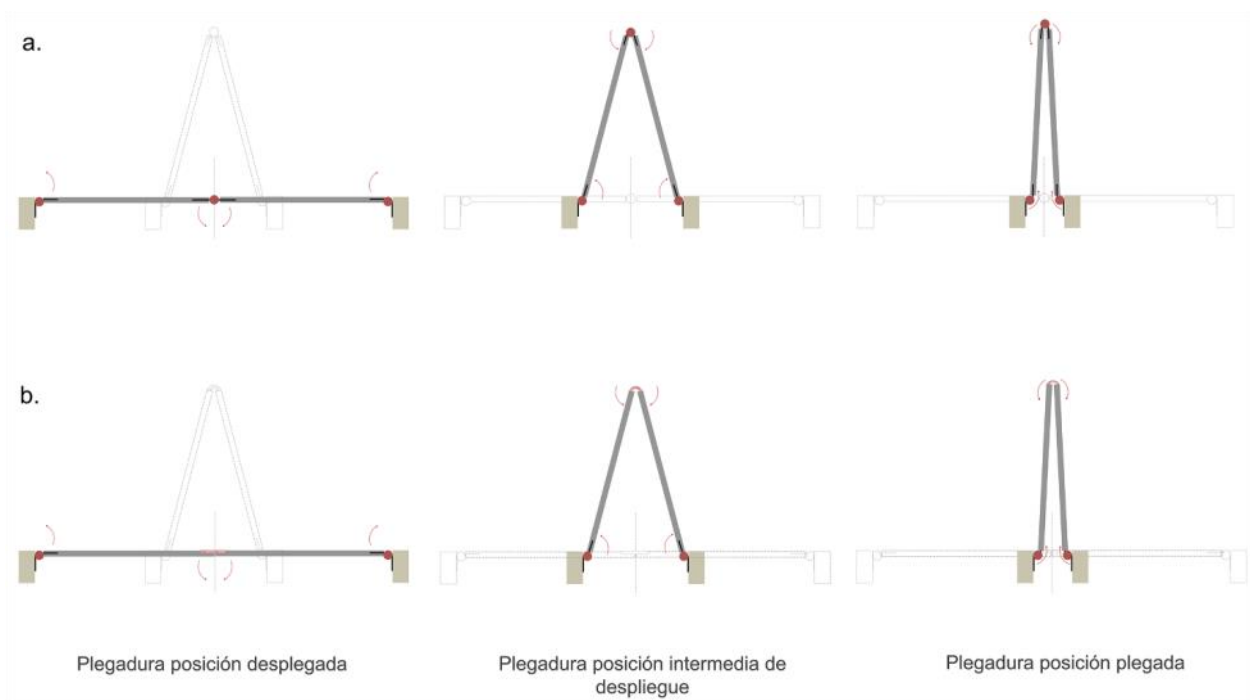


Figura 8.15 Esquema de los puntos de pivote entre paneles y estructura de suelo.

- a. Bisagra simple entre viga-panel y panel-panel
- b. Bisagra simple entre viga-panel y bisagra flexible entre panel-panel

Fuente: Elaboración del autor

Se observa que existen tres puntos de pivote, el pivote central que relaciona los dos paneles sobre la bisectriz del triángulo equilátero y los pivotes laterales, que relaciona el panel con la viga adyacente. Este último describe un giro del panel con respecto a la viga, un mecanismo sencillo de dos componentes que giran alrededor de un eje, el cual es posible resolver con varias alternativas de bisagras que existen en el mercado.

Pero el pivote central, aparte de tener el giro entre los dos paneles adyacentes, está sometido adicionalmente a la apertura radial de la estructura del suelo que genera una separación variable, pero paralela entre aristas de los paneles, lo que implica proponer un tipo de bisagra flexible sobre la bisectriz que responda a las solicitaciones de pliegue en este punto (ver apartado 2.3, figura 2.124).

Las posibles soluciones técnicas estudiadas para el caso específico de conexión panel-viga se representan en la figura 8.16, donde se exponen algunas posibilidades de bisagras industriales de catálogo, que responden al tipo de rotación necesaria para obtener un acertado proceso del pliegue y despliegue de los paneles en relación con la estructura de soporte.

Su implementación depende de la posición y apoyo de los paneles sobre las vigas; y la cantidad de unidades necesarias obedece a la capacidad portante que indique las especificaciones técnicas dadas por el fabricante.

Para el presente apartado no se enfatiza en los cálculos y comprobación estructural referente a las bisagras, se presenta de manera explicativa las posibles soluciones técnicas que son compatibles con movimiento de la plegadura en relación con las vigas de soporte, evitando generar componentes que sobresalgan que provoquen interferencias, buscando obtener una superficie plana, un entarimado transitable.

Una primera alternativa refiere a la utilización de bisagras ocultas incrustadas, con apertura de 180° . Esta solución posiciona al panel articulado a un costado de la viga mediante la bisagra, una solución limpia que permite la rotación del panel sin interferencias (figura 8.16 a).

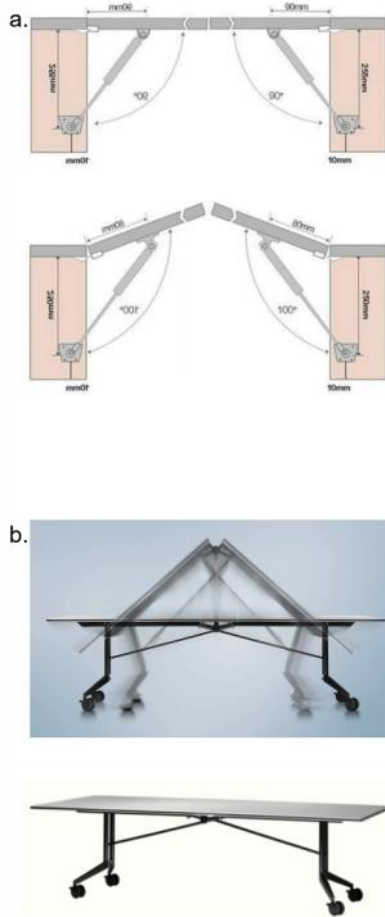


Figura 8.17

a. Barras de soporte hidráulico
b. Mesa plegable para conferencias

Fuente:

a. www.amazon.es/nulala-hidr%C3%A1ulico-armarios-Elevador-neum%C3%A1tico/dp/B07NSDPXHF

b. www.wilkhahn.com/en/products/conference-tables/confair-folding-table/
Recuperado [15/05/2020]

Aunque la tercera opción describe cierta dificultad en su montaje, se considera que es la mejor alternativa que se adapta a los requerimientos de movimiento entre viga y panel.

Ahora, para garantizar la seguridad y tránsito del entarimado en su posición final de despliegue, se ha de considerar el apoyo de los paneles en las juntas que se posicionan sobre la bisectriz trazada, en este punto el panel se comporta como un voladizo y es necesario implementar algún tipo de soporte que mantenga la plegadura plana durante su utilización (figura 8.17).

Como alternativas en el mercado, las posibles soluciones se basan en el principio de las barras de soporte hidráulico o las barras implementadas para rigidizar el sistema de mesas plegables, cualquiera de estas soluciones o similar son viables, el objetivo de su implementación es lograr disminuir los esfuerzos de flexión del panel en esta articulación (figura 8.18).

La figura 8.18 representa la simulación del despliegue, sólo de la plataforma plegable, incorporando las conexiones tipo bisagra con la primera geometría de paneles propuesta, estableciendo que las líneas de las bisectrices se eleven y conformen las crestas de la plegadura y las aristas paralelas a las vigas, conformen los valles de la plegadura.

La secuencia de despliegue describe un proceso aparentemente correcto entre paneles, pero la longitud de los mismos es incompatible con la estructura en todas las etapas de despliegue, generando superposiciones con los soportes-viga y seguramente con los semiarcos, que no se representan en esta imagen. Debido a esta circunstancia es necesario fijar como longitud máxima de los paneles el largo correspondiente a la viga.

El área a cubrir con la plegadura corresponde entonces, al perímetro definido desde el punto de articulación de los tramos cortos, hacia el centro del polígono base (figura 8.19).

En el replanteamiento de los paneles que se observa en la figura 8.19, se representa una secuencia de despliegue acertada, tanto en posición de pliegue como en la etapa final de despliegue, dejando la estructura de tijeras de suelo a la vista pero formando un entarimado sin interferencias, útil para la representación.

La nueva geometría de la plegadura es definida por un patronaje conformado por triángulos rectángulos, que agrupados en pares forman en la posición final de despliegue, trapecios simétricos entre vigas (figura geométrica definida como un cuadrilátero no regular, cuyos lados contiguos son iguales, donde el primer par de lados es de diferente longitud al segundo par de lados). Adicionalmente la estética de la plegadura se puede modificar redondeado el perímetro exterior de los paneles, pero esto es ya un criterio subjetivo que se puede tomar en cuenta o no, según las determinantes de la fabricación de los paneles.

La definición de la geometría de la plegadura y su movimiento de plegado representada en la figura 8.19, es compatible para el resto de geometrías propuestas en la investigación para domos desplegables, la figura 8.20 representa una galería de imágenes de domos configurados a partir de otros polígonos implementados en el método geométrico propuesto, que incorporan la plegadura en la posición final de despliegue basada en triángulos abisagrados.

El resultado permite identificar patrones de plegado a través de una técnica simple, la identificación de triángulos que surgen de la geometría base implementada, los cuales se proyectan constructivamente a paneles rígidos abisagrados (figura 8.20).

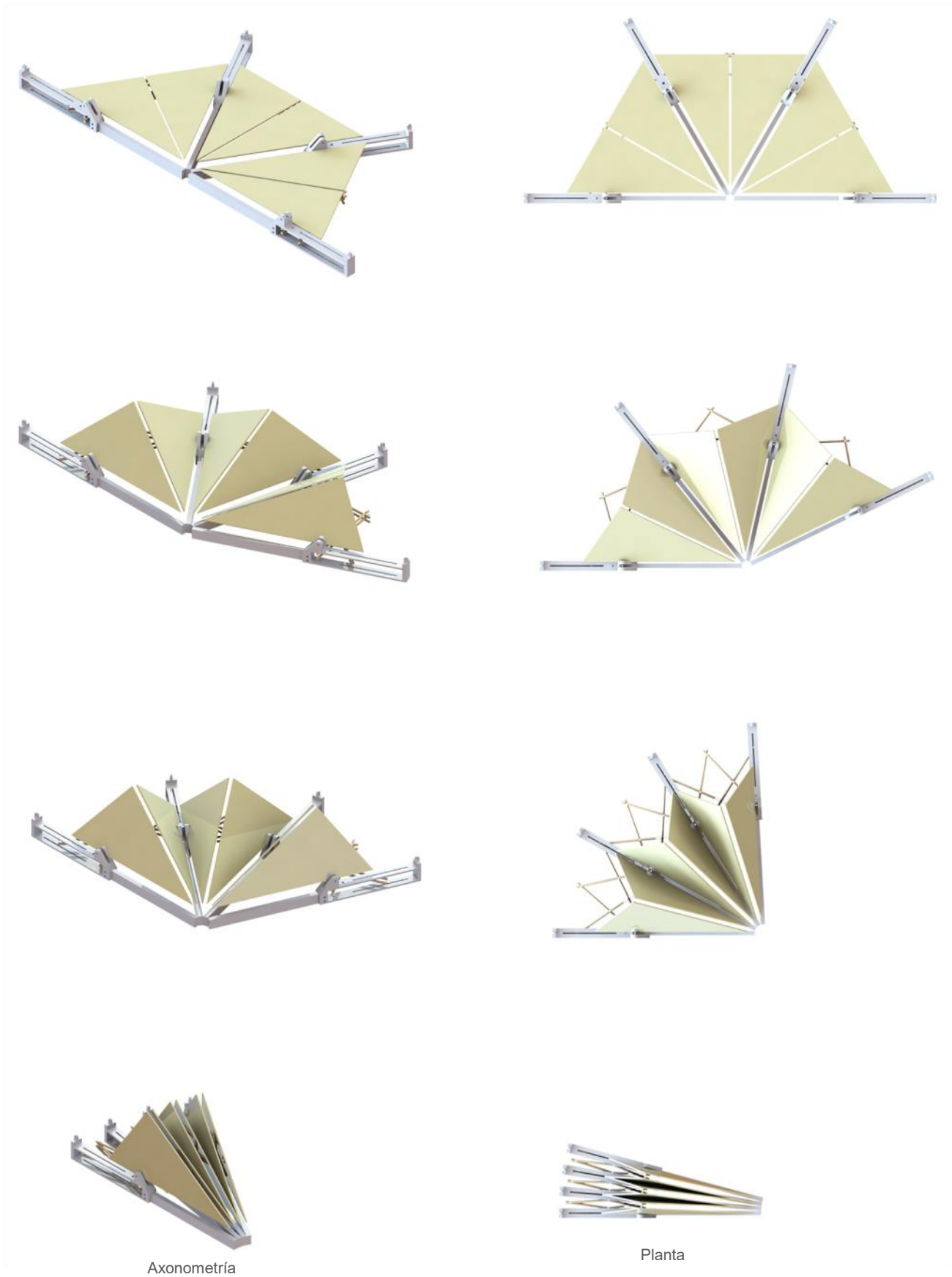


Figura 8.18 Proceso de despliegue plegadura con triángulos rectángulos que cubren las tijeras del suelo
Simulación SolidWorks® [135]. Fuente: Elaboración del autor

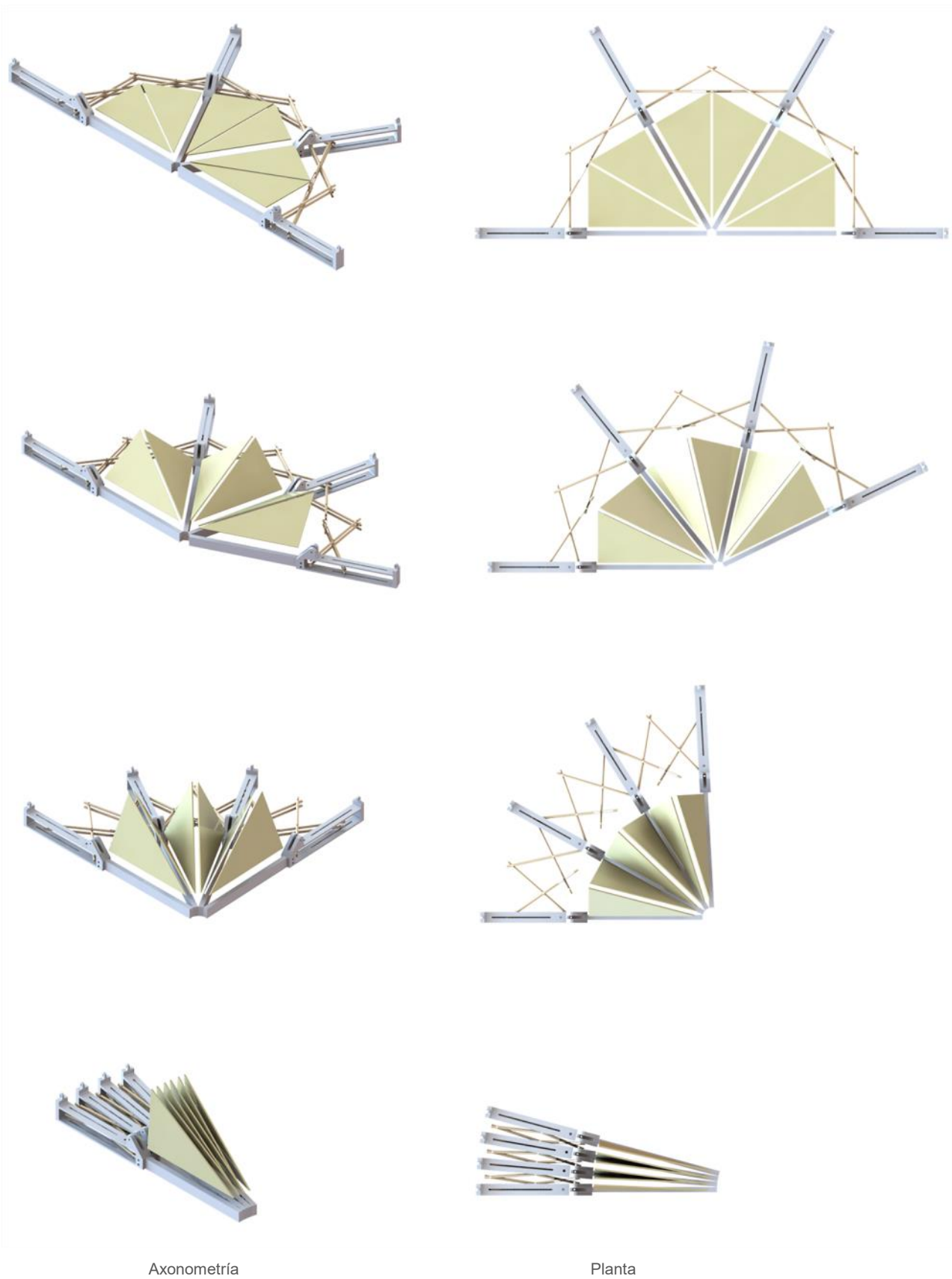


Figura 8.19 Proceso de despliegue plegadura con triángulos rectángulos, Tijeras de suelo a la vista Simulación SolidWorks® [135]. Fuente: Elaboración del autor

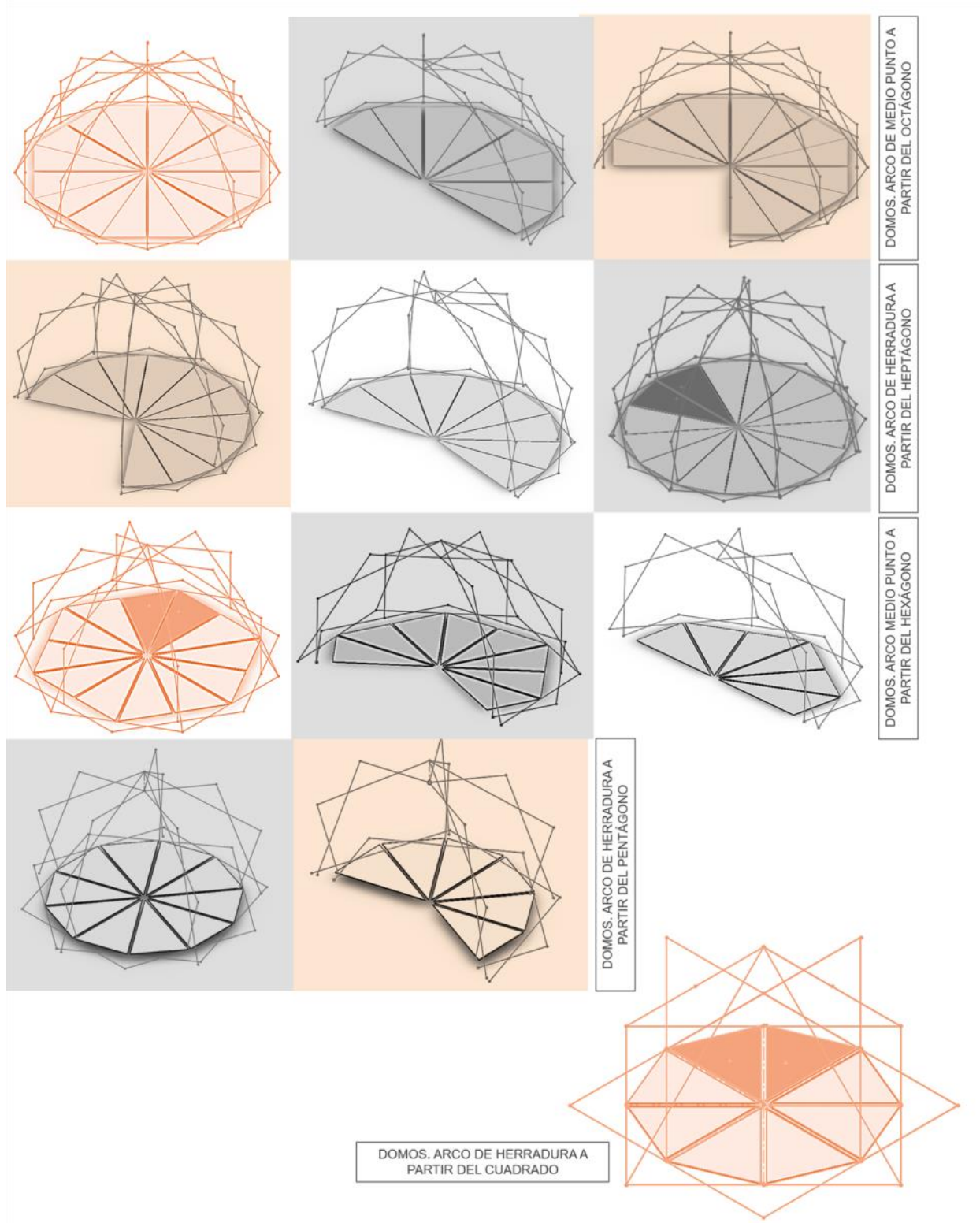


Figura 8.20 Geometrías de plegaduras de suelo en las diferentes posibilidades de domos desplegables configurados a partir del método propuesto. Fuente: Elaboración del autor

Otra formulación de la geometría de patronaje de la plegadura, se retoma del estudio que precede a esta investigación (ver apartado 1.6). La propuesta consiste en generar un entarimado que cubra las tijeras de suelo, incorporando más pliegues y más paneles.

La realización de maquetas físicas junto con la aplicación de conceptos del origami, lleva a materializar un patronaje de la plegadura, algo más complejo que la anterior propuesta, pero viable en su implementación al compaginar con el objetivo del despliegue simultáneo en la estructura del domo.

El patronaje consiste en proyectar un primer par paneles triangulares posicionados a cada lado de los semiarcos que cubra el área de las tijeras de suelo. La particularidad de esta agrupación es su recorrido de pliegue, el cual consiste en una cresta posicionada sobre el eje de las vigas soporte, que se eleva hacia adelante para evitar intersecciones con los semiarcos (figura 8.21).

La geometría total de la plegadura, se complementa con los paneles que se posicionan en medio de las vigas soporte, triángulos del tipo obtusángulo abisagrados entre ellos en su lado más largo, para formar la cresta de plegamiento y articulados a las vigas adyacente donde se generan los valles de la plegadura. Se observa en la figura 8.21 que en posición desplegada se configuran nuevamente trapezoides simétricos,

En la figura 8.22 se representa la simulación de la plegadura con el nuevo patronaje, se requiere modificar el perímetro de los paneles triangulares que cubren las tijeras de suelo, sin afectar la geometría base triangular, para evitar intersecciones con los semiarcos y las vigas soporte. Y se redondea el perímetro exterior del panel para mejorar la estética de la plegadura en posición final de despliegue.

La simulación resulta acertada, se obtiene el despliegue simultáneo favorable y no se presentan intersecciones entre componentes. Constructivamente el volumen de la estructura plegada aumentaría y al aumentar el número de paneles la estructura aumentara de peso, un factor que puede ser utilizado a favor para evitar posibles volcamientos de la estructura. Además se deben considerar las bisagras adicionales para los nuevos paneles, la selección y tipología de bisagra debe responder adecuadamente a los requisitos de movimiento en cada punto.

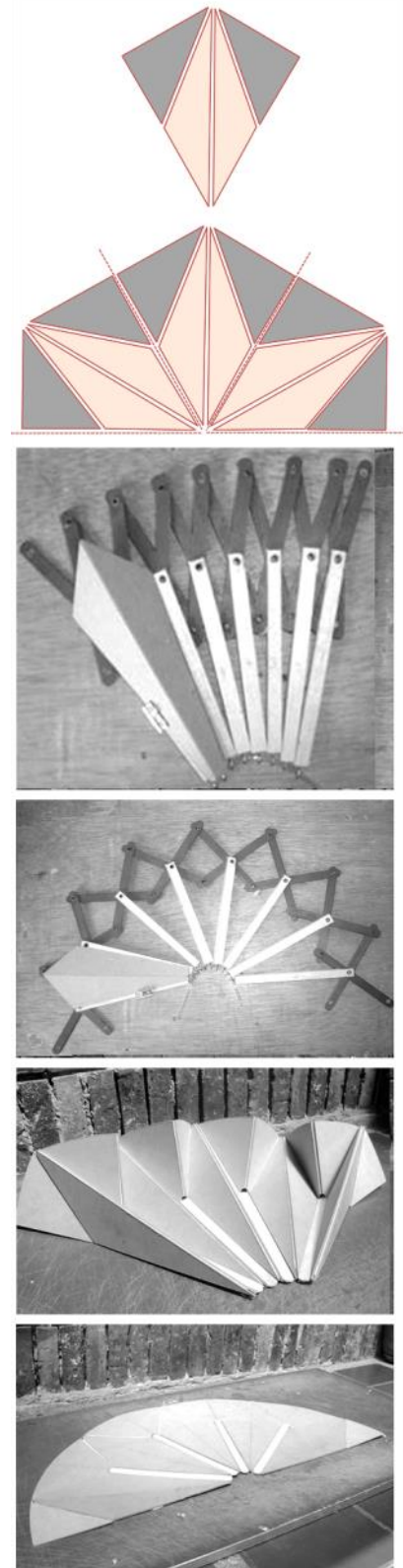


Figura 8.21 Patronaje plegadura de suelo. Trazado geométrico y modelo físico a escala. Incluye más pliegues y paneles.

Fuente: Elaboración del autor

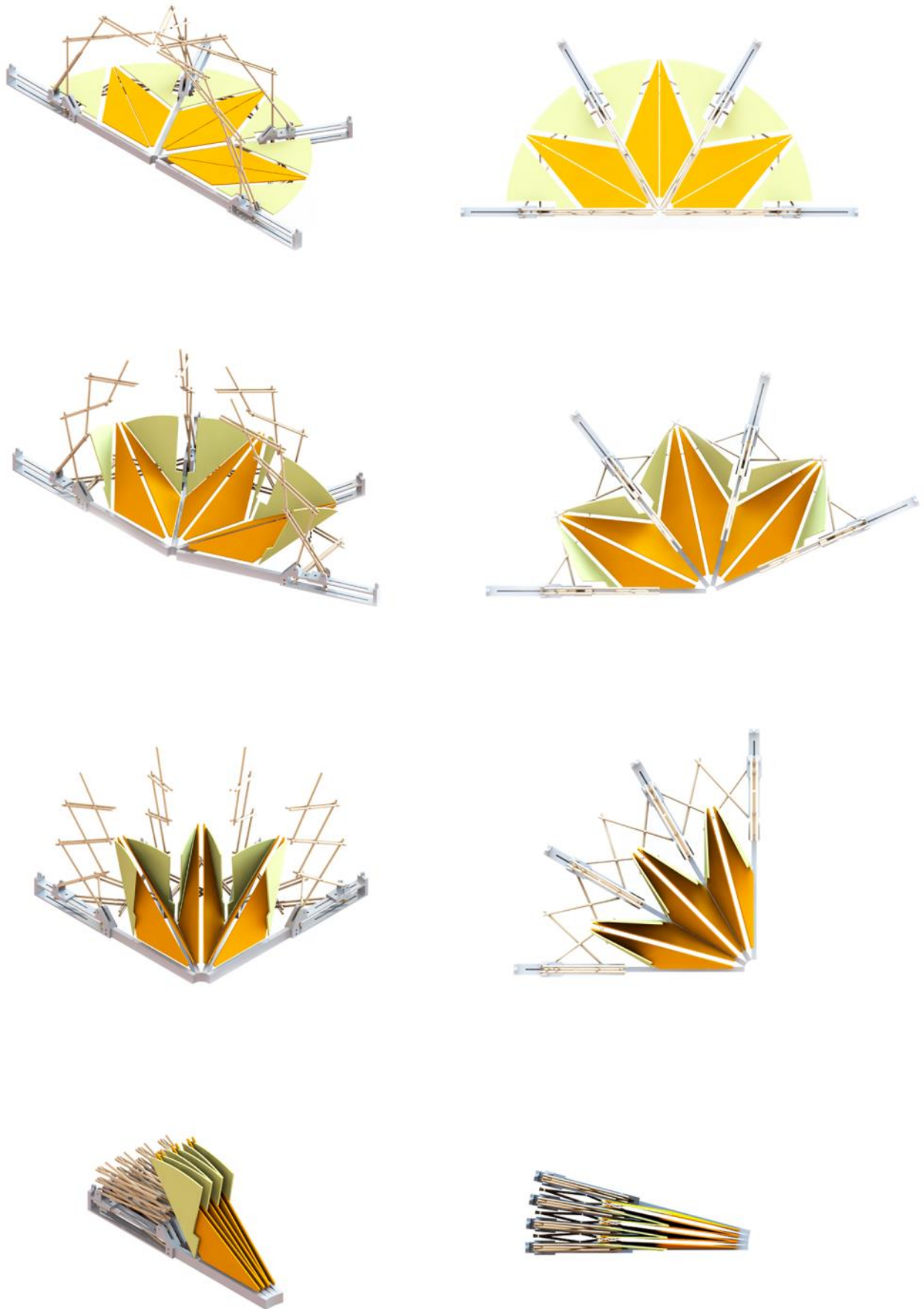


Figura 8.22 Proceso de despliegue plegadura con triángulos rectángulos que cubren las tijeras del suelo y triángulos obtusángulos. Simulación SolidWorks® [135]. Fuente: Elaboración del autor

8.5 Plataforma plegable. Detalles

La figura 8.23 expone a mayor detalle la viabilidad constructiva e implementación de las soluciones técnicas más acordes en cada punto de la plataforma plegable conformada por triángulos y que dejan a la vista la tijeras de suelo, siendo la solución más factible a fabricar en un prototipo a escala que logre desplegarse únicamente con fuerza manual.

Se visualiza posibles técnicas, como la articulación de las vigas por medio de bisagras para obtener el despliegue con curvatura constante y la estructura del panel apoyado y articulado sobre la viga correspondiente (figura 8.23, detalle b, c y d).

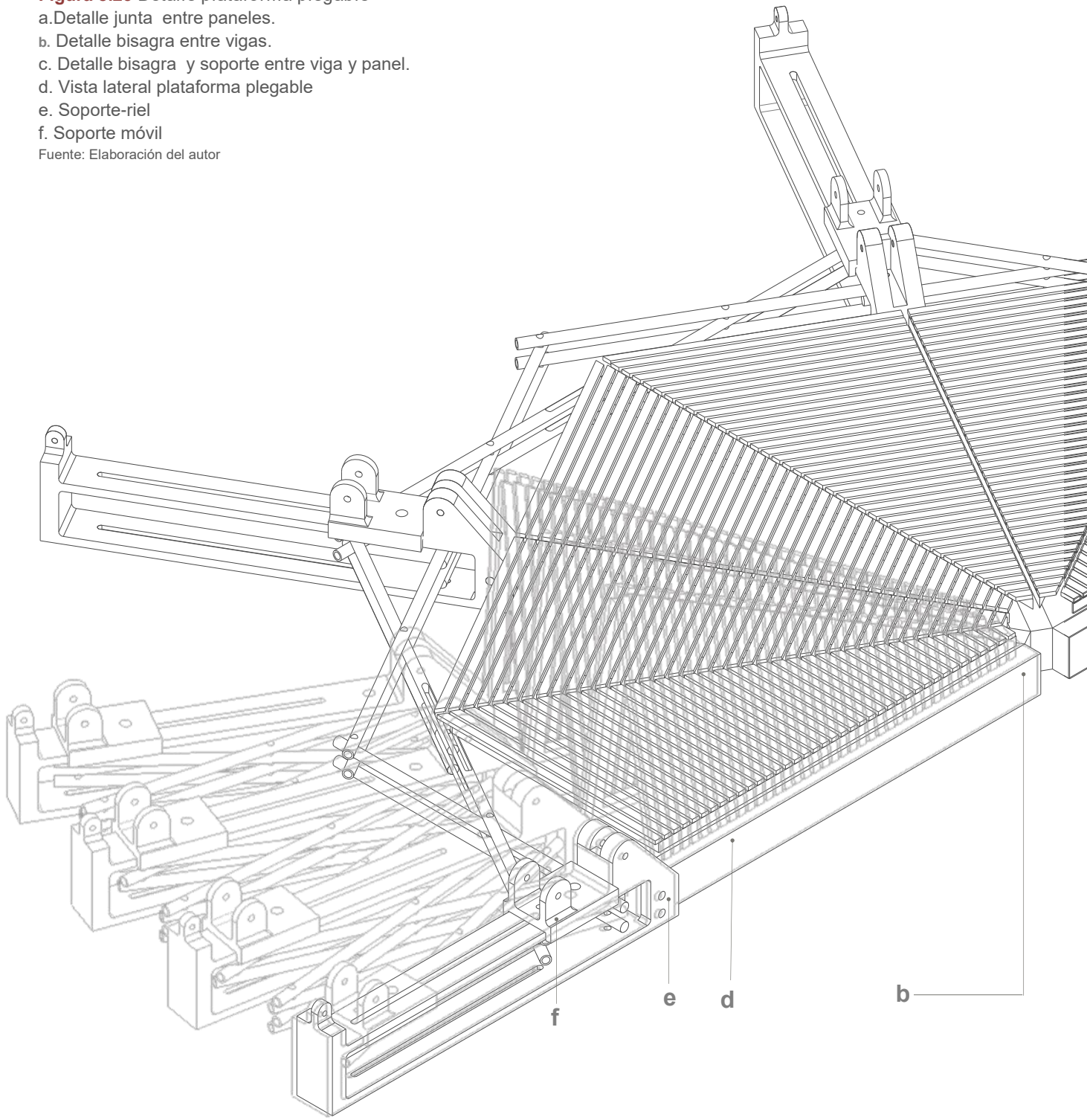
Se propone un sistema de panel configurado a través de un marco estructural, donde se sobrepone como acabado listones de madera. Los marcos estructurales son articulados a la viga de soporte por medio de bisagras de cazoleta, este sistema permite la rotación de panel sin interferencias y apoyar el panel sobre la viga en su posición final de despliegue, los tramos en voladizo de los paneles, se soportan gracias a barras extensibles que articulan a ambos componentes y mantiene el entarimado como una superficie plana y estable en la posición final de despliegue (figura 8.23, detalle c).

La conexión entre paneles se proyecta a través de una junta flexible, que permite adaptarse a todas las etapas de despliegue y una vez se logre la superficie plana, se adapte a la superficie sin generar ningún obstáculo o pieza sobresaliente en el entarimado (figura 8.23, detalle a).

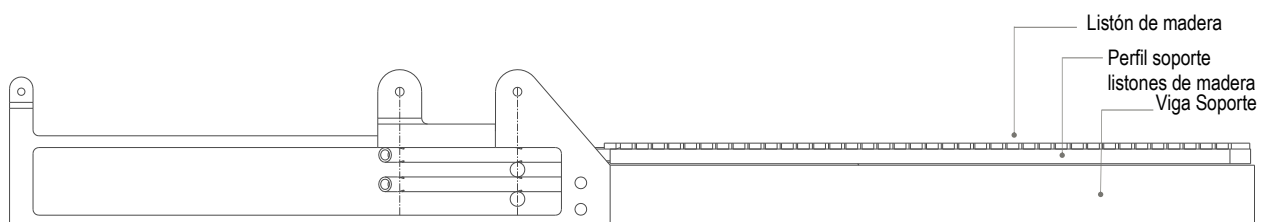
Figura 8.23 Detalle plataforma plegable

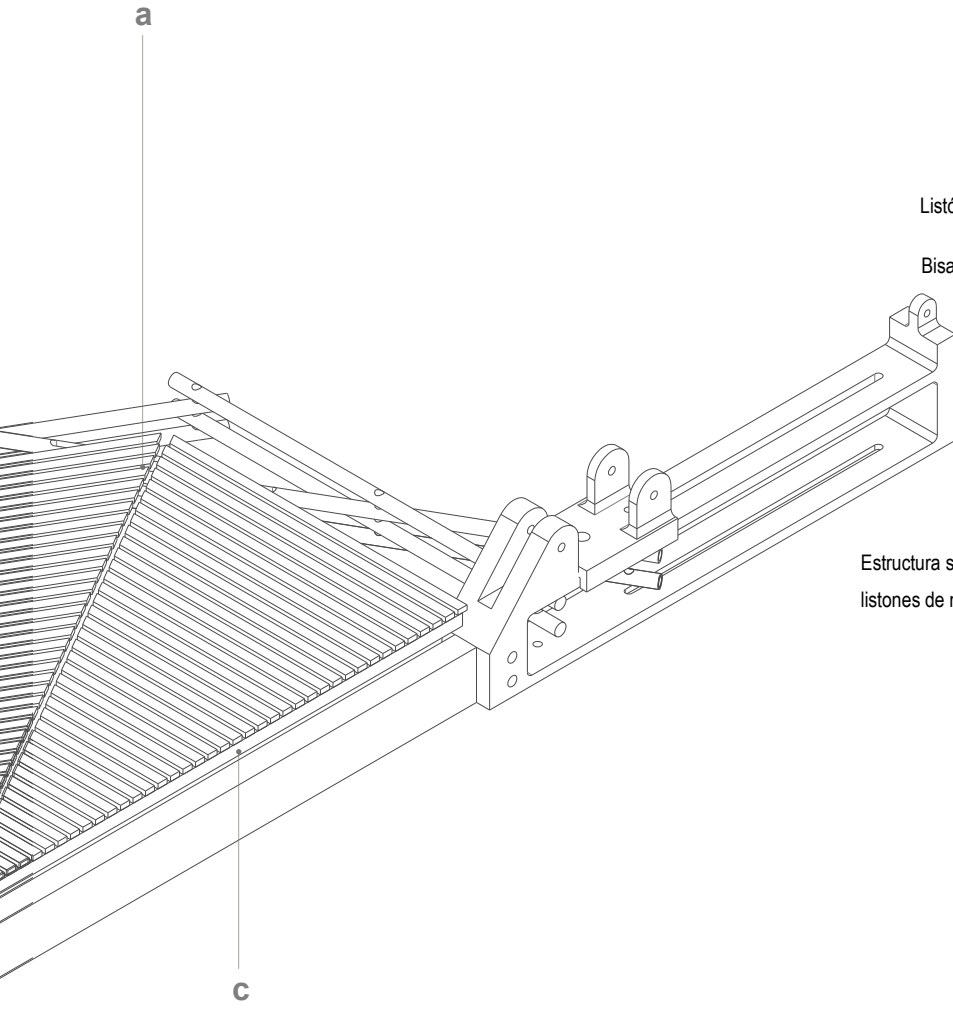
- a. Detalle junta entre paneles.
- b. Detalle bisagra entre vigas.
- c. Detalle bisagra y soporte entre viga y panel.
- d. Vista lateral plataforma plegable
- e. Soporte-riel
- f. Soporte móvil

Fuente: Elaboración del autor

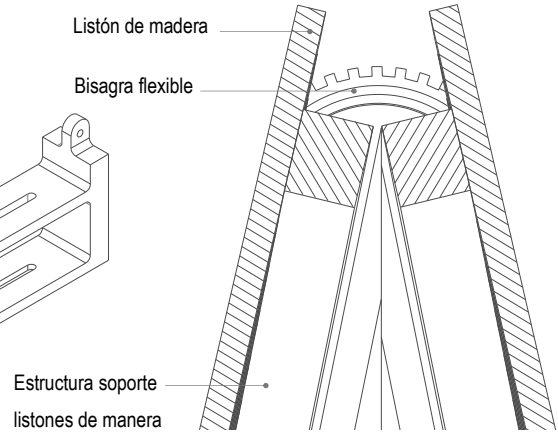


d. Vista lateral plataforma plegable

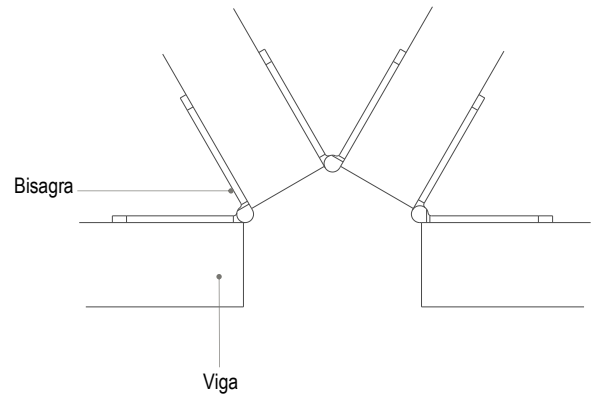




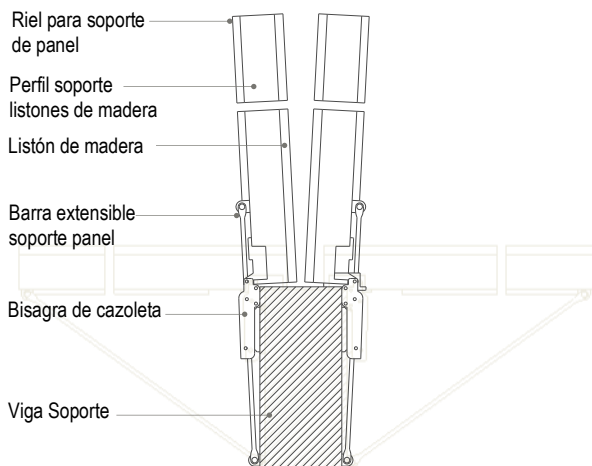
a. Detalle junta entre paneles.
Bisagra flexible. Posición plegada



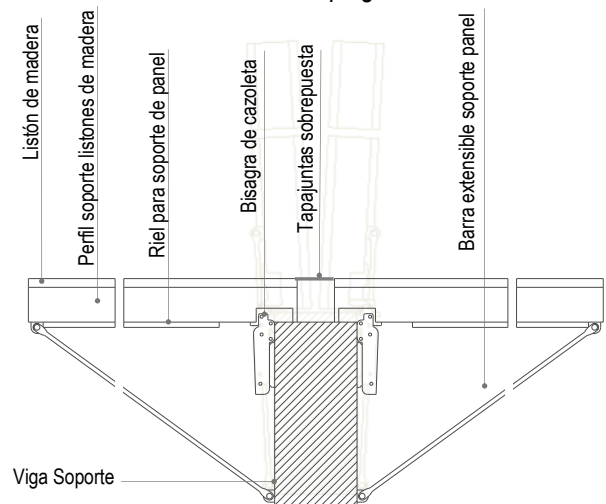
b. Detalle bisagra entre vigas.
Posición desplegada



c. Detalle bisagra y soporte entre viga y panel.
Posición plegada



c. Detalle bisagra y soporte entre viga y panel.
Posición desplegada



8.6 Modelo físico

El modelo físico realizado para validar la propuesta de la plataforma plegable, permite comprobar el buen funcionamiento de las estrategias implementadas para obtener un despliegue simultáneo y con curvatura constante.

Para su fabricación se utiliza la tecnología de la impresión 3D para la realización de los soportes a escala en termoplástico biodegradable (PLA). La agrupación de tijeras se realiza con barras de madera, articuladas con pasadores en aluminio.

La plegadura se proyecta con paneles de madera con la geometría correspondiente a los triángulos rectángulos que forman los trapecoides simétricos entre vigas.

Como mecanismo para obtener el plegado entre componentes, se opta por resolver la plegadura con un abisagrado flexible, para ello se procede a realizar la superficie de la plegadura con doble capa de madera, compuesta por el patronaje de los triángulos posicionados radialmente y guías que se posicionan sobre las vigas, contemplando el espacio suficiente entre elementos para el abisagrado.

Entre capas se introduce un textil que articula todos los paneles, lo suficientemente resistente para soportar el doblado continuo de los paneles sin que se rasgue.

Es importante señalar que en el modelo físico realizado para este apartado, para obtener la curvatura de radio constante, se opta por desconectar las articulaciones centrales, pero en maqueta no es necesario desarticular todos los módulos de tijeras, el proceso de despliegue se logra solo con soltar la mitad de los módulos (tijeras no consecutivas), una situación que no resultaba válida en las simulaciones digitales, lo que reitera la importancia de la elaboración de modelos físicos para esta investigación.

Aunque si es cierto que tanto en la simulación como en el modelo, la elevación de los semiarcos solo presenta un despliegue parcial, porque la correlación entre tijeras en planta y en elevación se elimina al desarticular en punto central entre barras de las tijeras del suelo.

El despliegue en los semiarcos sucede de improviso en una etapa de despliegue intermedia, cuando el soporte móvil es arrastrado a su posición final de despliegue, por el movimiento abatible de las vigas, que obliga a las barras del suelo a posicionarse en la geometría determinada y logra desplegar a una posición intermedia el conjunto de los semiarcos.

Es necesario manipular los semiarcos para posicionarlos en su etapa final de despliegue, luego se procede a la conexión con el nodo principal y finalmente configurar la espacialidad del domo como una estructura estable.

A continuación se presenta una galería de imágenes que expone la maqueta realizada para ejemplificar a través de un modelo físico la alternativa de plataforma plegable que deja a la vista la agrupación de tijeras de suelo.

Figura 8.24 Maqueta de medio domo desplegable. Incluye plataforma plegable. Posición intermedio de despliegue
Fuente: Elaboración del autor

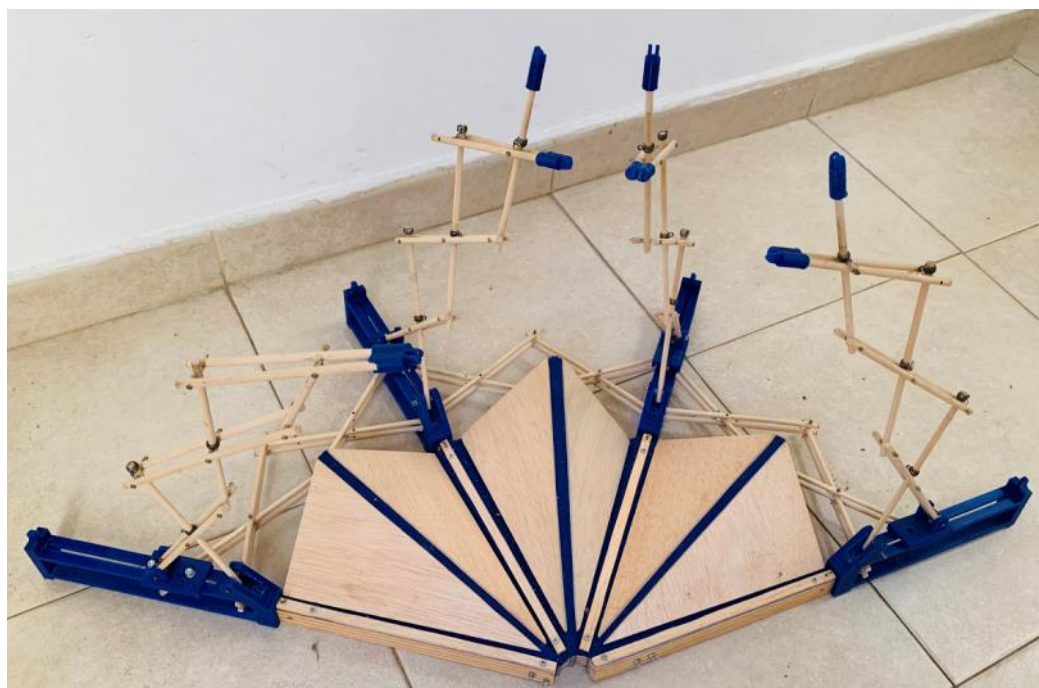


Figura 8.25 Maqueta de medio domo desplegable. Se observa las vigas soporte de la plataforma plegable y plataforma como un elemento aparte que se superpone a la estructura de la base
Fuente: Elaboración del autor

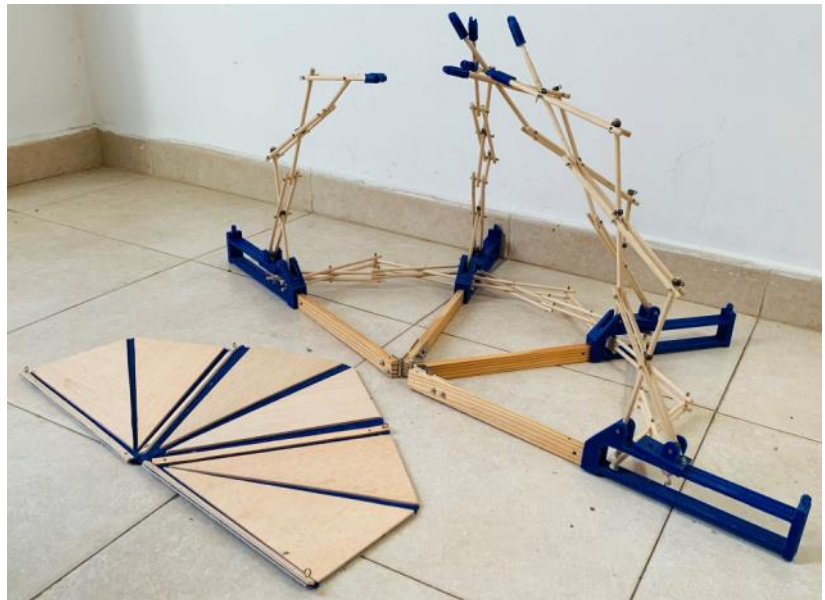


Figura 8.26 Maqueta de medio domo desplegable. Detalle bisagras para articular las vigas soporte y generar el movimiento abatible de la estructura de la plataforma
Fuente: Elaboración del autor



Figura 8.27 Maqueta de medio domo desplegable. Detalle apertura de tijeras de suelo. Se observa que entre vigas una tijera mantiene la conexión en la articulación central y la tijera adyacente las barras no se conectan en la articulación central. Esta estrategia permite que la estructura del suelo se despliegue con una curvatura constante.
Fuente: Elaboración del autor



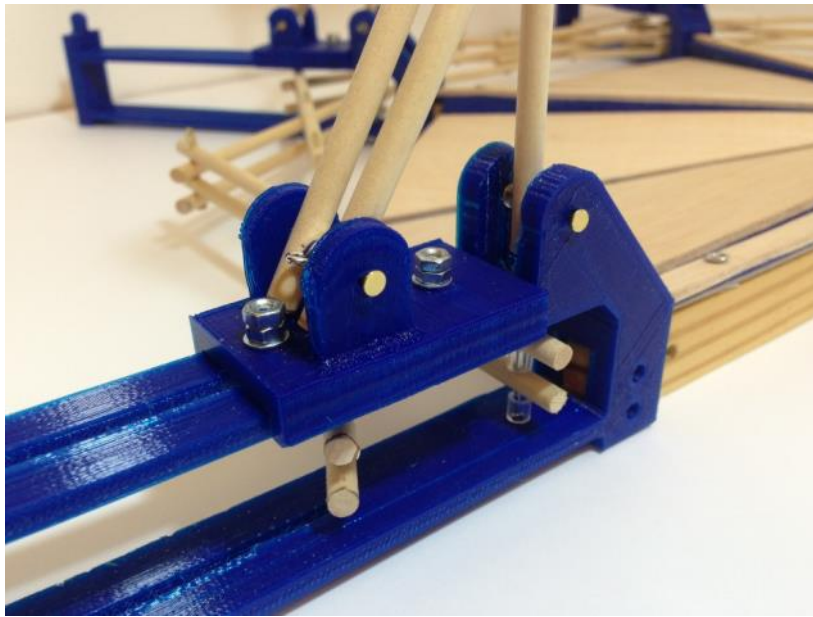


Figura 8.28 Maqueta de medio domo desplegable. Detalle pieza realizada con PLA. Soporte riel y soporte móvil.
Fuente: Elaboración del autor

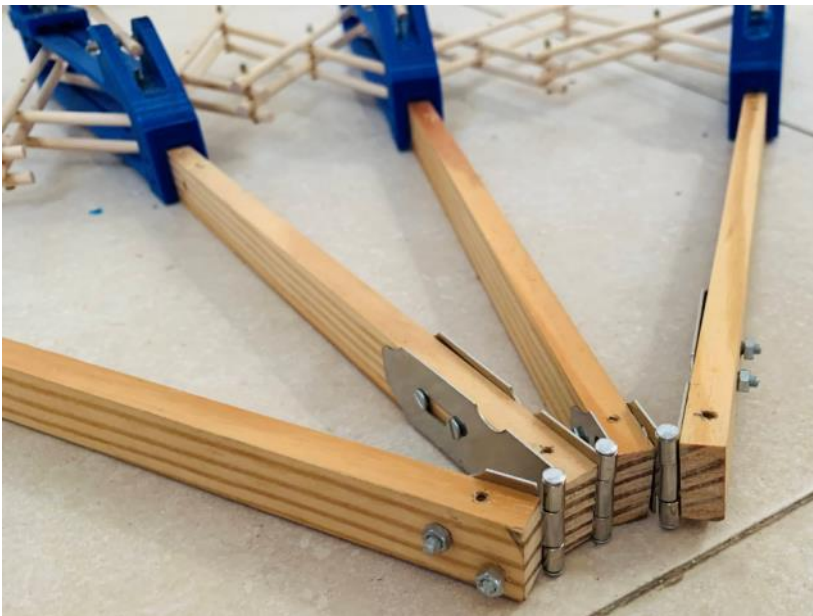


Figura 8.29 Maqueta de medio domo desplegable. Detalle bisagras entre vigas
Fuente: Elaboración del autor



Figura 8.30 Maqueta de medio domo desplegable. Detalle desarticulación central de tijeras de suelo
Fuente: Elaboración del autor

Figura 8.31 Maqueta de medio domo desplegable. Configuración de la plataforma plegable con paneles de madera. Se incluye un listón de madera adicional alineado con las vigas para atornillar la plataforma a la estructura soporte (vigas).

Fuente: Elaboración del autor



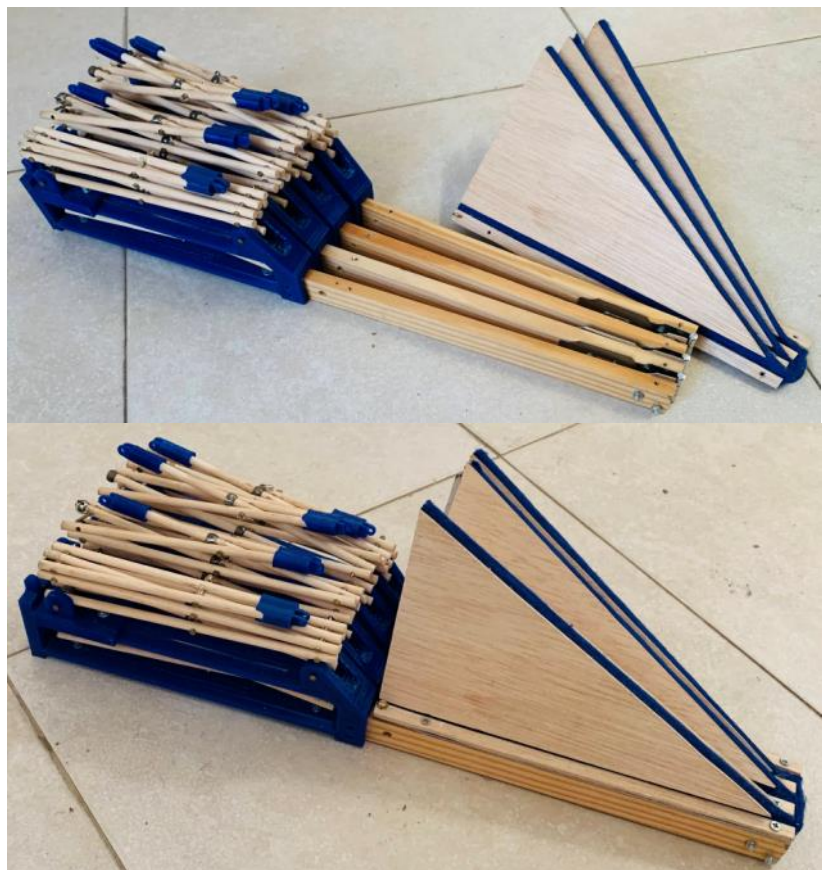
Figura 8.32 Maqueta de medio domo desplegable. Detalle de bisagra flexible entre paneles. Utilización de un textil puesto entre una capa intermedia

Fuente: Elaboración del autor



Figura 8.33 Maqueta de medio domo desplegable. Posición plegada. Se observa el pliegue de la estructura con y sin la plataforma plegable.

Fuente: Elaboración del autor



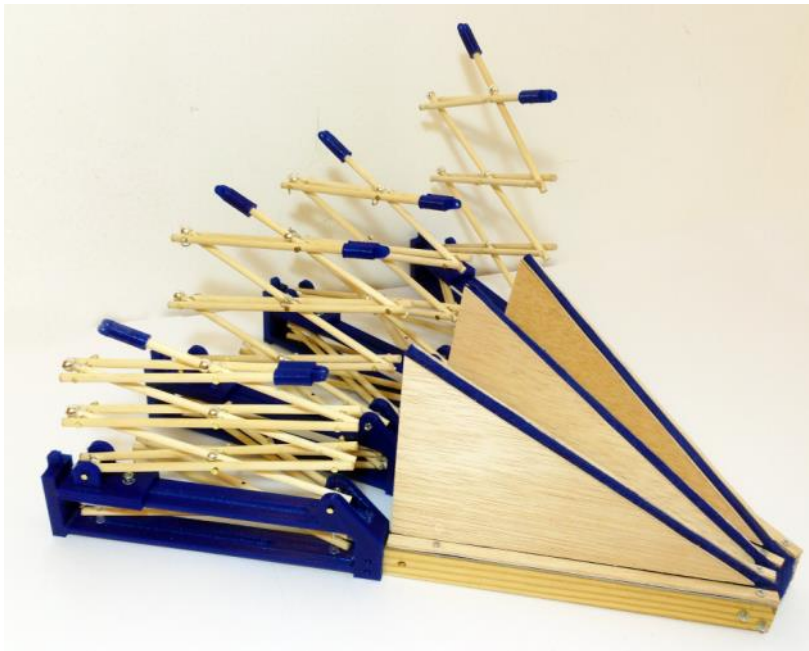


Figura 8.34 Maqueta de medio domo desplegable. Posición de plegado intermedia, previa al pliegue total
Fuente: Elaboración del autor

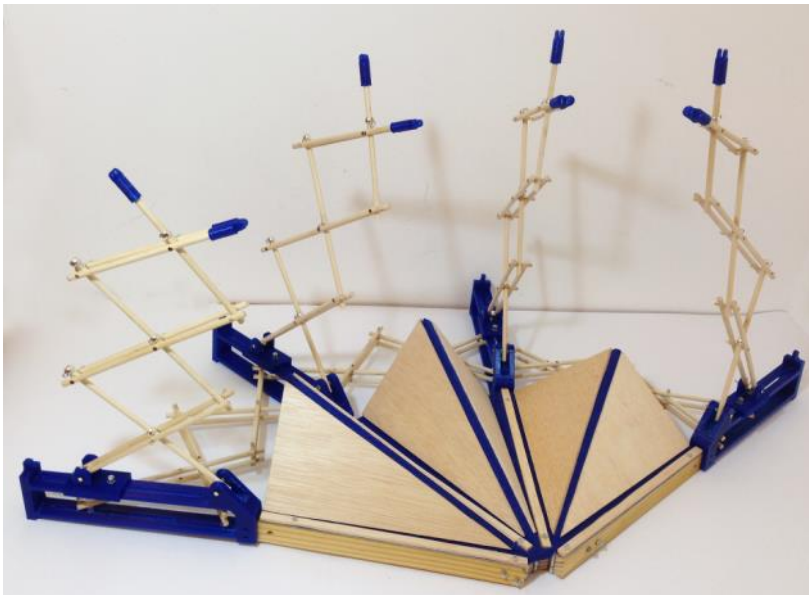


Figura 8.29 Maqueta de medio domo desplegable. Posición de despliegue intermedia, previa a la posición final de despliegue
Fuente: Elaboración del autor

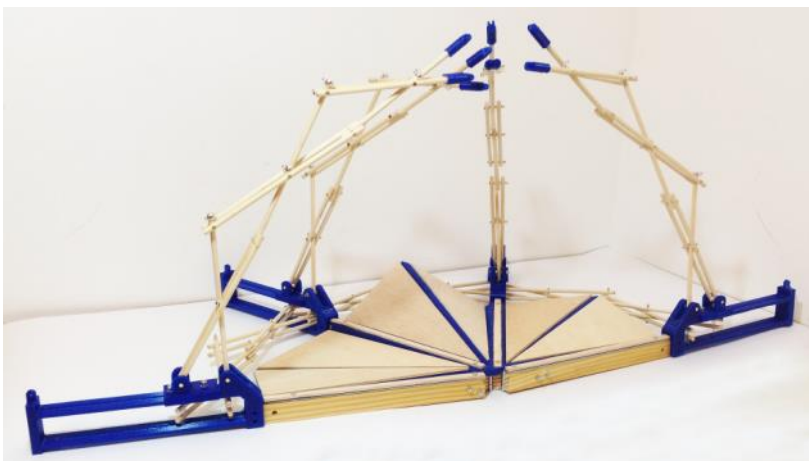


Figura 8.30 Maqueta de medio domo desplegable. Posición final de despliegue.
Fuente: Elaboración del autor

8.7 Conclusiones

Para la disposición de una plataforma plegable acorde con el movimiento de despliegue de las tijeras de suelo y los semiarcos, y obtener un despliegue simultáneo, es necesario incorporar un componente que articule ambos grupos del sistema tipo tijera y al mismo tiempo sea el soporte estructural para el entarimado, para los semiarcos y genere una relación con el terreno.

El soporte viga-riel es el componente diseñado para este fin, compuesto por tres partes fundamentales (soporte riel, soporte móvil y viga). El soporte viga-riel resiste el peso de la plataforma plegable y de los demás componentes, su proyección se basa en incorporar los sistemas mecánicos adecuados, como rieles, bisagras, pernos y carros deslizantes para obtener la coordinación entre el STT de los semiarcos, del suelo y de la agrupación de paneles que conforman el entarimado.

Se ha determinado hasta el momento que la agrupación de tijeras rectas de la misma longitud, con articulación excéntrica y enlazadas de tal manera que coincidía entre tijeras adyacentes la articulación de tramos cortos hacia el interior de la curvatura de despliegue y tramos largos hacia el exterior de la curvatura, genera un recorrido de curvatura variable. Esta tipología de despliegue genera inconvenientes para proyectar una superficie plegable adaptable a las diferentes etapas de despliegue.

Por lo tanto, se establece que el recorrido de despliegue de la plataforma plegable debe describir una curvatura de radio constante, que mantenga la correlación de despliegue simultáneo entre semiarcos y tijeras del suelo.

Las soluciones técnicas presentadas para obtener el despliegue con curvatura constante, refieren a abisagrar los extremos de las vigas para obtener un movimiento abanicado de la estructura de suelo y fundamentalmente a eliminar una articulación entre tijeras del suelo, siendo la más favorable, según las simulaciones digitales realizadas, aquella alternativa de desarticular los tramos cortos entre tijeras adyacentes que no coincidan con un semiarco.

Sin embargo la validación en el modelo a escala, sugiere que también es aceptable la desarticulación central en los módulos de tijeras, aunque el despliegue no es estrictamente simultáneo, el resultado es un despliegue parcial de los semiarcos que habrá que completar manualmente para posicionar los semiarcos en su estado final de despliegue.

La geometría de la plegadura y por ende la forma de los paneles modulares que conforman el entarimado, surge de la observación y realización de modelos a escala que permiten proyectar la agrupación de triángulos equiláteros, divididos por su bisectriz, configurando en el caso de estudio específico, triángulos rectángulos abisagrados. La incorporación del mecanismo de bisagra sobre esta bisectriz, permite el pliegue de la superficie en crestas y valles acorde con el recorrido de curvatura constante.

Tras el análisis del movimiento y simulaciones de proceso de despliegue incorporando paneles con forma triangular articulados para conformar la superficie plana para el entarimado, se concluye que el área del entarimado que presenta menores interferencias durante el despliegue, depende de la longitud de la viga. Esta longitud determina la longitud del lado de panel que va soportado sobre la viga, el segundo lado es determinado por la bisectriz de triángulo equilátero inicial y el tercer lado lo constituye el segmento que une los tramos restantes, dejando a la vista la agrupación de tijeras de suelo.

No obstante si se requiere cubrir toda la estructura del suelo y ampliar el área del entarimado, siempre es posible proponer soluciones alternativas, como contar con paneles modulares adicionales que se posicionan después de la etapa final de despliegue.

La estructura de cada panel es proyectada como una estructura de marco que traza el perímetro triangular y sobre el marco estructural se sobrepone listones de madera para configurar el entarimado, esta configuración es una alternativa de fácil fabricación, modular que permite implementar los mecanismos necesarios para el despliegue.

La proyección y estudio de los mecanismos idóneos para la propuesta de la plataforma plegable, permiten generar mayor viabilidad constructiva y garantías para su implementación, afortunadamente en el mercado industrial existen múltiples de soluciones técnicas a utilizar.

En consecuencia, para el caso de estudio desarrollado en el presente apartado, se decide que para la articulación de viga y panel, el sistema de bisagras de cazoleta es una alternativa compatible, ya que genera una rotación del panel sin interferencias con el resto de componentes y en la posición final de despliegue el panel se apoya sobre la viga. Será necesario como proyección a futuro, añadir los estudios de carga obligatorios para definir la cantidad y tipo de bisagra específica que responda a los esfuerzos solicitantes.

Es necesario incorporar una barra de soporte auxiliar que salve el voladizo de panel, la solución se basa en los sistemas ideados para mesas plegables que se puede adaptar al caso de estudio.

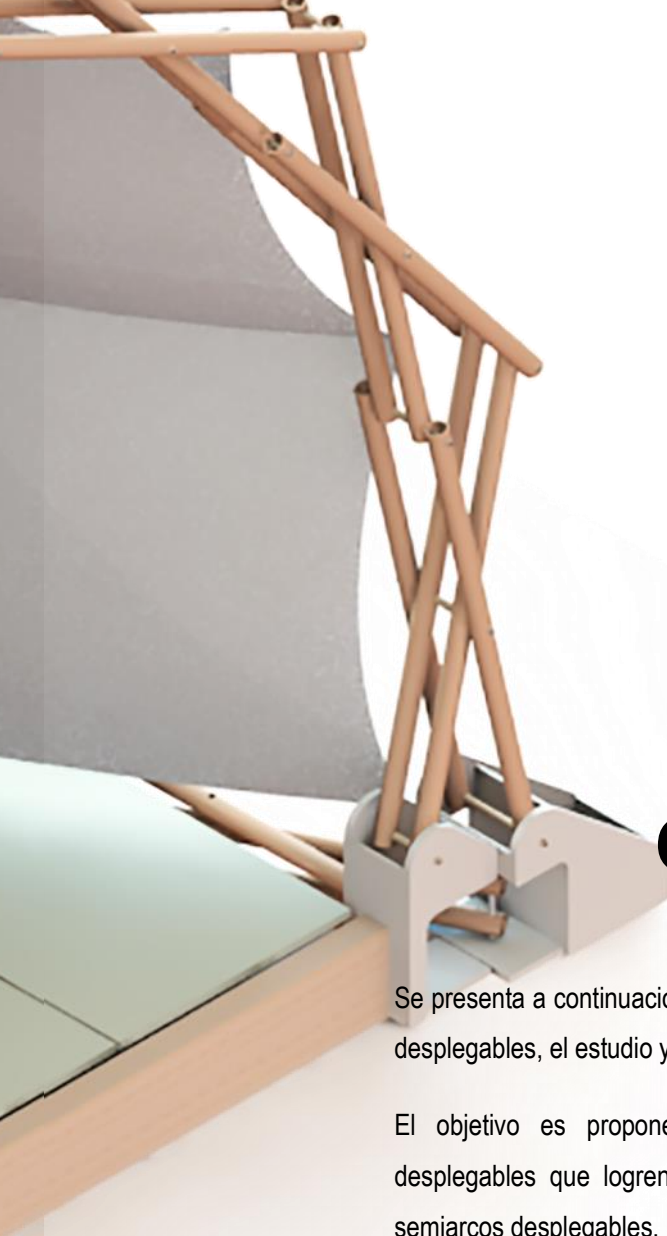
Finalmente, según los análisis en las simulaciones de despliegue de la plataforma plegable, en la articulación entre paneles donde sucede la línea de bisectriz o la línea de cresta de la plegadura, se observa que la distancia entre paneles varía a medida que se despliega la estructura, la junta a su vez tiene mayor longitud en posición plegada y reduce el distanciamiento a medida que la superficie se posiciona plana. Por este motivo, es necesario incluir como mecanismo de bisagra una junta flexible, lo suficientemente resistente para adaptarse a todas las etapas de despliegue.

La realización del modelo físico permite determinar la validez de las simulaciones del proceso de despliegue, detectando posibles dificultades técnicas que en modelo digital no son perceptibles. Así como plantear a escala los mecanismos idóneos para el correcto funcionamiento de la estructura. La exploración a través de la maqueta expone un resultado favorable, soluciones técnicas viables y de bajo costo, buscando cumplir el objetivo de este apartado, el despliegue simultáneo entre semiarcos y suelo en estructuras de domos despletables configurados a partir del sistema tipo tijera.

Los resultados de este apartado ofrece la posibilidad de integrar coberturas rígidas compatibles con el STT, ofreciendo directrices geométricas para la configuración de plataformas plegables para diversas geometrías de domos despletables.

Aunque la investigación se delimita con sistemas mecánicos que se activan manualmente, cabe mencionar que la automatización es un recurso fundamental a contemplar en este tipo de estructuras, considerando a futuro la implementación de actuadores, motores o sistemas hidráulicos en aplicaciones a mayor escala que requieran de mayor tecnología.





CAPÍTULO 9

Cubierta desplegable

Se presenta a continuación, como solución de cubierta compatible a las estructuras de domos desplegables, el estudio y análisis de alternativas de tesoestructuras.

El objetivo es proponer alternativas de cubierta idóneas, partiendo de membranas desplegables que logren un despliegue simultáneo con la estructura portante basada en semiarcos desplegables.

De esta forma, el presente capítulo describe las diferentes etapas de diseño para el desarrollo de esta tipología de cubiertas, aplicado a un caso específico de estudio y apoyado con el software de simulación, análisis y patronaje WinTess© [137].

El software como herramienta de diseño y definición de la membrana, realiza un análisis no lineal para estructuras de membrana, que permite desarrollar la propuesta de cubierta en tres estados fundamentales:

Búsqueda de la forma

Patronaje.

Cálculo.

El estudio concluye con la comparación del comportamiento y esfuerzos resultantes de las diferentes alternativas de cubiertas para los domos desplegables, así como el planteamiento de los detalles constructivos para el sistema de montaje que describe este tipo de estructuras, con el objetivo de proyectar la viabilidad constructiva de estas aplicaciones arquitectónicas.

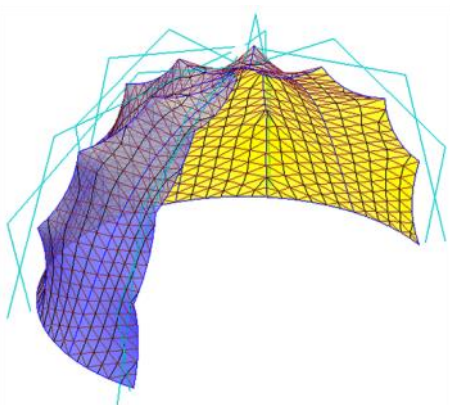
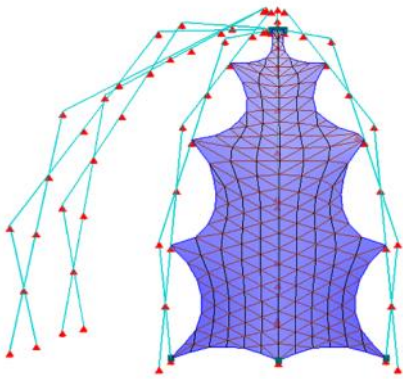
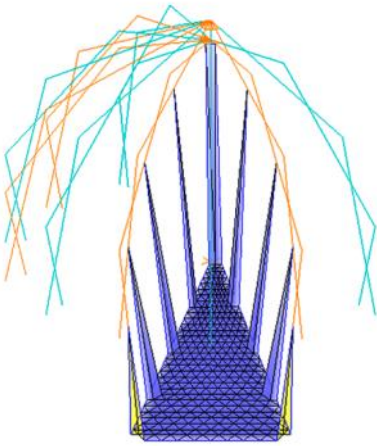
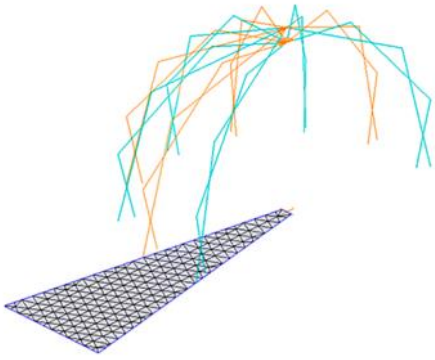


Figura 9.7 Procedimiento obtención de la forma.
Cubierta domos desplegables. Programa WinTess© [137].
Fuente: Elaboración del autor

Contenido del capítulo

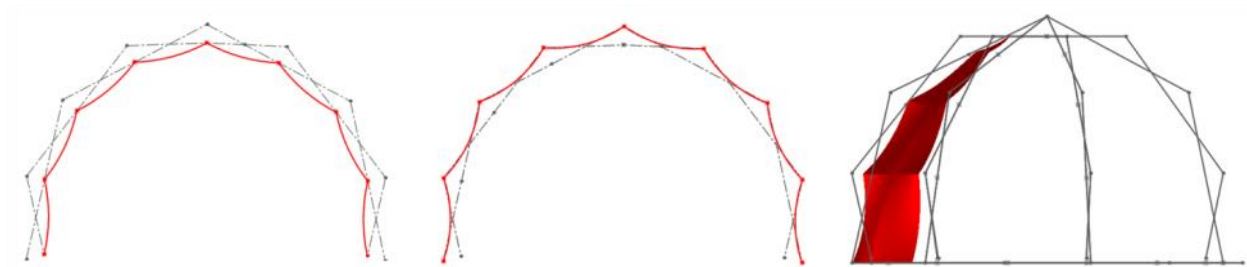
9.1 Alternativas de cubierta	396
9.2 Discretización e introducción de datos en Wintess	398
9.2.1 Búsqueda de la forma	398
9.2.2 Patronaje	402
9.2.3 Definición de materiales, determinantes y valores para el cálculo.....	406
9.3 Cálculo estructural	410
9.3.1 Cubierta interior	410
9.3.2 Cubierta exterior	414
9.3.3 Cubierta seccionada.....	417
9.4 Detalles y conexiones	421
9.4.1 Sujeción cubierta interior	422
9.4.2 Sujeción cubierta exterior.....	426
9.4.3 Sujeción cubierta seccionada	428
9.4 Conclusiones	431

9.1 Alternativas de cubierta

Las alternativas de tensoestructuras expuestas en el presente apartado, refieren a cubrir un domo desplegable a partir de la geometría de un heptágono y configurado a partir de arcos herradura (figura 6.1), caso específico utilizado para el análisis de los arcos desplegados (ver capítulo 6).

Figura 9.1 Posibilidades de posicionamiento de cubierta para domos desplegados.

Fuente: Elaboración del autor



Se proponen tres posibilidades de tensoestructuras para cubrir la estructura del domo y que pueden generalizarse para las diferentes geometrías de domos proyectados en esta investigación (figura 9.1):

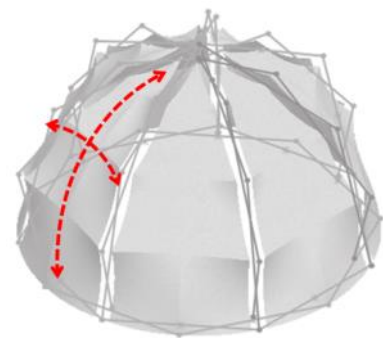


Figura 9.2 Configuración de doble curvatura para cubierta de domos desplegados

Fuente: Elaboración del autor

Una primera alternativa corresponde a una lona continua que se posiciona colgada desde los arcos, es decir una cubierta interior. La segunda propuesta, corresponde a una lona continua que se posiciona sobre los arcos, una cubierta exterior. Y una tercera alternativa que refiere a secciones de membrana fijadas entre los semiarcos.

En las tres posibilidades de posicionamiento de la cubierta, el criterio para configurar la tensoestructura y obtener la doble curvatura, define una primera curvatura cóncava que se proyecta con la curva que genera cada semiarco y es correspondiente a los meridianos de la geometría. Y la segunda curvatura es convexa y equivale a los paralelos que se trazan entre semiarcos (figura 9.2).

También es importante aclarar que cada una de estas tres posibilidades puede contemplar las aberturas necesarias para accesos e iluminación natural dentro del recinto, según el criterio arquitectónico a implementar, función y aplicación del domo desplegable, generando una diversidad de posibilidades de cubiertas tensadas.

Figura 9.3 Siguiente página.
a) Cubierta interior continua y con aberturas.
b) Cubierta exterior continua y con aberturas.
c) Cubierta seccionada

Fuente: Elaboración del autor

La figura 9.3 representa algunas de las posibles alternativas de cubierta, proyectadas con los tres criterios mencionados anteriormente, como cubierta interior, exterior y seccionada.

9.2 Discretización e introducción de datos en WinTess©

A partir de las tres posibilidades de tensoestructura seleccionadas como las soluciones más comunes para cubrir un domo desplegable, se procede a través del programa WinTess© [137], a realizar los procesos de búsqueda de la forma, configuración de los patrones para formar la superficie de la membrana y cálculo estructural con un análisis no lineal para estructuras de membranas.

El objetivo es hallar la forma idónea de la tensoestructura, compatible con el despliegue de los semiarcos y analizar el comportamiento de la membrana, una vez la estructura del domo se encuentra en su posición final de despliegue y configure una estructura estable.

Para ello se establecen unos parámetros y condiciones en común, en cada una de las etapas del proceso de diseño dentro de la plataforma del programa WinTess© [137].

9.2.1 Búsqueda de la forma

El objetivo principal en cada uno de los casos es vincular la cubierta textil al proceso de despliegue de los semiarcos, de esta forma la propuesta de tensoestructura se diseña a partir de secciones estándar, sujetas en puntos específicos de los arcos para obtener un proceso de izado simultáneo con el proceso de despliegue de los semiarcos estructurales [89].

En la investigación que antecede este estudio [88], se explora a nivel de maqueta la solución que permite obtener el proceso de despliegue simultáneo, la cual aporta condiciones y determinantes necesarias para el desarrollo de los modelos digitales y simulaciones que se exponen en el presente capítulo (figura 9.4).



Figura 9.4 Maqueta esc 1:10.
Despliegue simultáneo de
membrana y semiarcos [89].
Elaboración del autor

La figura 9.4 representa un modelo físico esc 1:10, cuya membrana en forma de trapecio alargado es seccionada a través de una relinga central, que se define con la implementación de una cremallera que divide la membrana longitudinalmente en dos partes iguales.

La solución resuelve la idea de despliegue simultáneo entre cubierta y estructura, entendiendo que durante el proceso de izado, los puntos de fijación de la lona que están en la parte superior de los arcos y que corresponde a lado más corto del trapecio, en el momento del inicio del despliegue, cuando los arcos están en posición horizontal y totalmente plegados, estos puntos se encuentran radialmente más separados y se irán juntando a medida que los semiarcos se eleven hasta la cúspide del domo.

Una vez finalice el proceso de despliegue, las dos secciones de membrana terminan uniéndose mediante la cremallera y generando mayor rigidez a la estructura.

A partir de esta solución, se proyecta en los modelos digitales de las tensoestructuras a proponer, la relinga central que incorpora la cremallera. Además se establecen los puntos de anclaje en los arcos, correspondientes a los puntos de unión entre módulos de tijera (figura 9.5).

En el caso de posicionar la cubierta interior, corresponden a los extremos cortos de las barras del módulo de tijera, en el caso de la cubierta exterior corresponde a los tramos largos de las barras de cada módulo de tijera y en la cubierta entre arcos la sujeción es posible tanto en los extremos de los tramos cortos, como en los tramos largos de los módulos de tijera (figura 9.5).

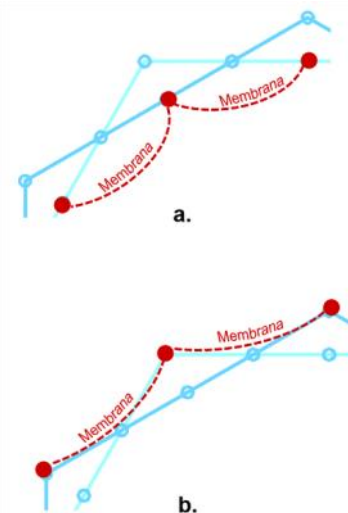


Figura 9.5 Puntos de fijación de
membrana en semiarcos.
(a) Cubierta interior
(b) Cubierta exterior
(a) y (b) Cubierta entre arcos
Fuente: Elaboración del autor

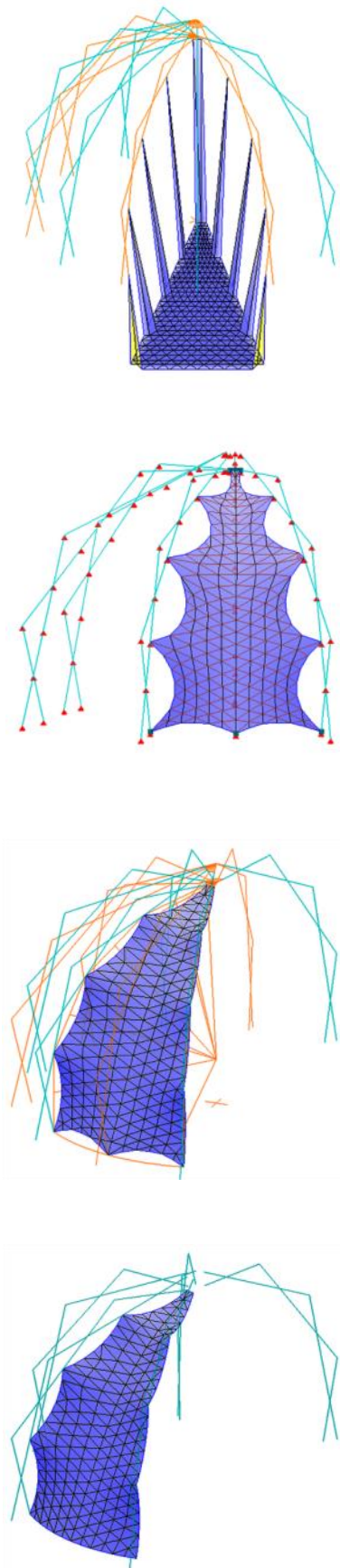


Figura 9.7 Procedimiento obtención de la forma. Cubierta domos desplegables. Programa WinTess© [137].
Fuente: Elaboración del autor

Para la obtención de la forma dentro del programa WinTess© [137] y apoyado con la utilización de maquetas, el modelo digital inicia con el proceso de definición de la malla. Para las tres alternativas de cubierta el procedimiento es similar, simplemente varía los puntos de sujeción anteriormente descritos (figura 9.5).

Se describe a continuación el procedimiento realizado para obtener una sección de membrana estándar con doble curvatura, la cual se copia las veces necesarias a través del proceso de maclado, para obtener una cubierta continua según la geometría y diseño del domo a cubrir.

Definición perímetro de la malla

Se realiza una geometría inicial correspondiente a un trapecio alargado con las dimensiones correspondientes, definiendo claramente los vértices necesarios para proyectar el perímetro específico, sujeto a los puntos de anclaje de los semiarcos, junto con la relinga central la cual seccionará en dos mitades la sección de membrana a través de la cremallera (figura 9.6).

Una vez definida la malla, se establece una red triangular proporcionada para distribuir la misma cantidad de triángulos entre cada módulo de tijera (figura 9.6). Se procede a importar la geometría de la estructura soporte, representada en las barras de los semiarcos y se desplazan los nudos específicos perimetrales de la membrana a los puntos de sujeción determinados en los semiarcos (figura 9.7).

Para terminar de obtener la forma y definir adecuadamente las curvas en las relingas perimetrales, se trazan líneas y arcos auxiliares para moldear la membrana a su forma final. El procedimiento se observa más claramente, en la secuencia de imágenes que representa la figura 9.7.

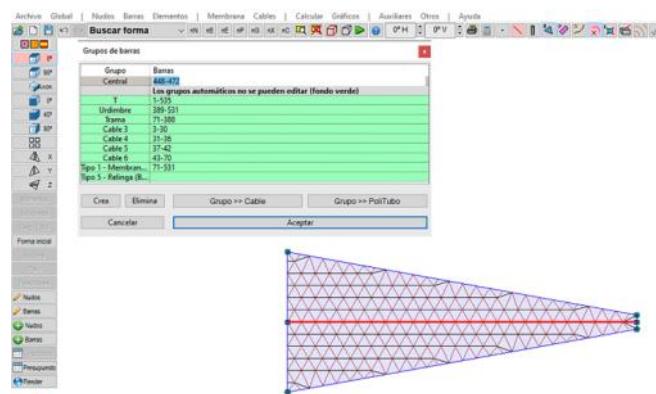


Figura 9.6 Procedimiento obtención de la forma. Perímetro de la sección de membrana. Programa WinTess© [137]
Fuente: Elaboración del autor

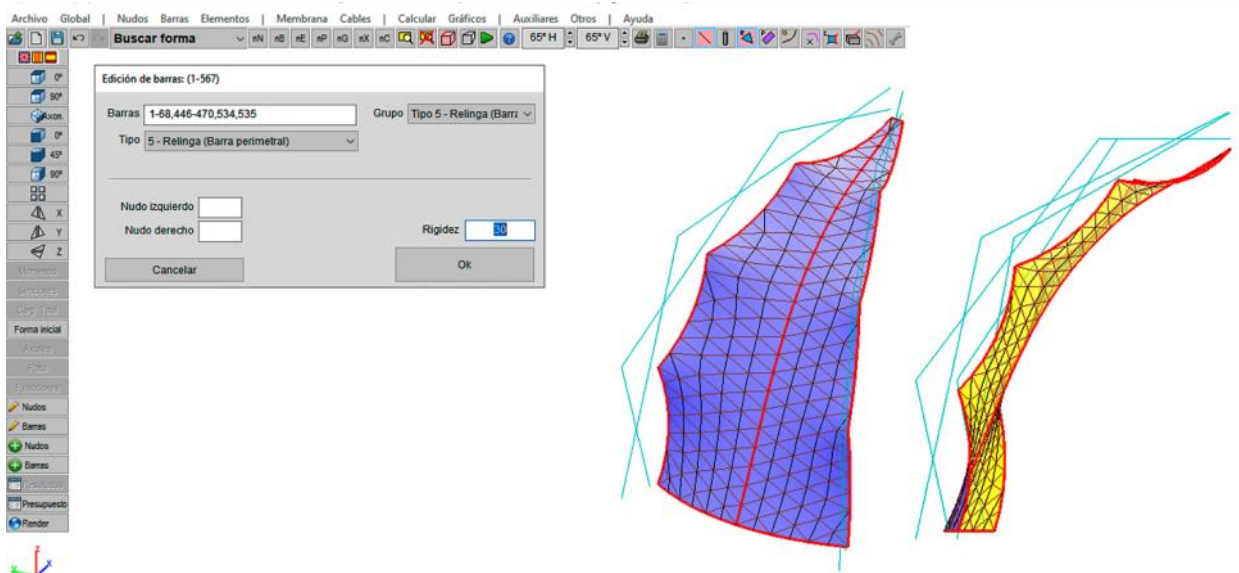


Figura 9.8 Procedimiento obtención de la forma. Rigidez de la relinga central. Programa WinTess© [137]

Fuente: Elaboración del autor

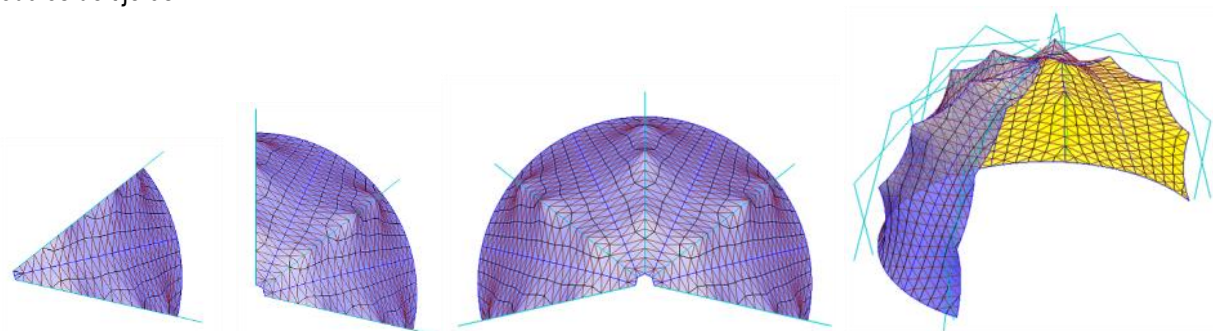
A continuación, es necesario ajustar la rigidez de la relinga central a un valor conveniente que permita enfatizar la doble curvatura de la membrana. Para este caso, se procede a editar estos elementos del tipo Relinga (Barra perimetral), estableciendo como valor de rigidez 30, un valor acertado para obtener una curvatura estética y acorde a la geometría del domo (figura 9.8).

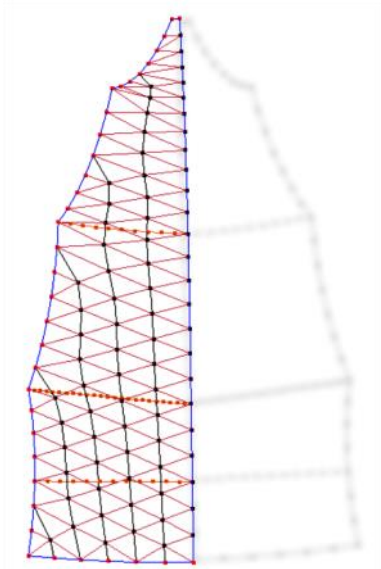
Obtenida la forma de la membrana, el procedimiento a seguir consiste en maclar cuatro módulos de esta sección con la rotación pertinente según la geometría del domo, para el caso específico corresponde a la geometría de un heptágono, la rotación es de 51.43° sobre el eje (z), y de esta forma se configura la totalidad de la membrana a calcular.

La figura 9.9 representa el resultado final de la búsqueda de la forma de la cubierta interior continua en medio domo, juntando cuatro secciones de membrana y sujeta a los semiarcos desde los puntos de articulación entre módulos de tijeras.

Figura 9.9 Procedimiento obtención de la forma. Maclado de secciones de cubierta para configurar la cubierta continua. Programa WinTess© [137]

Fuente: Elaboración del autor





Para la configuración de las demás posibilidades de cubierta, el proceso de búsqueda de la forma es similar para la cubierta exterior, solo se ha de tener en cuenta, la posición de los nudos de la sección de membrana sobre los semiarcos (figura 9.5 b)

Para la cubierta seccionada, la importancia de la forma radica en lograr una curvatura acertada para la relingas longitudinales del perímetro, ya que para este caso no se configura una cubierta continua.

La tabla 9.1 expone el resultado de la búsqueda de la forma en cada una de las alternativas de cubierta propuestas, proyectada para la sección de domo del caso de estudio específico y para domos completos.

9.2.2 Patronaje

Se procede a pasar al estado de patronaje dentro del programa de simulación para proyectar la materialización y fabricación de la cubierta textil. Para ello es necesario definir los patrones específicos que conforman la sección de tensoestructura diseñada para el domo desplegable.

El objetivo es configurar patrones posicionados transversamente sobre la sección de membrana estándar, aunque se ha de recordar que esta sección incluye una cremallera central que divide la membrana en dos partes longitudinales iguales. De esta manera, para simplificar el proceso de patronaje, tomamos la mitad de la sección de membrana estándar, y se redefine el largo de los patrones (figura 9.10).

El método consiste en trazar geodésicas lo más paralelas posibles sobre la sección de membrana, es así que los triángulos que definen la densidad de la malla original, sirven como base para establecer los puntos de inicio de las geodésicas y la separación entre ellas, estableciendo el ancho de los patrones (figura 9.10).

Con las geodésicas trazadas, se procede a la creación de los patrones mediante el método de perímetro, debido a que el diseño de la tensoestructura no es una forma compleja, la generación de los patrones por parte del programa es prácticamente automática (figura 9.10).

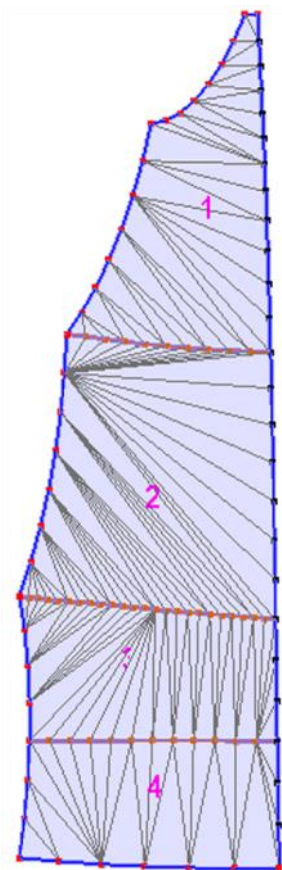



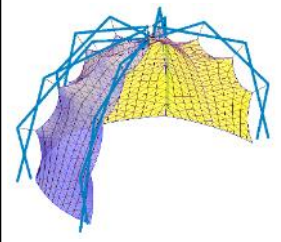
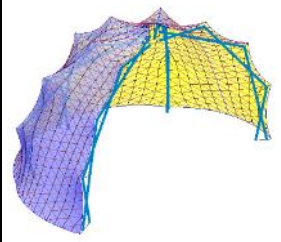
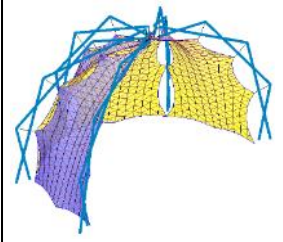
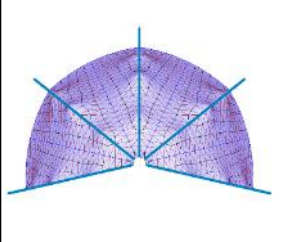

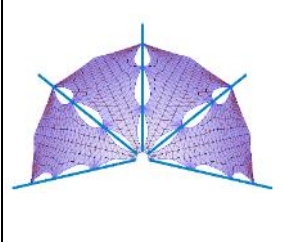
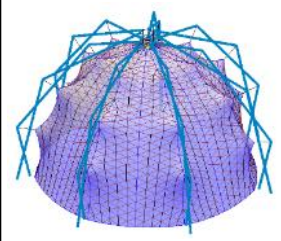

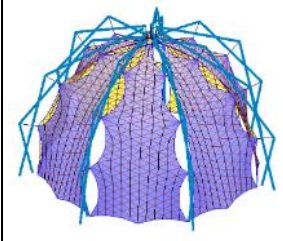
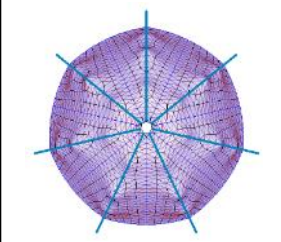
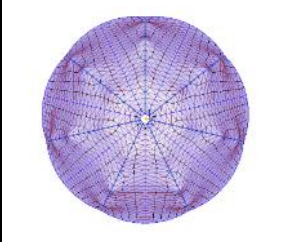
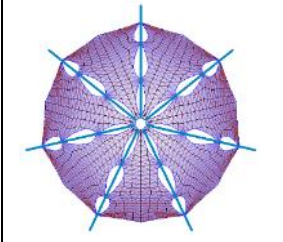


Figura 9.10 Proceso de patronaje. Trazado de geodésicas sobre la mitad de la sección estándar de membrana.
Programa WinTess© [137]
Fuente: Elaboración del autor

TABLA 9.1 BUSQUEDA DE LA FORMA

Fuente: Elaboracion del autor

CUBIERTA	INTERIOR	EXTERIOR	SECCIONADA
SECCIÓN ESTÁNDAR			
AXONOMETRÍA CUBIERTA MEDIO DOMO			
PLANTA CUBIERTA MEDIO DOMO			
AXONOMETRÍA CUBIERTA DOMO			
PLANTA CUBIERTA DOMO			

Generado el proceso de patronaje, es necesario comprobar la calidad de los patrones resultantes, es decir, si responden adecuadamente a la curvatura alabeada generada en el estado de “búsqueda de la forma”.

Para ello se cuenta la herramienta Calidad de patrón, que mide a través de una gama de colores, que tan distante esta el patrón de la curvatura original, los tonos verdes son los patrones que se adaptan adecuadamente a la curvatura y los tonos rojos aquellos que no se adaptan correctamente a la curvatura de la membrana, si sucediera este caso, habría que replantear el trazado de los patrones, pero para el caso específico, se observa que los patrones en cada una de las alternativas de patronaje presentadas están correctos (tabla 9.2).

La tabla 9.2 expone varias alternativas de patronaje aplicada a cada tipología de cubierta. Debido a la poca complejidad de la sección de membrana, es viable proyectar un único patrón, que optimizaría los tiempos de fabricación y montaje.

Finalmente el programa permite visualizar cada patrón generado sobre una superficie plana, señalando las coordenadas específicas para el dimensionamiento y corte de cada pieza. Para completar la materialización, se ha de introducir el offset requerido para proyectar el dobladillo necesario y el ancho de la tela a requerir, para que se pueda posicionar y cortar cada uno de los patrones generados (figura 9.11).

Para el proceso de corte y confección, es importante revisar la correcta simetría de estos patrones, ya que cada patrón tiene su propio espejo y se ha de posicionar correctamente en el lado apropiado de la lona o generar un nuevo patrón con su correspondiente geometría simétrica.

Figura 9.11 Proceso de patronaje. Dimensionamiento y posicionamiento de un único patrón. Ancho de tela 120 cm. WinTess© [137]
Fuente: Elaboración del autor

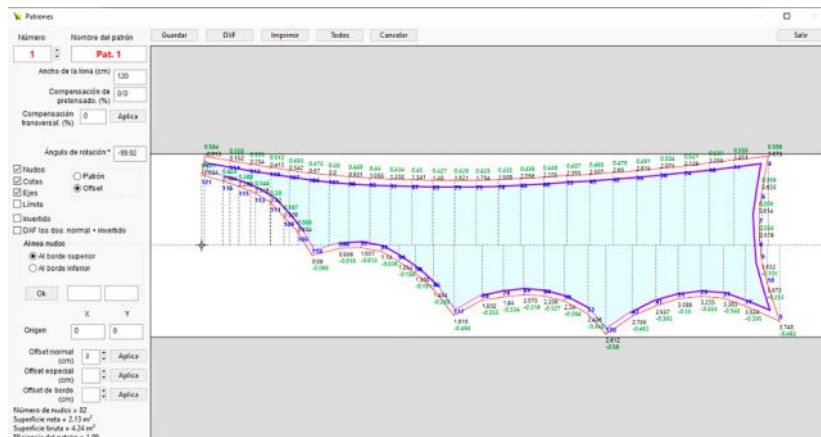

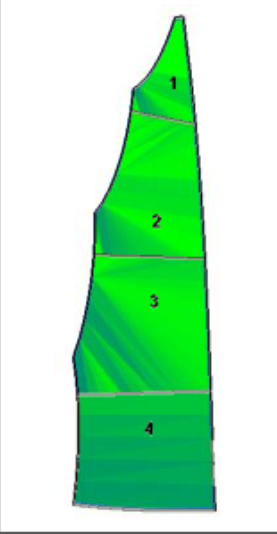
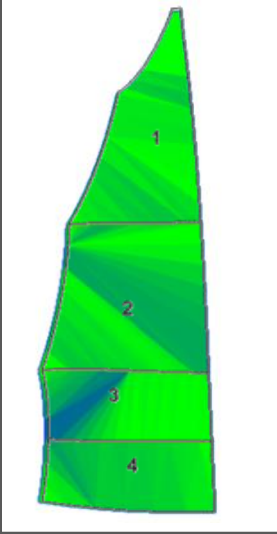
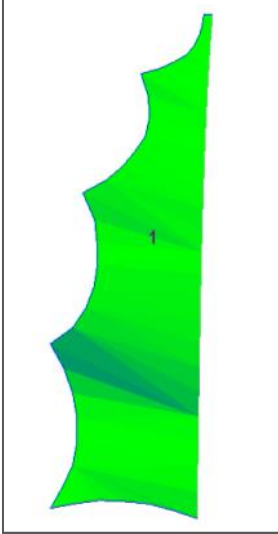
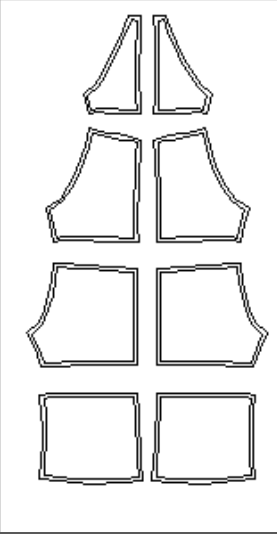
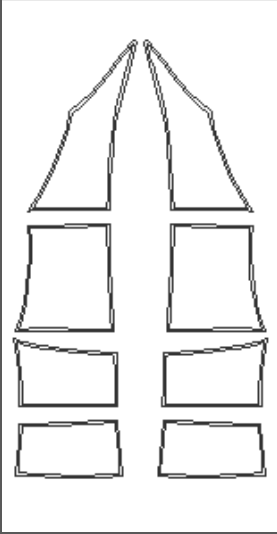
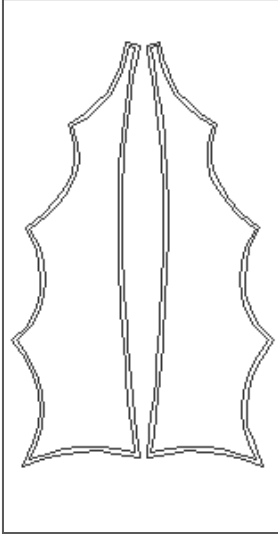
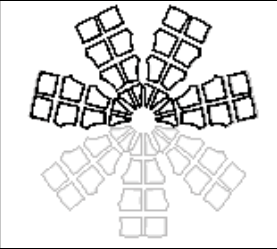
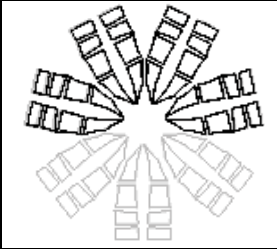



TABLA 9.2 PATROAJE

Fuente: Elaboración del autor

PATRONAJE	INTERIOR	EXTERIOR	SECCIONADA
<p>PATRONAJE EN SECCIÓN ESTÁNDAR</p> <p>Nº DE PATRONES</p> <p>CALIDAD PATRONAJE</p> 			
<p>DIFERENTES FORMAS DE PATRONAJES. SECCIÓN ESTÁNDAR CON SU SIMETRÍA</p>			
<p>DISPOSICIÓN EN PLANTA DE PATRONES</p>			
<p>ANCHO DE LA TELA CM</p>	<p>120</p>	<p>130</p>	<p>120</p>

9.2.3 Definición de materiales, determinantes y valores para el cálculo.

Para proceder al proceso de cálculo, se establecen a continuación, las determinantes estructurales dentro del programa, que permiten ejecutar correctamente el proceso de simulación:

- La estructura se calcula en su estado final de despliegue. Es decir, la simulación se realiza cuando la estructura configura la geometría del domo y los semiarcos articulados se conectan en la cúspide al nodo central. Los semiarcos se comportan como estructuras de soporte que no presentan rotación entre barras de los módulos de tijera, no se repliegan.
- Las barras de los semiarcos se definen como barras rígidas, y se introduce los valores de la sección y propiedades físicas de los tubos de cartón. En el capítulo seis, se expone estas características con mayor detalle (figura 6.22), pero para el caso específico del cálculo de la membrana dentro del programa de simulación, se procede a introducir en las barras de las tijeras que tienen doble barra, una sección de tubo de cartón con el doble de espesor (10 mm), a excepción de la última barra del módulo de tijera superior, que llega horizontalmente a la cúspide (nodo principal) y se mantendrá como una barra simple (figuras 9.10 y 9.11).
- Los nudos entre módulos de tijera se definen como nudos articulados.

El proceso consiste en identificar y precisar con atención los nudos de las barras que van articulados al módulo de tijera adyacente. De esta manera, en la ventana de edición de las barras, se ha de seleccionar la opción correcta (articulado por la derecha o por la izquierda) para que cada barra se articule con su correspondiente extremo, al módulo de tijera adyacente (figura 9.12).

- Se introducen las barras que sostienen la membrana desde los arcos. Para la cubierta interior corresponden a cables galvanizados de 6x19 - (3 mm) y para la cubierta exterior se define como una barra rígida de aluminio con una sección de 1.23 cm² (figuras 9.13 y 9.14).
- Se introducen las barras rígidas para configurar el anillo superior e inferior que unen los extremos finales de los semiarcos y representan el nodo principal del domo, se definen como barras de aluminio con una sección de 12.57 cm² (figura 9.15).

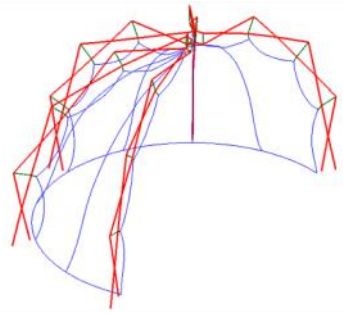
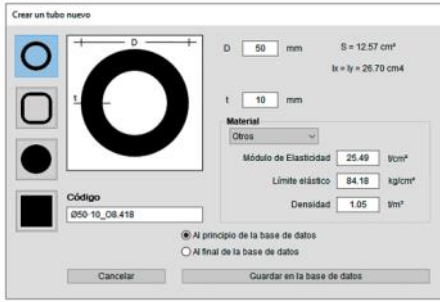


Figura 9.10 Sección barras en los módulos de tijera. Programa WinTess© [137]
Fuente: Elaboración del autor

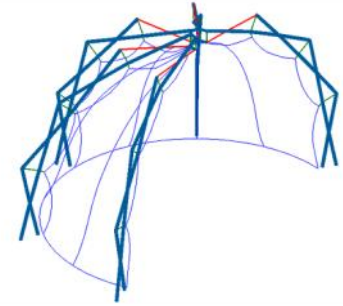
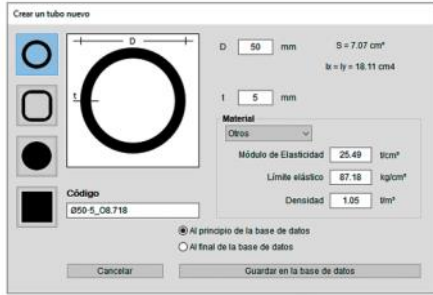


Figura 9.11 Sección barras superiores en los módulos de tijera. Programa WinTess© [137]
Fuente: Elaboración del autor

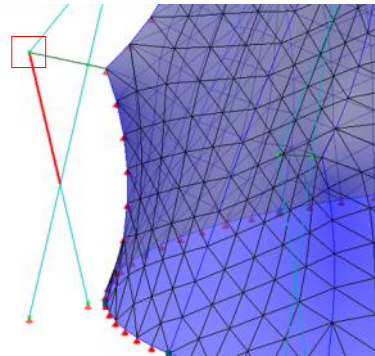


Figura 9.12 Definición de barras articuladas con el módulo de tijera adyacente. Programa WinTess© [137]
Fuente: Elaboración del autor

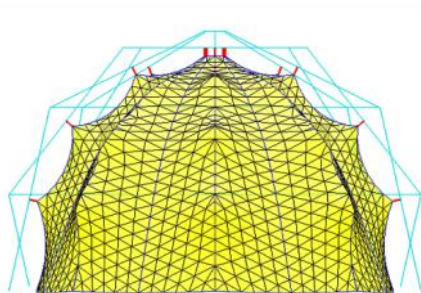


Figura 9.13 Definición cables. Sujeción membrada desde los arcos. Cubierta interior y seccionada. Programa WinTess© [137]
Fuente: Elaboración del autor

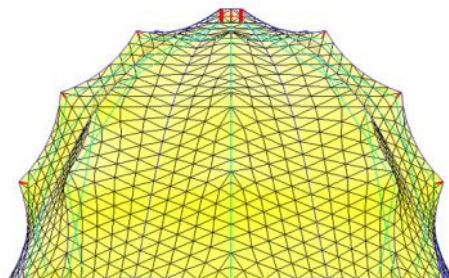
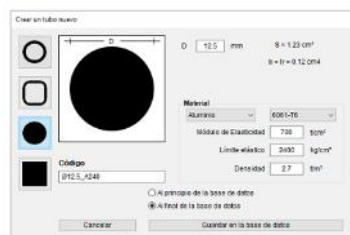


Figura 9.14 Sección barras anillo inferior y superior del nodo. Programa WinTess© [137]
Fuente: Elaboración del autor

Figura 9.15 Sección barras anillo inferior y superior del nodo. Programa WinTess© [137]
Fuente: Elaboración del autor

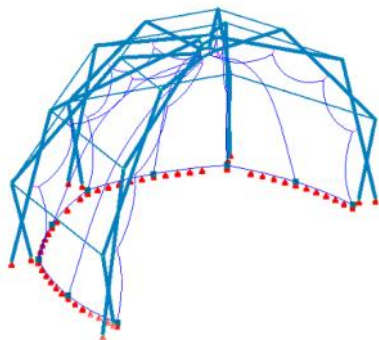
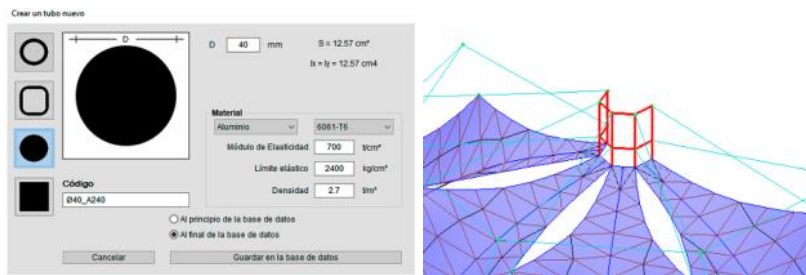


Figura 9.16 Definición de nudos fijos en el borde inferior de la membrana. Programa WinTess© (v. 3.166.24, 2020)
Fuente: Elaboración del autor

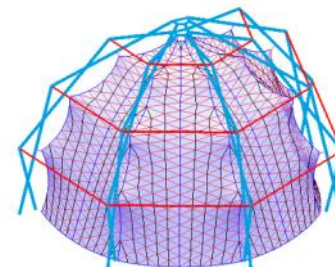
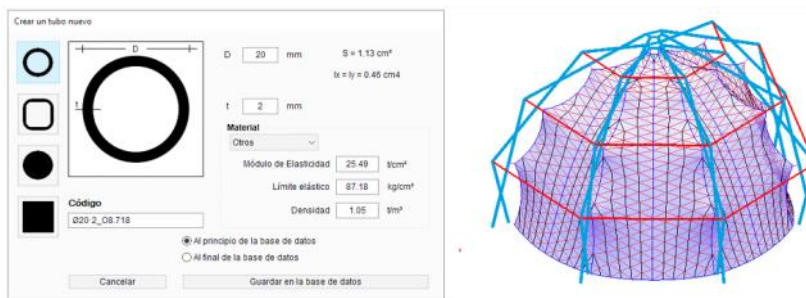
- Se definen los nudos - soportes.

En la membrana estos corresponden a los nudos de la parte inferior de la membrana y en los arcos corresponden a los nudos inferiores del primer módulo de tijera (figura 9.16)

- Rigidizar los arcos en el otro sentido.

Para la simulación, es necesario agregar barras transversales entre semiarcos, que rigidizan la totalidad de estructura, para ello se implementan barras de cartón de menor sección 1.13 cm² (Ø 20 mm x 2 mm) (figura 9.17), y determinadas en el programa como barras rígidas.

Figura 9.17 Barras transversales. Rigidización de arcos. Programa WinTess© [137]
Fuente: Elaboración del autor



- Para definir el material de la membrana, se selecciona la opción más idónea que responda a las necesidades de uso y capacidad de la estructura a proponer. El programa cuenta con una base de datos de diferentes alternativas de material y con la posibilidad de crear nuevos materiales.

Para el caso específico se selecciona una membrana en PVC, tejido poliéster 500D Oxford, revestimiento PU, resistente al agua de 0.18 kg/m² [125]. La figura 9.18 expone las características físicas de material escogido.

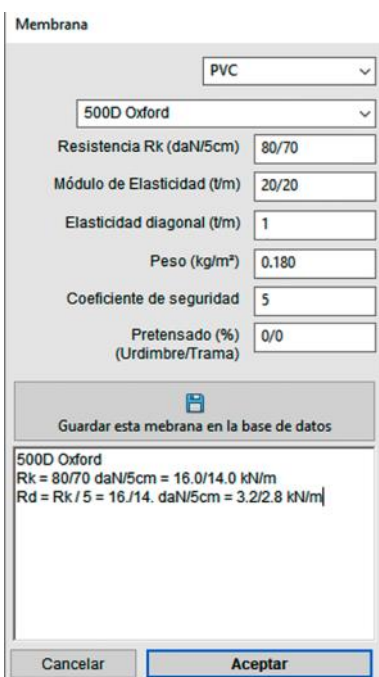


Figura 9.18 Selección material de la membrana. Programa WinTess© [137]
Fuente: Elaboración del autor

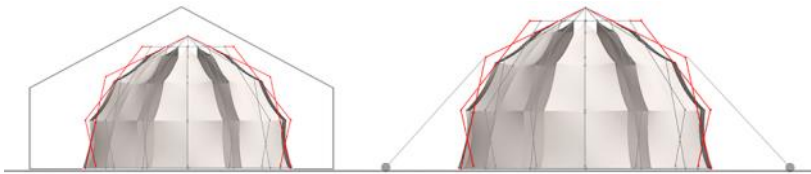


Figura 9.19 Selección material de la membrana.
Programa WinTess© [137]
Fuente: Elaboración del autor

- Finalmente para proceder al cálculo y observar las deformaciones que presenta la estructura, se simula la estructura en dos contextos, dentro de un recinto cerrado y al aire libre (figura 9.19).

Las cargas a aplicar en cada caso corresponden a:

Estructura en recinto cerrado. Carga a aplicar: Peso propio

Estructura al aire libre. Carga a aplicar: Peso propio + Carga de viento total de 50 km/h.

Además en la estructura al aire libre se incluye cables tipos vientos (Cinta_Carga_50x3 Poliéster) para fijar la estructura al terreno y contrarrestar los empujes del viento, que puedan afectar el domo.

Cargas superficiales

Viento

Velocidad real Viento X (km/h) 35.3 W = 12.0 kg/m² Cp manual

Velocidad básica Viento Y (km/h) 35.3 Tipo de edificio (Cp) Cerrado, caras planas

Viento (total) = 49.9 km/h = 13.9 m/s

Cp = Coeficientes eólicos (-)presión (+)succión (Ángulo entre la normal a la superficie y la dirección del viento)

180°	170°	160°	150°	140°	130°	120°	110°	100°	90°	80°	70°	60°	50°	40°	30°	20°	10°	0°
-0.8	-0.8	-0.75	-0.7	-0.65	-0.55	-0.4	0.25	0.45	0.45	0.4	0.45	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4

Nieve (kg/m²) 0 Presión interna (kg/m²) 0 Pretensado de la membrana (%) 0/0

Cancelar Ok

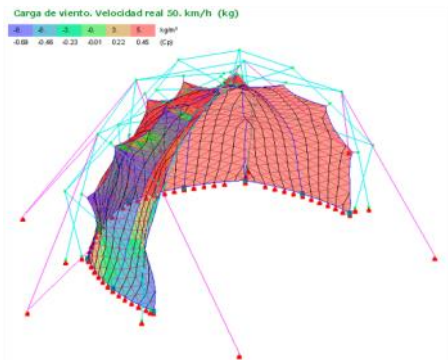


Figura 9.19 Aplicación de cargas sobre la estructura.
Programa WinTess© [137]
Fuente: Elaboración del autor

Definidos todos los parámetros, determinantes, características de materiales y secciones de barras, e introducidos en el programa de simulación, se analizan el comportamiento estructural de las alternativas de tensoestructura como cubiertas más comunes a implementar en la tipología de domos que se proyectan esta investigación. (Ver resultados arrojados por el programa. Anexo 2).

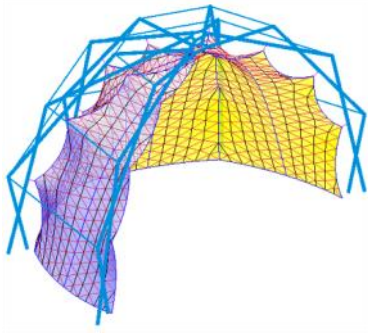


Figura 9.20 Estructura básica de medio domo. Programa WinTess© [137]

Fuente: Elaboración del autor

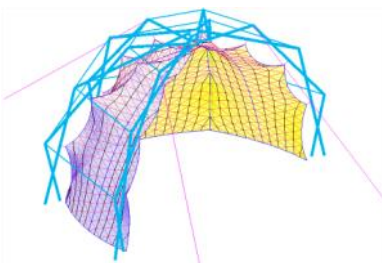


Figura 9.21 Estructura medio domo más cables tipo vientos Programa WinTess© [137]

Fuente: Elaboración del autor

9.3 Cálculo estructural

9.3.1 Cubierta Interior

Se realizan dos modelos de la estructura del domo con la cubierta interior, para analizar el comportamiento de la membrana colgada desde los semiarcos. El primer modelo simula la estructura dentro de un recinto cerrado, es decir la carga aplicada solo refiere al peso propio, eliminando las cargas de viento (figura 9.20).

Y el segundo modelo refiere a la estructura del medio domo al aire libre, es así que las cargas aplicadas a este modelo corresponde al peso propio y carga de viento de 50 km/h, además se incluye a la estructura cables adicionales tipo viento (figura 9.21).

El análisis del comportamiento de la estructura, se presenta en la tabla 9.3, donde se expone de manera comparativa en dos columnas, las gráficas y valores resultantes de la compresiones y tracciones que suceden en la estructura, junto con la deformación y tracción máxima de la membrana, reflejada a través de la opción de Ratio y la escala de colores de la misma.

Esta opción permite visualizar que tan cerca se encuentra la estructura de sobrepasar el coeficiente de seguridad para el límite de cualquier parte de la estructura, siendo el límite máximo el valor "1" representado en rojo en la escala de color [137].

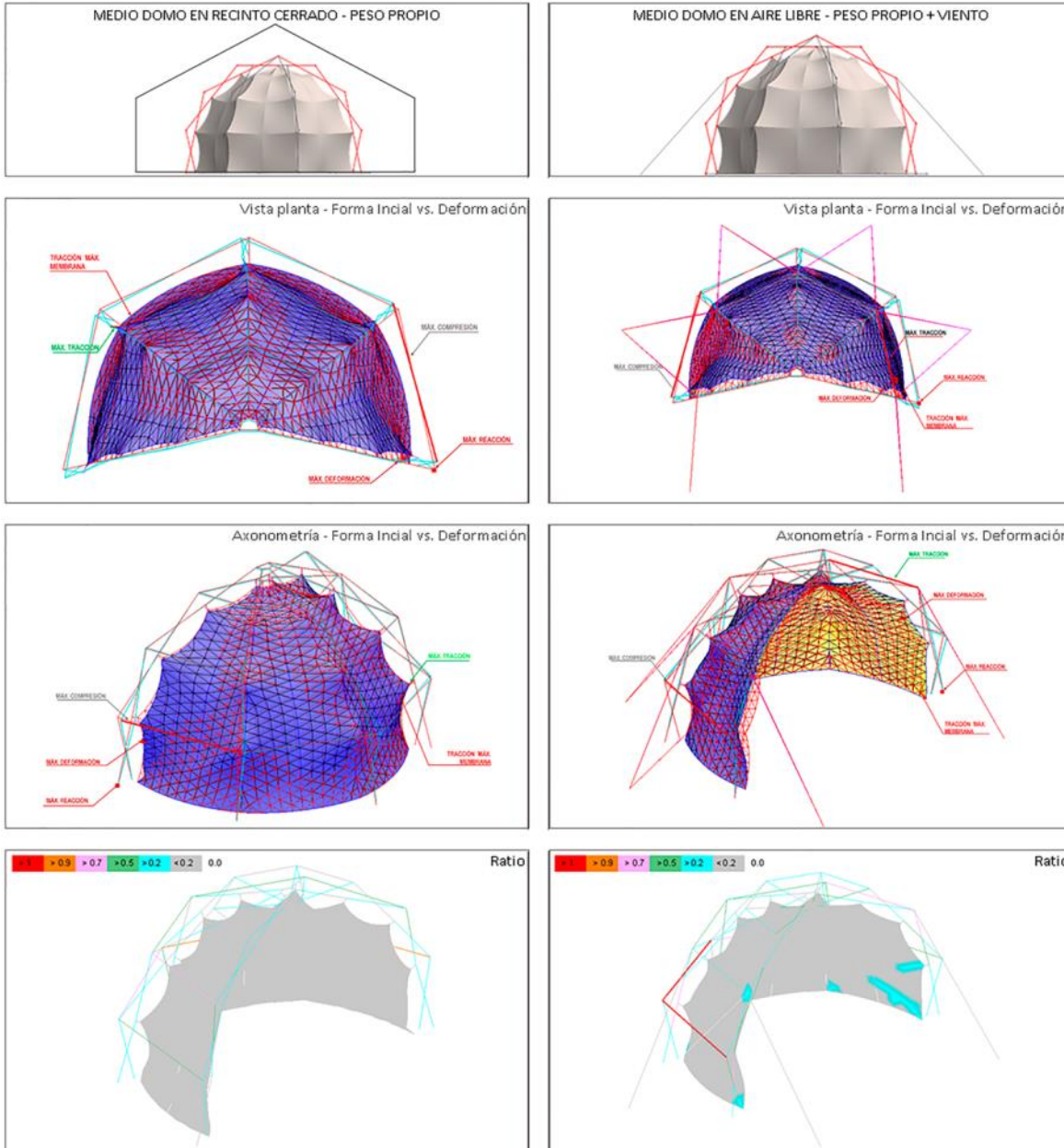
Se observa entonces, en la columna de la izquierda que representa la estructura dentro de un recinto cerrado, que la mayor reacción sucede en el nudo 796, con 0.047 (t), el cual corresponde al apoyo inferior del quinto semiarco.

Este este mismo costado del domo, se observa la máxima deformación de 150 mm, correspondiente al nudo 774. La superposición de los esquemas gráficos en planta y en alzado de la forma inicial de la estructura (en rojo) con la forma final (azul), permite observar el desplazamiento de la membrana hacia atrás, ocurriendo las máximas deformaciones en todo el borde de la membrana que enmarca en alzado el escenario

La máxima compresión sucede en la barra de rigidización 2184, entre el cuarto y quinto semiarco, a la altura del primer módulo de tijera, con un valor de 510 kg/cm² y un ratio de 0.97.

Tabla 9.3 Resultados simulación. Domo desplegable cubierta interior.
Programa WinTess© [137]. Fuente: Elaboración del autor

Cargas aplicadas:
Peso Propio + Viento (X= 35 km/h Y= 35 km/h - total 50 km/h)
Materiales:
Membrana 500D Oxford 0,18 kg/m² - Barras nodo central. Aluminio Ø 12 mm
Sujeción membrana. Cable Acero Galv. 6x19 Ø 3 mm - Vientos. Cinta de carga 50x3 Poliéster.
Estructura semiarcos desplegables : **Tubo de cartón Ø 50 mm x 5 mm**



PESO CABLES	31,3 kg
PESO TUBOS	77,3 kg
PESO MEMBRANA	3,5 kg (19,85 m ²)
SUPERFICIE MEMBRANA	8,01 m ²

PESO CABLES	36,9 kg
PESO TUBOS	77,3 kg
PESO MEMBRANA	3,5 kg (19,85 m ²)
SUPERFICIE MEMBRANA	7,67 m ²

>	Nº Nudo	Rx (t)	Ry (t)	Rz (t)	RT (t)
REACCIONES	796	0,008	-0,006	-0,046	0,047

>	Nº Nudo	Rx (t)	Ry (t)	Rz (t)	RT (t)
REACCIONES	796	0,011	-0,001	-0,045	0,047

DEFORMACIÓN MÁXIMA	Nudo 774	150 mm
--------------------	----------	--------

DEFORMACIÓN MÁXIMA	Nudo 721	259 mm
--------------------	----------	--------

> TENSIONES	Nº Barra	kg/cm ²	Ratio
TRACCIÓN	1614	186	0,05
COMPRESIÓN	2184	510	0,97

> TENSIONES	Nº Barra	kg/cm ²	Ratio
TRACCIÓN	2179	401	0,76
COMPRESIÓN	2181	-692	1,31

TRACCIÓN M Á X. M E M B R A N A	Nº Barra	Nº Nudo	t/metro	kg/5 cm	Ratio
	1264	140-175	0,039	1,9	0,12

TRACCIÓN M Á X. M E M B R A N A	Nº Barra	Nº Nudo	t/metro	kg/5 cm	Ratio
	607	751-787	0,128	6,4	0,4

La máxima tracción sucede en el otro costado del domo, barra 1614 con un valor de 186 kg/cm^2 y un ratio de 0.05. La máxima tracción de la membrana ocurre en la barra 1264, entre el segundo y tercer semiarco a la altura del primer módulo de tijera con un valor de 0.039 t/m y ratio de 0.12.

La representación del ratio de la estructura del domo en un recinto interior soportando la membrana desde el interior de los semiarcos, indica en la gama de colores, un comportamiento acertado y estable de los semiarcos y la membrana, los cuales no sobrepasa el coeficiente de seguridad establecido, aunque el tono gris de la membrana representa la sobredimensión del material, dejando abierta la posibilidad de optar por un material de cubierta más liviano.

Las totalidades naranjas que se visualizan en algunas barras de rigidización entre semiarcos, son consideradas para aumentar su sección, y de esta forma mejorar el comportamiento de la estructura.

En cuanto al comportamiento de la estructura al aire libre, sometida a una carga de viento de 50 km/h , la columna de la derecha en la tabla 9.3 expone los resultados de la simulación, los cuales indican que la mayor reacción sucede en el mismo nudo y con el mismo valor de 0.047 (t) que el caso anterior.

Debido a la carga del viento, se visualiza un mayor desplazamiento de la membrana hacia atrás (forma inicial de la estructura en rojo), donde la deformación máxima registra un mayor valor de 259 mm , en el mismo sector que el caso anterior.

La tracción máxima, se presenta en la barra de rigidización 2179, entre el cuarto y quinto semiarco, a la altura del segundo módulo de tijera, con un valor de 401 kg/cm^2 y ratio de 0.76. La compresión máxima sucede al otro costado de la estructura en la barra 2181 de rigidización entre el primer y segundo semiarco, a la altura del primer módulo de tijera, con un valor de 692 kg/cm^2 y ratio de 1.31.

La tracción máxima de la membrana sucede al costado derecho de la estructura hacia el apoyo inferior, en la barra 607 con un valor de 0.128 t/m y ratio de 0.4.

El esquema resultante del ratio, expone una gama de colores acertada para el comportamiento de la estructura al aire libre. Se observa la tonalidad de gris en un gran porcentaje de la membrana, con manchas de color cian en donde suceden las mayores deformaciones.

La tonalidad de las barras de los semiarcos varía entre verde y cian, estando por debajo del límite de seguridad exigido.

Los cables adicionales denominados vientos y que se definieron como cintas de carga de poliéster presentan una totalidad gris, lo que lleva a replantear su sección a un menor tamaño.

Finalmente las tonalidades rojas suceden en aquellas barras que sobrepasan el límite de seguridad de 1, la simulación arroja que, nuevamente en las barras de rigidización presentan esta totalidad y se ha de replantear la sección en los elementos de mayor longitud.

9.3.2 Cubierta Exterior

Nuevamente para este caso de estudio se realizan dos modelos de la estructura del domo con la cubierta exterior, para analizar el comportamiento de la estructura estando la membrana apoyada sobre los semiarcos y emplazada dentro de un recinto cerrado y al aire libre (carga de viento de 50 km/h).

La tabla 9.4 representa las gráficas y valores resultantes de la simulación en dos columnas, la columna de la izquierda expone los valores de la estructura dentro de un recinto cerrado, donde la carga aplicada solo refiere al peso propio de la estructura. Y la columna de la derecha refiere a la estructura de domo ubicado al aire libre, aquí la carga aplicada corresponde al peso propio más la carga del viento.

Se observa, que debido a las características físicas y de posicionamiento de la membrana, los valores del peso de los cables y de la membrana aumentan, así como la superficie de la misma, incrementando directamente el valor del peso propio de la estructura.

Para el caso del domo dentro de un recinto cerrado, se observa que la mayor reacción sucede en el nudo 33, con 0.059 (t), el cual corresponde apoyo inferior del quinto semiarco, al igual que el anterior caso de estudio (cubierta interior).

Sobre el mismo costado del domo se observa la máxima deformación de 108 mm en el nudo 38, a media altura del primer módulo de tijera, junto con la máxima tracción, situada en la barra 2275, con un valor de 561 kg/cm² y un ratio de 0.39.

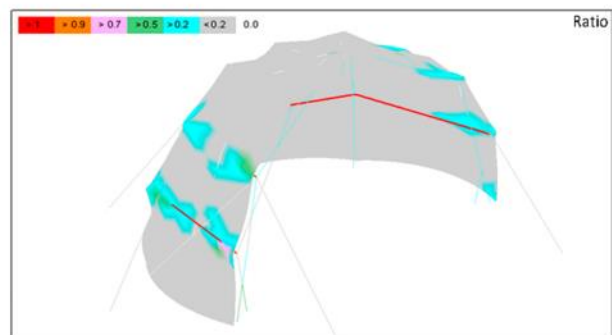
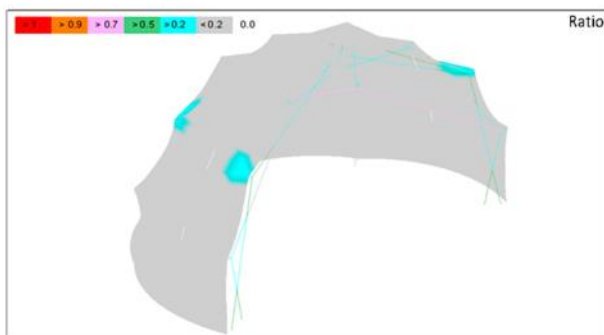
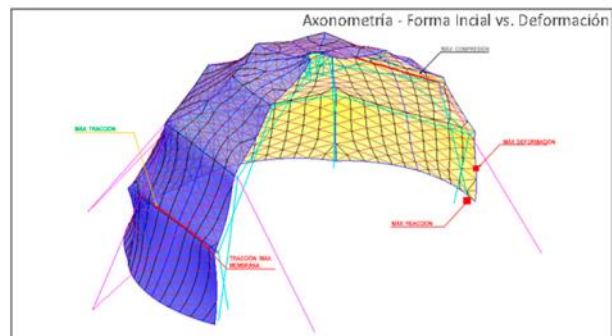
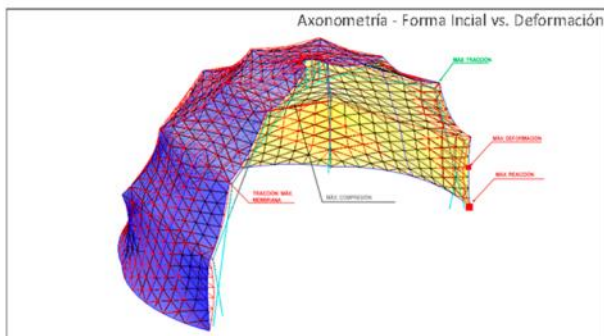
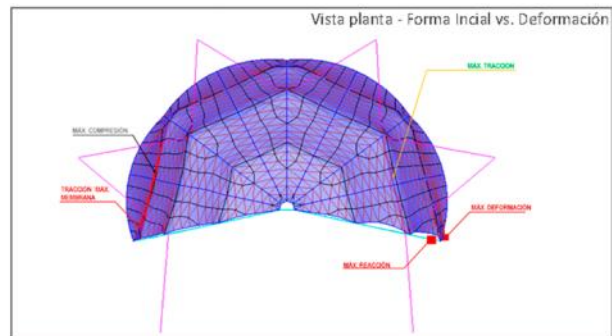
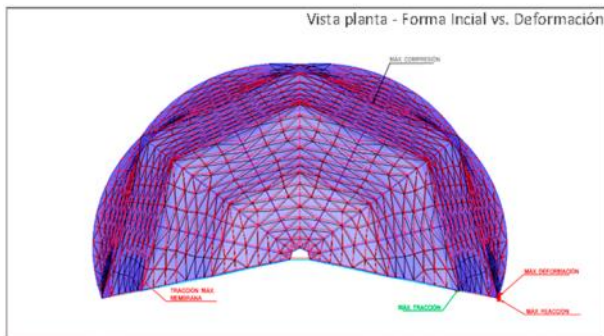
La máxima compresión sucede en la barra de rigidización 558, entre el tercer y cuarto semiarco, a la altura del primer módulo de tijera, con un valor de 433 kg/cm² y un ratio de 0.82.

Y la máxima tracción de la membrana, ocurre al costado izquierdo del escenario, a la altura del segundo módulo de tijera en la barra 1664, con un valor de 0.084 (t) y ratio de 0.26.

La representación de la gráfica del ratio, permite ver las zonas de la membrana que se acercan a un ratio de 0.5 y presentan una tonalidad cyan, junto con las barras de los semiarcos que también tienden a la totalidad verde.

Tabla 9.4 Resultados simulación. Domo desplegable cubierta exterior.
Programa WinTess© [137]. Fuente: Elaboración del autor

Cargas aplicadas:
Peso Propio + Viento (X= 35 km/h Y= 35 km/h - total 50 km/h)
Materiales:
Membrana 500D Oxford 0,18 kg/m² - Barras nodo central. Aluminio Ø 12 mm
Sujeción membrana. Cable Acero Galv. 6x19 Ø 3 mm - Vientos. Cinta de carga 50x3 Poliéster.
Estructura semiarcos desplegables : Tubo de cartón Ø 50 mm x 5 mm



PESO CABLES	61,3 kg
PESO TUBOS	81,4 kg
PESO MEMBRANA	5,2 kg (29,10 m ²)
SUPERFICIE MEMBRANA	12,95 m ²

PESO CABLES	92,6 kg
PESO TUBOS	75,4
PESO MEMBRANA	5,2 kg (29,10 m ²)
SUPERFICIE MEMBRANA	12,73m ²

>	Nº Nudo	Rx (t)	Ry (t)	Rz (t)	RT (t)
REACCIONES	33	-0,010	0,000	-0,058	0,059

>	Nº Nudo	Rx (t)	Ry (t)	Rz (t)	RT (t)
REACCIONES	794	0,012	0,000	-0,055	0,057

DEFORMACIÓN MÁXIMA	Nudo 38	108 mm
--------------------	---------	--------

DEFORMACIÓN MÁXIMA	Nudo 790	202 mm
--------------------	----------	--------

> TENSIONES	Nº Barra	kg/cm ²	Ratio
TRACCIÓN	2275	561	0,39
COMPRESIÓN	558	-433	0,82

> TENSIONES	Nº Barra	kg/cm ²	Ratio
TRACCIÓN	2260	250	0,47
COMPRESIÓN	1680	-1282	2,43

TRACCIÓN MÁX. MEMBRANA	Nº Barra	Nº Nudo	t/metro	kg/5 cm	Ratio
	1664	704-715	0,084	4,2	0,26

TRACCIÓN MÁX. MEMBRANA	Nº Barra	Nº Nudo	t/metro	kg/5 cm	Ratio
	1679	23-42	0,251	12,6	0,79

Pero en un gran porcentaje, la membrana presenta una totalidad gris, que responde al correcto funcionamiento estructural del domo dentro de un recinto cerrado con la cubierta exterior.

Para el caso de la cubierta exterior ubicada al aire libre, los resultados arrojan que la mayor reacción sucede en el nudo 794 con 0.057 (t), el cual corresponde apoyo inferior del quinto semiarco, como se ha registrado en los casos anteriores.

La deformación máxima se presenta en el nudo 794, en el mismo sector que en el caso anterior (cubierta exterior en recinto cerrado), al costado izquierdo del domo, sobre el borde de la membrana y a media altura de primer módulo de tijera, con un valor de 202 mm.

En cuando al registro de los valores de tracción y compresión, la máxima tracción sucede en la barra de rigidización 2260, al costado izquierdo del domo, entre el primer y cuarto semiarco, a la altura del primer módulo de tijera, con un valor de 250 kg/cm² y un ratio de 0.47. Y la máxima compresión se registra hacia el costado derecho, en la barra de rigidización 1690, entre el cuarto y quinto semiarco, a la altura del segundo módulo de tijera, con un valor de 1282 kg/cm² y un ratio de 2.43, sobrepasando el límite de seguridad.

La máxima tracción de la membrana, ocurre nuevamente al costado izquierdo del escenario, a la altura del primer módulo de tijera en la barra 1679, con un valor de 0.251 (t) y ratio de 0.79.

El esquema del ratio expone en la membrana, un mayor número de sectores con totalidades cian y verdes principalmente ubicados en el primer huso (sector entre el primer y segundo semiarco), pero dentro del rango que no sobrepasa el coeficiente de seguridad. Al igual que el comportamiento de las barras de los semiarcos que no registran totalidades rojas.

En cambio en algunas barras de rigidización entre semiarcos, si que se presentan tonalidades rojas, lo que lleva a replantear nuevamente la sección de las barras de mayor longitud.

9.3.3 Cubierta Seccionada

El último caso de estudio refiere al posicionamiento y diseño de cubierta seccionada, cuatro secciones de membrana sujeta entre los semiarcos que componen el domo desplegable. La tabla 9.5 expone los resultados de esta simulación en las dos circunstancias aplicadas al domo, dentro de un recinto cerrado y al aire libre con una carga adicional del viento de 50 km/h.

Se observa en la columna izquierda de la tabla 9.5, que corresponde a la simulación del domo en un recinto cerrado, que la mayor reacción sucede en el nudo 842 con 0.043 (t), al igual que los casos de estudio anteriores, la mayor reacción ocurre en el apoyo exterior inferior del quinto semiarco.

La máxima deformación, ocurre al costado izquierdo de la sección tres de membrana, a la altura del tercer módulo de tijera, registrando un valor de 34 mm en el nudo 303.

La máxima tracción sucede en la tercera sección de membrana, en la cúspide donde se localiza el nodo central que recibe todos los semiarcos. La barra específica 1664, corresponde a la barra horizontal inferior de nodo central con un valor de 25 kg/cm² y un ratio de 0.02.

La máxima compresión se registra en la barra de rigidización 2234, al costado izquierdo del domo a la altura del primer módulo de tijera, entre el primer y segundo semiarco, con un valor de 241 kg/cm² y un ratio de 0.46

Y la máxima tracción de la membrana, ocurre nuevamente en la cúspide sobre la cuarta sección de membrana, en la barra 2196 con un valor de 0.007 (t) y ratio de 0.02.

En la gráfica del ratio del domo en un recinto cerrado y soportando cuatro secciones de membrana, no se visualizan totalidades rojas, la mayoría de las barras de los semiarcos se representa en color cian, demostrando el correcto comportamiento de la estructura por debajo del coeficiente de seguridad. Las membranas se representan todas en tonalidad gris, pudiendo replantear las características físicas del material por un material más ligero.

En el caso de domo al aire libre con cubierta seccionada, se aplican las cargas correspondientes al peso propio de la estructura, más la carga de viento (50 km/h). Los valores se exponen en la columna de la derecha de la tabla 9.5, donde se observa nuevamente que la mayor reacción ocurre en el apoyo exterior inferior del quinto semiarco, específicamente en el nudo 846 con 0.075 (t).

La máxima deformación, ocurre al costado izquierdo en la primera sección de membrana, a la altura del segundo módulo de tijera, con un valor de 36 mm en el nudo 452.

La máxima tracción sucede en la barra de rigidización al costado derecho del domo, entre el cuarto y quinto semiarco, a la altura del segundo módulo de tijera, la barra 2244 registra un valor de 204 kg/cm² y un ratio de 0.39.

La máxima compresión se presenta, como en caso anterior, en la barra de rigidización 2234, al costado izquierdo del domo a la altura del primer módulo de tijera, entre el primer y segundo semiarco, pero en esta ocasión y debido a la carga de viento su valor aumenta a 357 kg/cm² y un ratio de 0.68

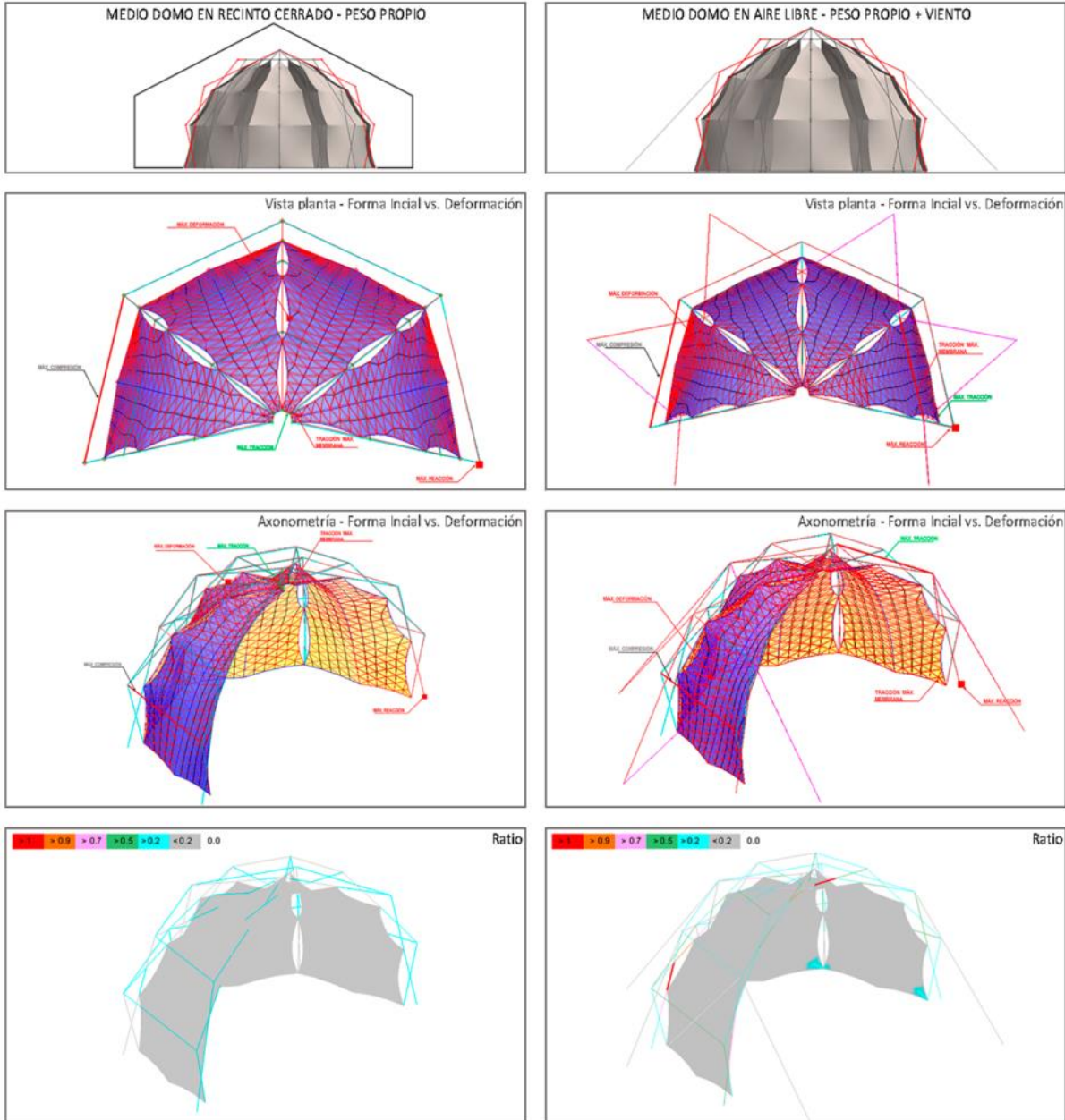
Y la máxima tracción de la membrana, sucede en la barra 1735, en la parte inferior y hacia el exterior de la cuarta sección, con un valor de 0.068 (t) y ratio de 0.21.

Finalmente se visualiza en el esquema de totalidades del ratio, aquellos sectores de la estructura que tienden a sobrepasar el coeficiente de seguridad de "1". En rojo y naranja se observan algunas barras de los semiarcos, específicamente las barras horizontales que se conectan en la cúspide al nodo central, correspondiente al primer y último semiarco. Y las barras cortas, a la altura del segundo módulo de tijera ubicadas en el segundo semiarco.

Aunque la mayoría de las barras de los semiarcos, se comportan de manera adecuada presentando un color cian en la mayoría de estos elementos, no obstante, se ha de tener en cuenta las circunstancias meteorológicas al emplazar el domo al aire libre, ya que el aumento de la carga de viento puede provocar el colapso de la estructura.

Tabla 9.5 Resultados simulación. Domo desplegable cubierta exterior.
Programa WinTess© [137]. Fuente: Elaboración del autor

Cargas aplicadas:
Peso Propio + Viento (X= 35 km/h Y= 35 km/h - total 50 km/h)
Materiales:
Membrana 500D Oxford 0,18 kg/m² - Barras nodo central. Aluminio Ø 12 mm
Sujeción membrana. Cable Acero Galv. 6x19 Ø 3 mm - Vientos. Cinta de carga 50x3 Poliéster.
Estructura semiarcos desplegables : **Tubo de cartón Ø 50 mm x 5 mm**



PESO CABLES	11,0 kg
PESO TUBOS	80,7 kg
PESO MEMBRANA	3,5 kg (19,74 m ²)
SUPERFICIE MEMBRANA	7,55 m ²

PESO CABLES	16,7 kg
PESO TUBOS	80,7 Kg
PESO MEMBRANA	3,5 kg (19,74 m ²)
SUPERFICIE MEMBRANA	7,39 m ²

>	Nº Nudo	Rx (t)	Ry (t)	Rz (t)	RT (t)
REACCIONES	842	0,007	-0,002	-0,043	0,043

>	Nº Nudo	Rx (t)	Ry (t)	Rz (t)	RT (t)
REACCIONES	846	0,013	-0,006	-0,074	0,075

DEFORMACIÓN MÁXIMA	Nudo 303	34 mm
--------------------	----------	-------

DEFORMACIÓN MÁXIMA	Nudo 452	36 mm
--------------------	----------	-------

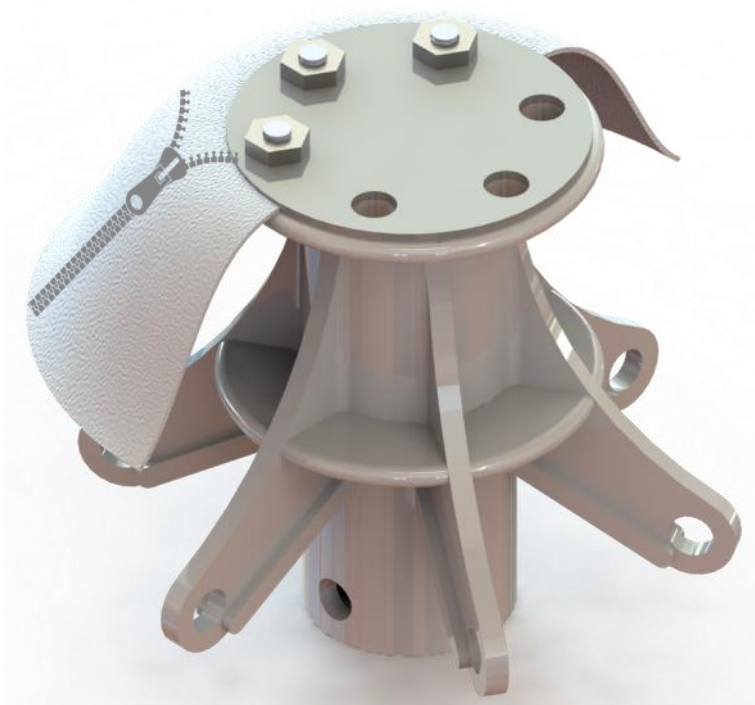
> TENSIONES	Nº Barra	kg/cm ²	Ratio
TRACCIÓN	1664	25	0,02
COMPRESIÓN	2234	-241	0,46

> TENSIONES	Nº Barra	kg/cm ²	Ratio
TRACCIÓN	2244	204	0,39
COMPRESIÓN	2234	-357	0,68

TRACCIÓN MÁX. MEMBRANA	Nº Barra	Nº Nudo	t/metro	kg/5 cm	Ratio
	2196	685-691	0,007	0,3	0,02

TRACCIÓN MÁX. MEMBRANA	Nº Barra	Nº Nudo	t/metro	kg/5 cm	Ratio
	1735	811-840	0,068	3,4	0,21

Figura 9.33 Detalle sujeción
cubierta exterior nodo-membrana
Fuente: Elaboración del autor



9.4 Detalles y conexiones

Para garantizar el correcto funcionamiento de la membrana, los puntos de sujeción y anclaje de la tela a la estructura específica deberán responder adecuadamente a los esfuerzos solicitados, además de adaptarse a los diferentes estados de plegado de la estructura, garantizando la seguridad y estabilidad de la estructura durante su proceso de despliegue y pliegue.

Houtman y Werkman [42] priorizan en las características esenciales a tener en cuenta a la hora de proyectar los detalles para las tensoestructuras:

Los detalles de estructuras de membrana deberán ser sencillos flexibles, con una configuración mínima, que exprese sus propias características textiles, tan diferentes de las de otras tecnologías constructivas. Los detalles deberán ser tan proporcionados a la estructura y expresar el carácter del material utilizado.

De esta forma, el presente apartado describe los principales anclajes de la membrana a los semiarcos desplegables en cada una de las alternativas de cubiertas analizadas, proponiendo diferentes soluciones técnicas compatibles con la estética arquitectónica y estructural de los domos desplegables propuestos.

Se exponen los componentes principales que conforman la solución técnica para la sujeción de la membrana a los semiarcos, al nodo central y a la parte inferior del domo, en la cubierta interior, exterior y seccionada, con el objetivo de posicionar la tela correctamente al final de la etapa de despliegue del domo.

Cabe aclarar que debido a las características de montaje de la estructura, para facilitar el proceso de despliegue y pliegue de la estructura en conjunto con la cubierta, la membrana es preinstalada cuando los semiarcos están en posición plegada. Esta se distribuye en patrones longitudinales que se enlazan a través del sistema de cremallera una vez los semiarcos desplegados conforman la geometría de domo específico, proporcionando a través de la tracción del textil una mayor estabilidad del conjunto estructural (ver apartado 9.2.1).

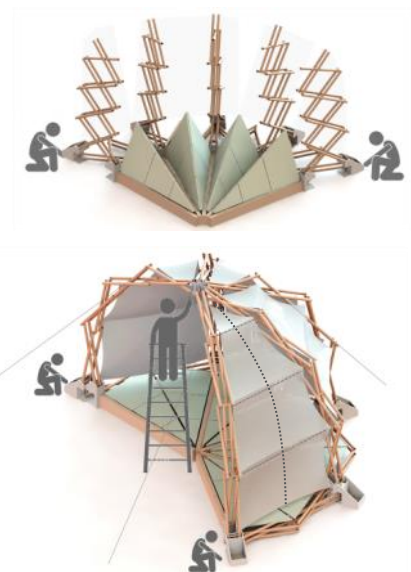


Figura 9.22 Preinstalación de las secciones de membrana cuando los semiarcos están plegados. Fuente: Elaboración del autor

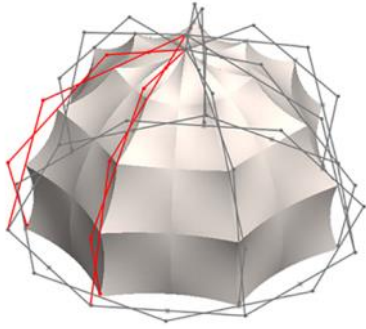


Figura 9.23 Esquema domo desplegable con cubierta interior.
Fuente: Elaboración del autor

9.4.1 Sujeción cubierta interior

Las posibles soluciones técnicas para sujetar la membrana desde la parte interior de los semiarcos, posicionando los puntos de anclaje en las articulaciones entre módulos de tijeras, pueden ser muy variadas. Partiendo del pasador transversal que articula los módulos de tijeras paralelos que conforman los semiarcos desplegables, como punto de anclaje, es posible proyectar desde la simplicidad de una cuerda o brida atada en el medio del pasador que sujeta el mosquetón específico fijado a la membrana

Bajo este mismo principio se expone un par de soluciones más técnicas, una abrazadera que incorpora un perno que se articula perpendicularmente a la membrana. Para ello es necesario que la membrana, en el área de sujeción, incorpore un ollao reforzado con pletinas que permita que el perno atraviese el textil y finalmente se asegure el anclaje entre ambos componentes con una tuerca de seguridad (figuras 9.24 y 9.25).

También se propone que en vez de perno, la abrazadera al pasador incorpore en su diseño una pletina que contenga un agujero para recibir un mosquetón fijado a la membrana, el cual incluye las debidas pletinas de refuerzo para evitar el daño del textil en este punto. Esta solución evita perforar la tela, pero incluye más número de accesorios (figura 9.26), aunque ambas soluciones son viables constructivamente, se ha de tener en cuenta que se requiere de un proceso de fabricación específico a medida de la abrazadera, así que la decisión acertada puede depender de un comparativo de costes.



Figura 9.24 Detalle sujeción cubierta interior con abrazadera y perno. Fuente: Elaboración del autor

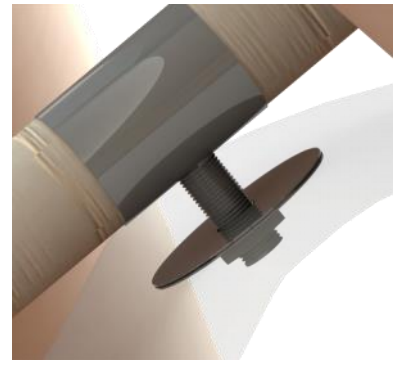
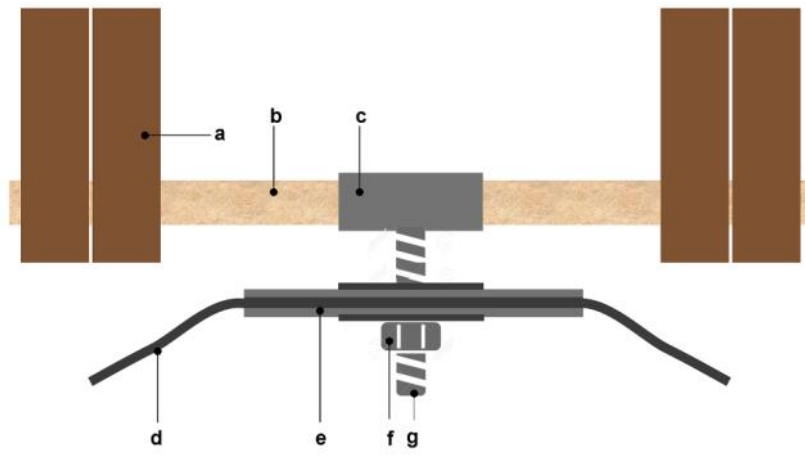


Figura 9.25 Izquierda: Plano detalle sujeción cubierta interior con abrazadera y perno

- a) Barra tijera
- b) Pasador
- c) Abrazadera
- d) Membrana. Membrana.

Incluye cintas de refuerzo a lo largo del perímetro

e) Pletina de refuerzo alrededor del ollao

f) Tuerca de seguridad

g) Perno de sujeción

Derecha: Imagen 3d detalle.

Fuente: Elaboración del autor

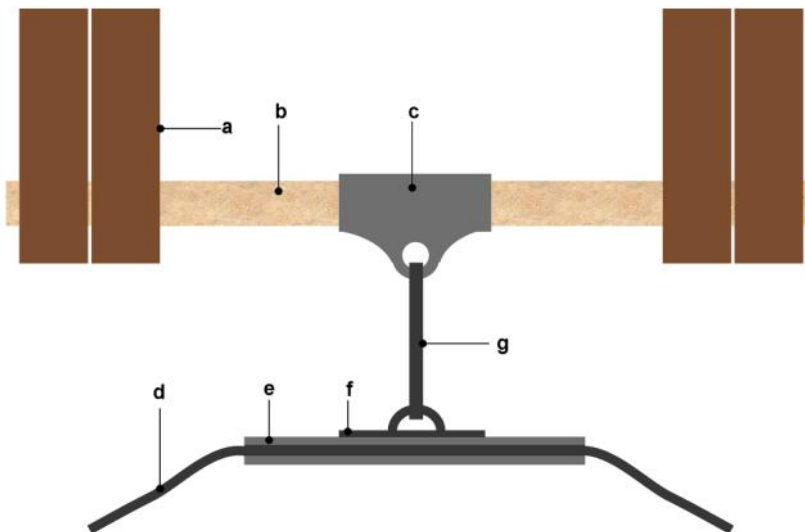


Figura 9.26 Izquierda: Plano detalle sujeción cubierta interior con abrazadera, pletina y mosquetón.

a) Barra tijera

b) Pasador

c) Abrazadera pletina

d) Membrana. Incluye cintas de refuerzo a lo largo del perímetro

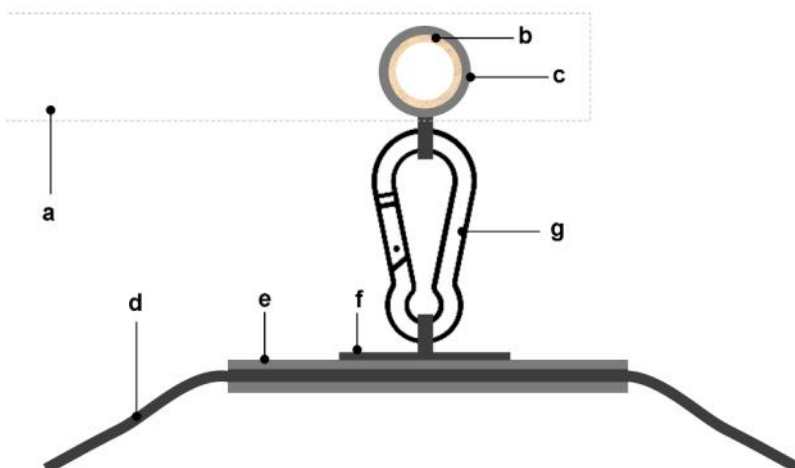
e) Pletina de refuerzo

f) Pletina anclaje mosquetón

g) Mosquetón

Derecha: Imagen 3d detalle.

Abajo: Vista lateral detalle



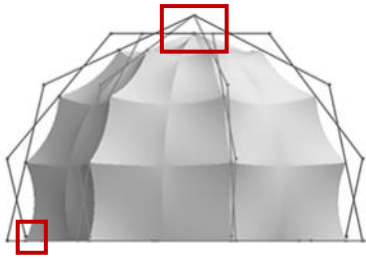


Figura 9.27 Esquema domo desplegable con cubierta interior. Puntos de anclaje superior e inferior. Fuente: Elaboración del autor

Una vez desplegada la estructura y se ha obtenido la elevación en conjunto de los semiarcos con las secciones de membrana, se procede a estabilizar la estructura del domo conectando los extremos de los semiarcos al nodo principal y así mismo la membrana debe ir sujeta a este punto superior y asegurarse a la base inferior del domo para finalizar el montaje de la estructura (figura 9.27).

Al tratarse de la cubierta interior, se propone como solución de anclaje a la cúspide, un sistema de sujeción que cuelgue desde la parte inferior de nodo, para ello es necesario que el diseño de nodo incorpore en su base la tipología del anclaje a utilizar.

Como en el ejemplo anterior, se propone dos soluciones técnicamente viables. Por una parte la implementación de pernos roscados al nodo principal, estos atraviesan el textil que incluye los ollaos correspondientes, reforzados con pletinas, de tal manera que se asegure el sistema y se eviten posibles rasgaduras, el sistema de anclaje nodo - membrana, es asegurado con las tuercas que mantienen la membrana en su posición final (figura 9.28)

También su puede implementar el sistema de mosquetón como segunda alternativa, en vez de pernos en el nodo, se incluyen armellas que reciban los mosquetones sujetos a la membrana. Esta solución facilita y optimiza el sistema de montaje debido a lo práctico de manipular y asegurar un mosquetón (figura 9.29).

El siguiente punto de anclaje corresponde al sujeción de la membrana en la base del domo, la solución que se presenta tanto para la cubierta interior como exterior se basa en el mismo lenguaje de alternativas presentadas, se trata de implementar una placa fijada a la plataforma del escenario que incorpora un perno que recibe y atraviesa el textil. La membrana incluye un dobladillo adicional para fijar la tela y que contenga una solape para evitar filtraciones por lluvia (figura 9.30).

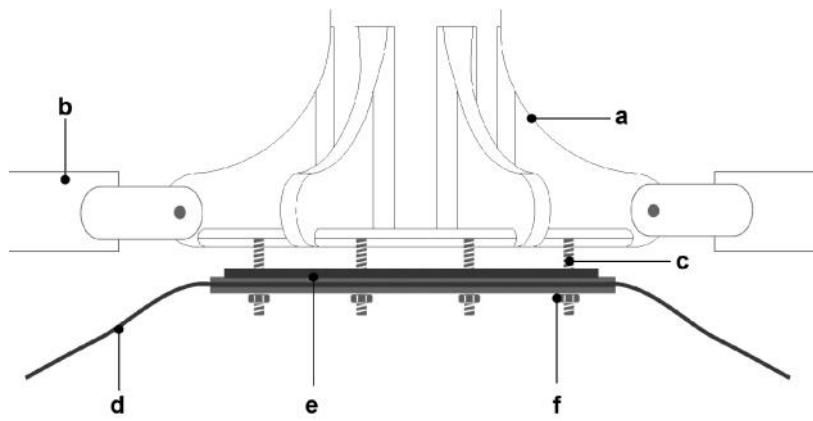


Figura 9.28 Detalle sujeción cubierta interior nodo-perno
 a) Nodo
 b) Barra tijera
 c) Perno de sujeción
 d) Membrana. Incluye cintas de refuerzo a lo largo del perímetro
 e) Pletina de refuerzo alrededor de los ollaos
 f) Tuerca de seguridad
 Fuente: Elaboración del autor

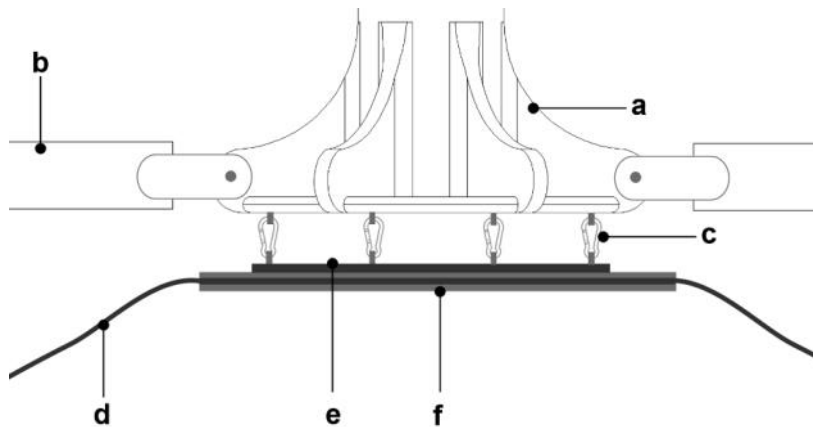


Figura 9.29 Detalle sujeción cubierta interior nodo-mosquetón
 a) Nodo. Incluye armellas
 b) Barra tijera
 c) Mosquetón
 d) Membrana. Incluye cintas de refuerzo a lo largo del perímetro
 e) Pletina sujeción mosquetones
 f) Pletina de refuerzo
 Fuente: Elaboración del autor

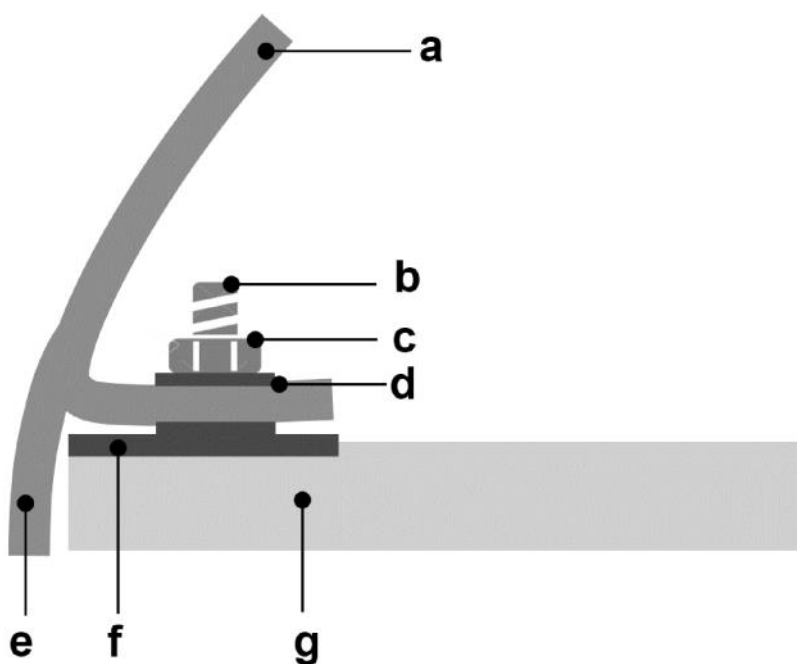


Figura 9.30 Detalle sujeción inferior cubierta interior
 a) Membrana. Incluye cintas de refuerzo a lo largo del perímetro
 b) Perno
 c) Tuerca de seguridad
 d) Pletina de refuerzo
 e) Solape membrana
 f) Plana de anclaje a plataforma
 g) Plataforma escenario
 Fuente: Elaboración del autor

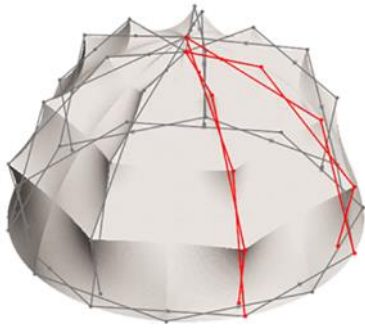


Figura 9.31 Esquema domo desplegable con cubierta exterior.
Fuente: Elaboración del autor

9.4.2 Sujeción cubierta exterior

La propuesta para la tipología de anclaje entre semiarcos y la cubierta exterior consiste en el mismo principio de abrazadera - perno sobre el pasador que articula los módulos de tijera (figura 9.32), esta propuesta se presenta como una solución de fácil implementación e instalación para el correcto posicionamiento de la membrana durante su preinstalación y proceso de despliegue, es una solución viable, vista en otras aplicaciones que anteceden esta investigación (figura 2.169).

Esta propuesta debe ajustar el diámetro y espesor del perno de acuerdo a la proporción de la estructura y membrana a recibir. Entre más largo el perno, se genera una mayor altura entre valles y crestas en la geometría de la cubierta, reduciendo el contacto de la tela con los semiarcos, pero que aumentaría la sección de perno, siendo una variable poco recomendable al buscar la ligereza en el conjunto estructural. En cambio entre más corto el perno, la sección del mismo se reduce y los semiarcos colaborarían en el apoyo de la cubierta, habrá de tener en cuenta el correcto plegado del textil durante las etapas de despliegue de la estructura de tal manera que no interfiera en la estabilidad del conjunto.

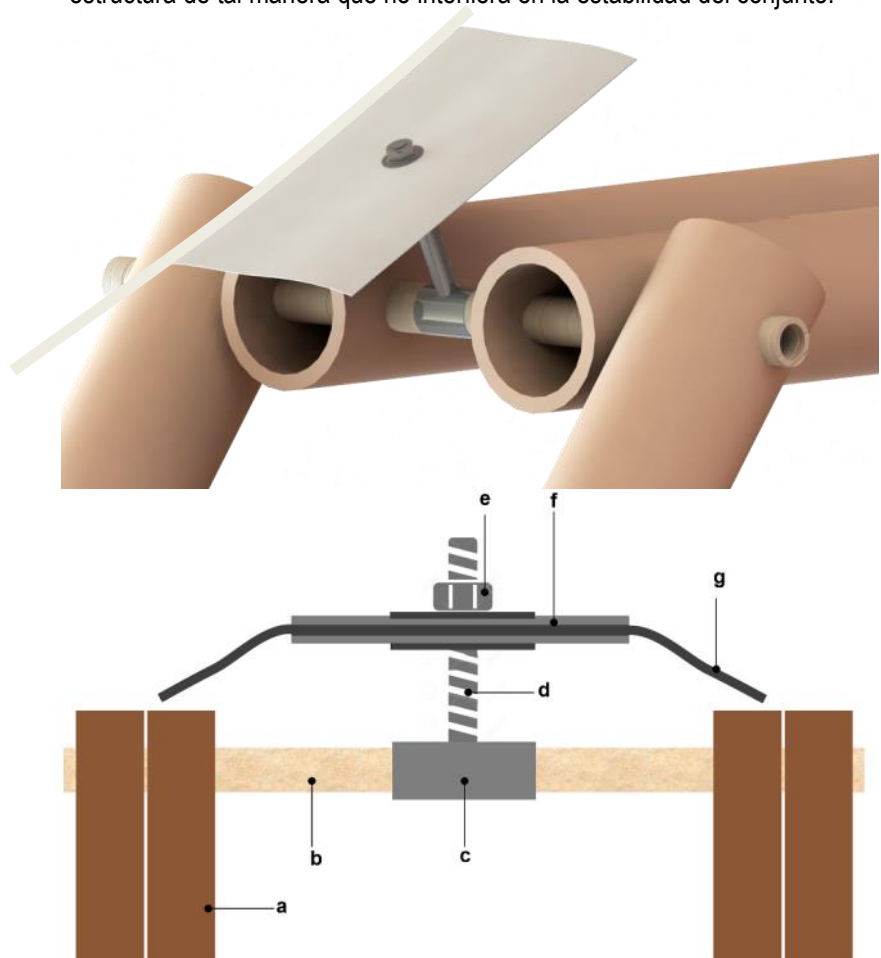


Figura 9.32 Detalle sujeción cubierta exterior nodo-perno
Arriba : Imagen 3d del detalle
Abajo: Plano detalle
a) Barra tijera
b) Pasador
c) Abrazadera
d) Perno de sujeción
e) Tuerca de seguridad
f) Pletina de refuerzo alrededor del ollao
g) Membrana. Incluye cintas de refuerzo a lo largo del perímetro
Fuente: Elaboración del autor

La solución para el anclaje de la cubierta exterior sobre el nodo principal, se proyecta con el mismo lenguaje técnico del perno, ya que son accesorios industriales fáciles de conseguir y asimismo con diferentes dimensiones que se adaptan a los requerimientos y proporciones de la cubierta y domo a implementar.

Para este caso, la parte superior del nodo debe incorporar una pletina base que contenga los pernos o permita la llegada de estos a través de agujeros roscados, y de esta forma realizar la conexión entre ambos componentes (textil y nodo). La membrana debe prever la realización de los ollaos adecuados para el paso de los pernos, asegurando el sistema y protección de la tela con las debidas pletinas de refuerzo y si se requiere incluir en este punto doble capa de tela, y así finalmente fijar la posición de la membrana con el sistema de tuercas de seguridad que garantice la correcta posición de cubierta durante el uso de la estructura (figura 9.33).

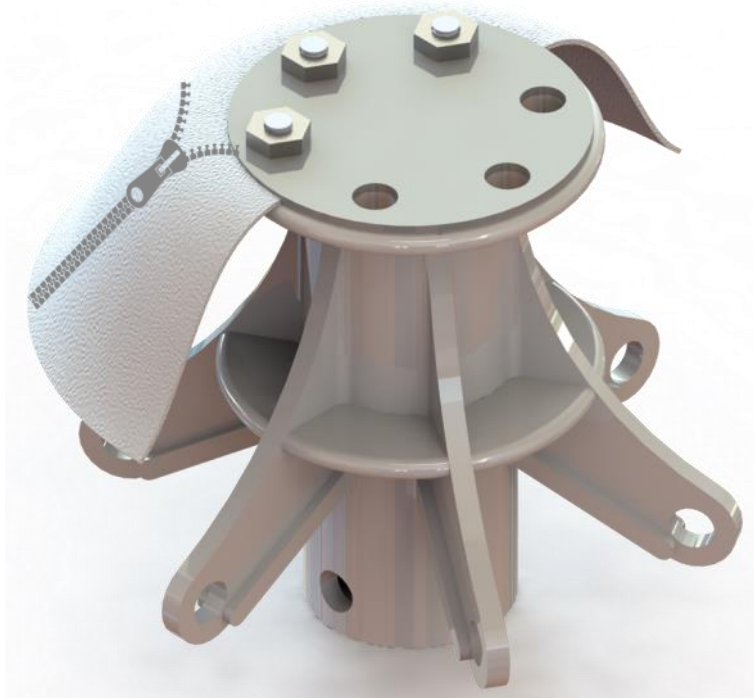
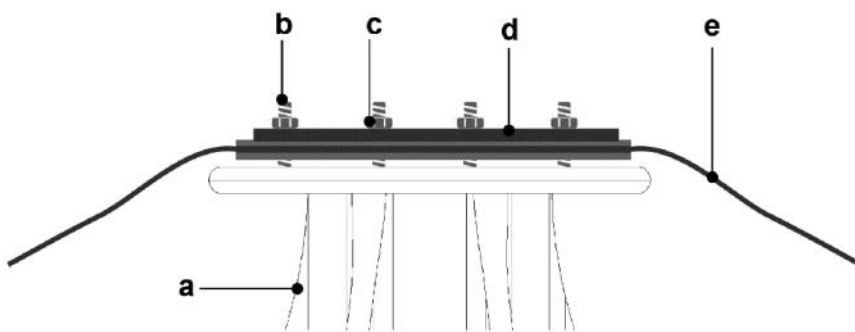


Figura 9.33 Detalle sujeción cubierta exterior nodo-membrana
 Arriba: Plano detalle
 a) Nodo. Incluye agujeros roscados para pernos
 b) Perno de sujeción
 c) Tuerca de seguridad
 d) Pletina de refuerzo
 e) Membrana. Incluye cintas de refuerzo a lo largo del perímetro
 Abajo: Imagen 3d del detalle
 Fuente: Elaboración del autor

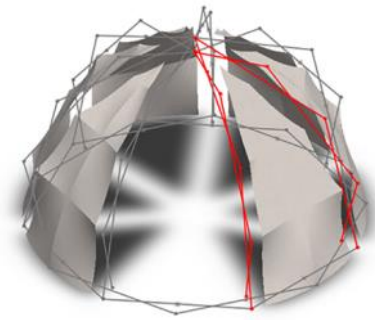


Figura 9.34 Esquema domo desplegable con cubierta seccionada.

Fuente: Elaboración del autor

9.4.3 Sujeción cubierta seccionada

La opción de cubierta seccionada al tratarse de secciones modulares independientes que se posicionan entre los semiarcos, es una alternativa sencilla, de fácil manipulación, fabricación e instalación.

Se propone como solución de anclaje de la membrana a la estructura, dos propuestas viables que consisten en abrazaderas que incorporan una pletina agujereada que recibe el mosquetón que enlaza ambos componentes (lona y semiarco).

En un primer caso, se propone el punto de anclaje sobre el pasador, la abrazadera debe adaptarse al diámetro de dicho elemento y asegurar su fijación y capacidad de carga para soportar la tracción que ejerce el mosquetón que sujeta el punto perimetral de membrana en caso de un esfuerzo intempestivo (figuras 9.35 y 9.36).

La segunda alternativa, posiciona la abrazadera sobre el extremo de las barras exteriores de cada módulo de tijera, el mecanismo de conexión entre el textil y estructura sería el mismo, a través del mosquetón que se sujeta a la membrana (figura 9.35 y 9.37).

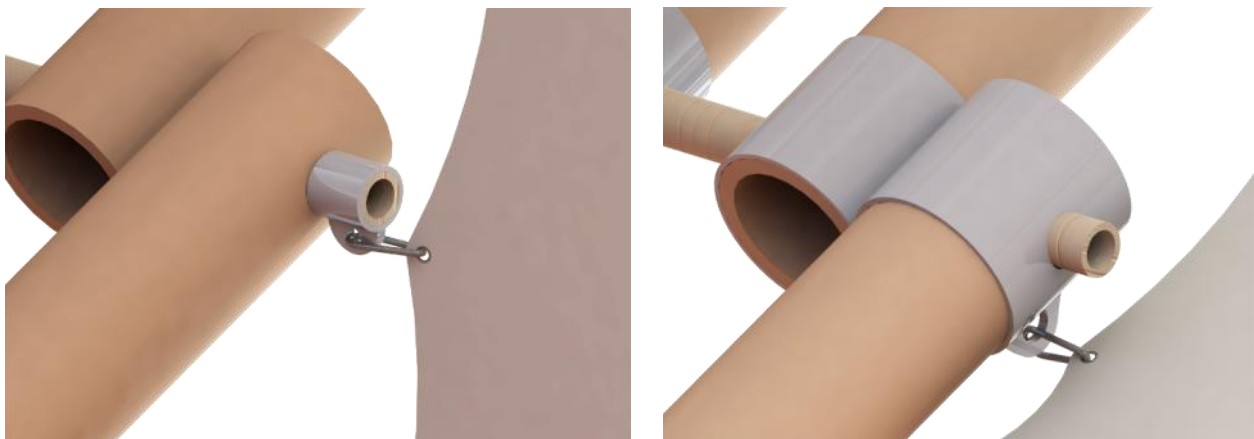
Aunque toda la proyección de los materiales permiten considerar los domos como estructuras livianas y no se considera para el uso desplegable una carga de viento mayor a 50 km/h, el soporte de la carga recaería sobre las barras del semiarco, que aunque describen una mayor sección, todo el conjunto del semiarco debe estar totalmente asegurado y muy bien atado entre componentes para evitar que se desarticulen piezas por la tracción ejercida por la membrana.

Figura 9.35 Detalle sujeción cubierta seccionada

Derecha: Abrazadera en pasador y mosquetón.

Izquierda: Abrazadera en barra de tijera y mosquetón.

Fuente: Elaboración del autor



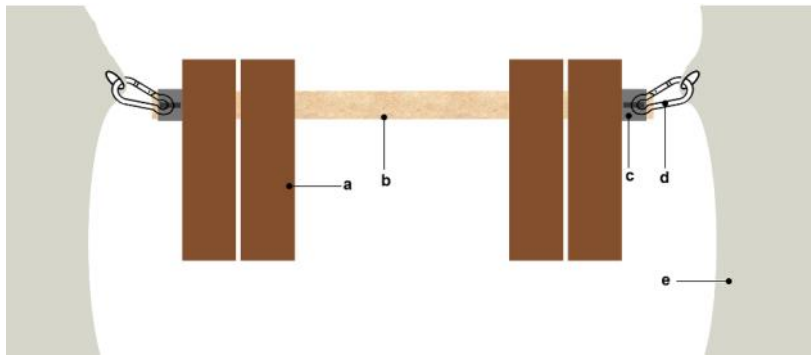


Figura 9.36 Detalle sujeción cubierta seccionada
Abrazadera en pasador- mosquetón
a) Barra
b) Pasador
c) Abrazadera
d) Mosquetón
e) Membrana. Incluye cintas de refuerzo a lo largo del perímetro
Fuente: Elaboración del autor

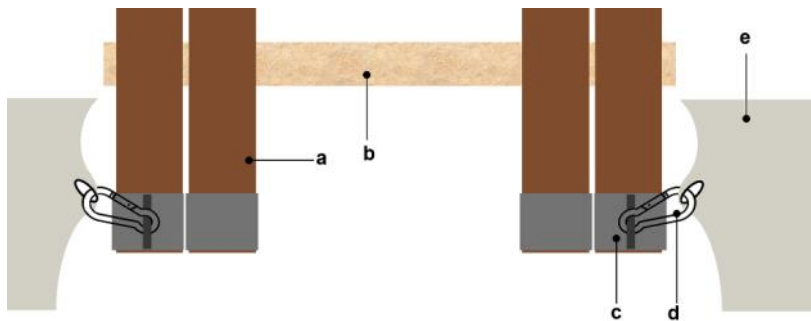


Figura 9.37 Detalle sujeción cubierta seccionada
Abrazadera en barra- mosquetón
a) Barra
b) Pasador
c) Abrazadera
d) Mosquetón
e) Membrana. Incluye cintas de refuerzo a lo largo del perímetro
Fuente: Elaboración del autor

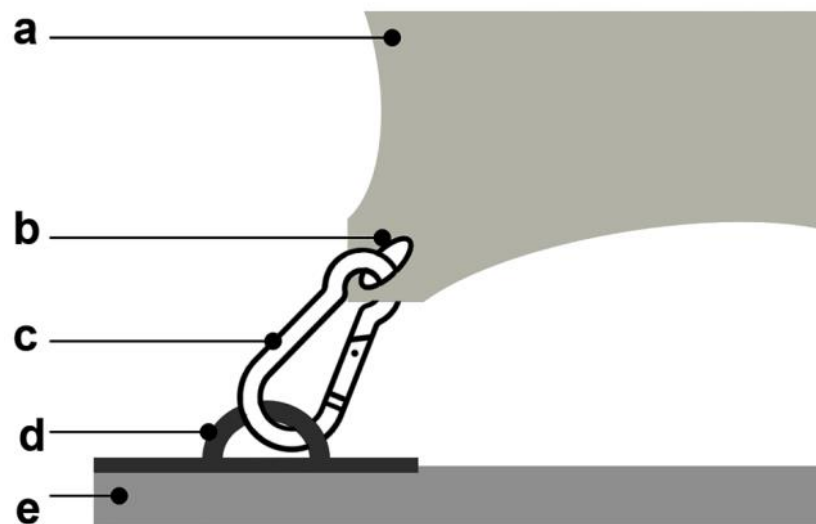


Figura 9.38 Detalle sujeción cubierta seccionada
nodo - membrana
Fuente: Elaboración del autor

Para la sujeción de las secciones de membrana al nodo, se propone que el nodo incluya en su diseño los agujeros respectivos para recibir el mosquetón que enlaza la membrana con la estructura, es una solución sencilla y practica que facilita la correcta instalación de la cubierta textil en la tipología de cubierta seccionada (figura 9.38).

El siguiente anclaje a tener en cuenta, corresponde a la fijación de la membrana a la base del domo, para esta solución técnica se propone una placa de anclaje pernaada a la plataforma del escenario, que incorpora una anilla que permite recibir el mosquetón inferior que enlaza la membrana con la base. Aunque la solución y mecanismo propuesto se podría interpretar con múltiples accesorios industriales, como armellas o pletinas similares.

Figura 9.39 Detalle sujeción inferior cubierta seccionada
 a) Membrana. Incluye cintas de refuerzo a lo largo del perímetro
 b) Ollao en membrana
 c) Mosquetón
 d) Placa de anclaje con anilla
 e) Plataforma escenario
 Fuente: Elaboración del autor



7.4 Conclusiones

Tras el desarrollo y estudio de las cubiertas para los domos desplegables, se concluye que la proyección de cubiertas tensadas es la alternativa más adaptable a las características estructurales, constructivas y funcionales de los domos desarrollados en la presente investigación.

Los domos propuestos, son en sí, estructuras temporales que se van a montar y desmontar una y otra vez en diferentes ubicaciones, y esto permite aplicar los principios básicos de las tiendas nómadas: flexibilidad, ligereza y modularidad en sus elementos.

Es así, que las características y propiedades de la cubierta textil logra una adecuada combinación entre estructura y cerramiento gracias a la flexibilidad del material, que permite ejecutar sin mayores inconvenientes los procesos de pliegue y despliegue del conjunto estructural, obteniendo un espacio de confort apropiado y ocupando un volumen reducido.

El diseño y búsqueda de la forma de las cubiertas con membranas responde a la geometría base del domo específico a cubrir, buscando destacar la estructura y al mismo tiempo integrarse al concepto de plegabilidad.

En consecuencia, las formas proyectadas para la cubiertas de membrana, corresponden a superficies de doble curvatura que se trazan sobre las guías geométricas generadas una vez el domo se encuentra en su posición final de despliegue, tomando como referencia un huso esférico, los meridianos corresponden a la curva cóncava que define la relingas perimetrales de la sección de membrana y los paralelos definen la curva convexa que proporcionan la forma alabeada de la superficie final.

Por lo tanto y a partir de la forma obtenida para la sección de la membrana, se propone el estudio y análisis tres alternativas de cubiertas tensadas compatibles a la estructura principal, definidas por los puntos de anclaje a la estructura soporte: cubierta interior, exterior y seccionada.

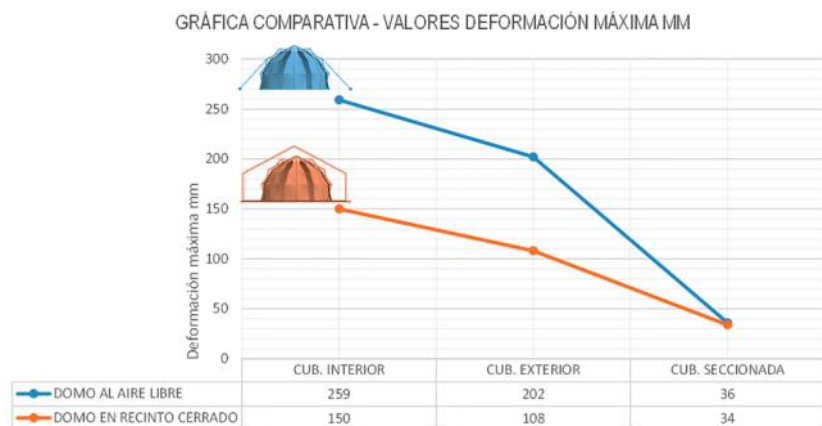
El resultado y la validez de la simulación de los domos como estructuras en equilibrio, dependerá del correcto procedimiento del análisis realizado dentro del programa de simulación WinTess© [137]. Por ende, el rigor en la introducción de la geometría, de los datos, de las características de los materiales, de las cargas y de la relación entre componentes estructurales, permite obtener resultados fiables para entender el comportamiento estructural en cada uno de los casos de cubierta analizados.

Las gráficas que se exponen a continuación permiten analizar y comparar los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones realizadas, con el objetivo de entender el comportamiento de las cubiertas tensadas bajo dos condiciones de localización determinadas, domos dentro de un recinto cerrado y domo localizados al aire libre, afectados por una carga de viento de 50 km/h y la implementación de tubos de cartón como el material principal de la estructura soporte (semiarcos desplegables).

Los resultados obtenidos y su interpretación, permiten entender el comportamiento de la estructura y prevenir los posibles fallos estructurales o sobredimensionamientos que se puedan generar en el conjunto estructural, el objetivo es obtener un correcto estado de equilibrio en cada una de las cubiertas propuestas.

Deformación máxima

Figura 9.40 Comparación de deformación máxima en las tres alternativas de cubierta, en recinto cerrado y al aire libre
Fuente: Elaboración del autor



Según la figura 9.40, en ambas situaciones, el domo localizado dentro de un recinto cerrado y al aire libre con la carga aplicada del peso propio en ambos casos y adicionalmente la carga de viento en el segundo caso, se observa que la mayor deformación sucede con la cubierta interior, arrojando como resultado un desplazamiento de 259 mm y 150 mm respectivamente.

Estos desplazamientos suceden sobre la membrana en el borde de la boca del escenario, que debido a las condiciones específicas de diseño del domo, las fuerzas de tracción no están compensadas en el otro sentido, donde ya no hay estructura. En consecuencia, la solución técnica a proponer, es reforzar la conexión de la relinga de borde con la estructura de los semiarcos, utilizando tipos especiales de lazos o cordones, que enlace ambos componentes y reduzca los desplazamientos, un sistema eficaz que tiene su origen en las carpas de circos tradicionales.

Ahora, los menores desplazamientos suceden en la cubierta seccionada, siendo muy similares los valores en milímetros en las dos situaciones en que se localiza cada tipo de estructura, generando de esta forma valores reducidos de 36 mm y 34 mm respectivamente.

Tracción máxima

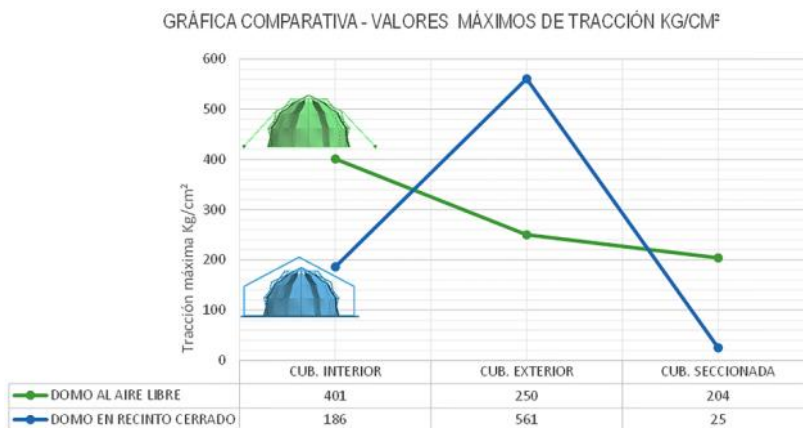


Figura 9.41 Comparación tracción máxima en las tres alternativas de cubierta, en recinto cerrado y al aire libre.

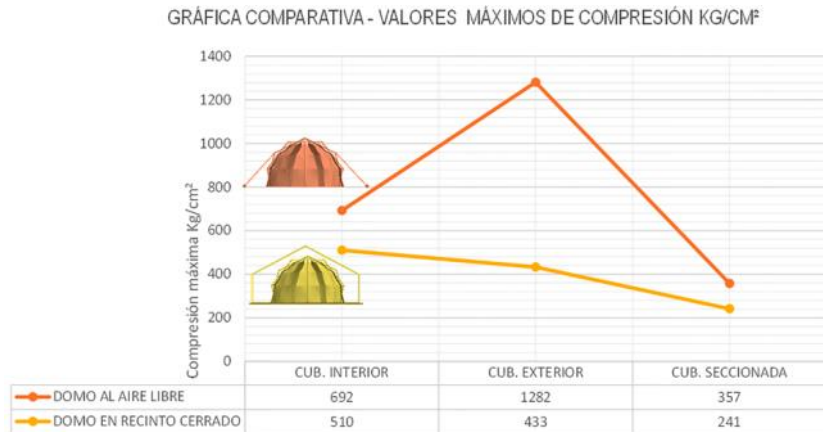
Fuente: Elaboración del autor

La figura 9.41 expone los valores resultantes sobre la tracción, se describe que el mayor valor correspondiente a 561 Kg/cm² sucede en la cubierta exterior, cuando la estructura se encuentra dentro de un recinto cerrado y el valor se reduce considerablemente en el caso de la cubierta seccionada con 25 Kg/cm².

En el caso de la estructura localizada al aire libre, la mayor tracción sucede en la cubierta interior con 401 Kg/cm² e igualmente el menor valor se aplica a la cubierta seccionada con 204 Kg/cm². Para este caso la incorporación de cables tipo viento son esenciales para reducir estos esfuerzos y mantener la estructura en equilibrio en casos de rachas de vientos intempestivas.

Compresión máxima

Figura 9.42 Comparación compresión máxima en las tres alternativas de cubierta, en recinto cerrado y al aire libre
Fuente: Elaboración del autor



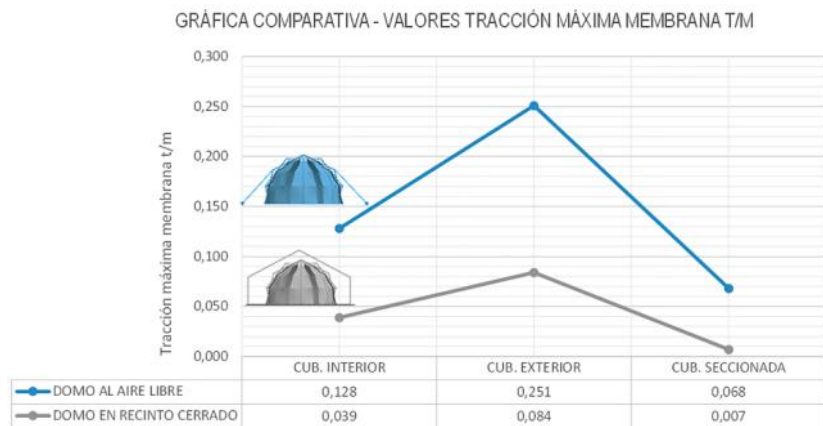
Los mayores esfuerzos de compresión suceden principalmente en las barras rigidizantes de mayor longitud entre semiarcos. Estos elementos se contemplan como elementos auxiliares para ayudar a rigidizar el conjunto estructural y obtener en la simulación el correcto estado de equilibrio en cada domo analizado.

En la figura 9.42, se observa como la afectación de la carga de viento incrementa los valores de la compresión en las tres alternativas de cubierta al aire libre, en comparación con las cubiertas que se encuentran dentro de un recinto cerrado.

A mayor detalle, en el caso de las cubierta al aire libre el máximo valor se presenta en la cubierta exterior con 1282 Kg/cm², pero en la condición de recinto cerrado el mayor valor se presenta en la cubierta interior con un valor de 692 Kg/cm², en ambas situaciones los valores mínimos se registran en la cubierta seccionada con valores de 357 Kg/cm² y 241 Kg/cm² respectivamente.

Tracción máxima membrana

Figura 9.43 Comparación tracción máxima membrana en las tres alternativas de cubierta, en recinto cerrado y al aire libre.
Fuente: Elaboración del autor



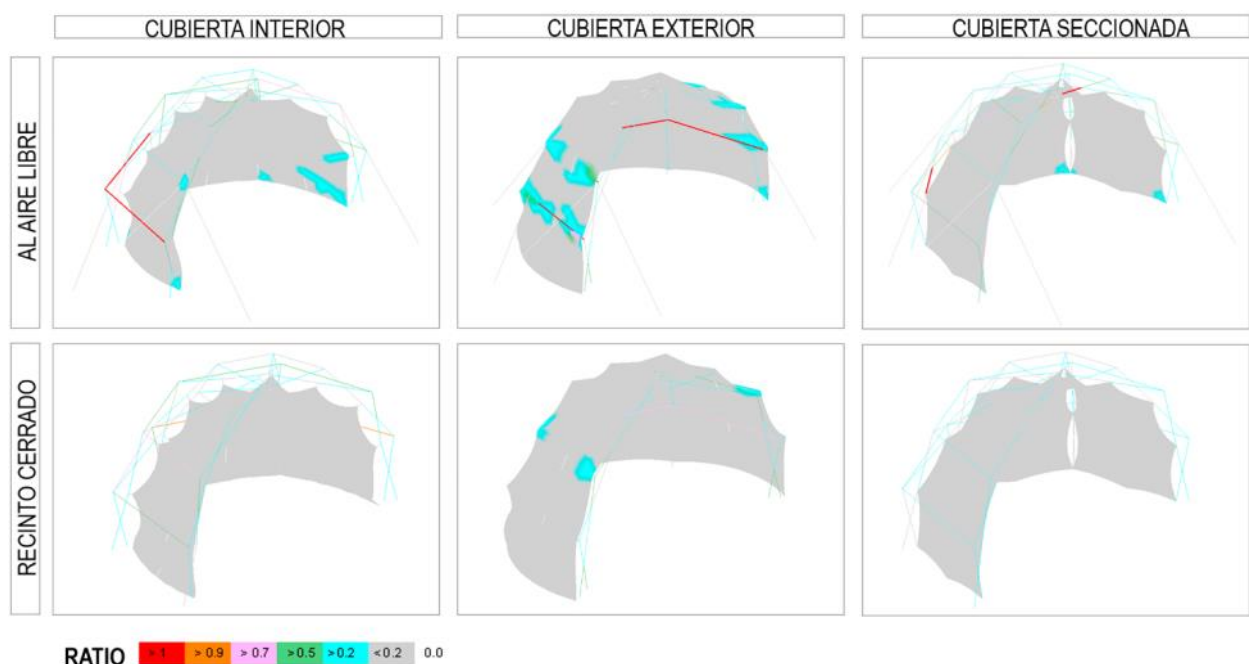
Referente a la máxima tracción en la membrana, la figura 9.43 expone el incremento de los valores sobre las cubiertas al aire libre con respecto a las cubiertas localizadas en un recinto cerrado, también se observa que en ambas situaciones el máximo valor sucede en las propuestas de cubierta exterior, con valores de 0.251 t/m y 0.084 t/m respectivamente.

La cubierta seccionada es la alternativa que arroja valores reducidos en la tracción de la membrana, correspondientes a 0.068 t/m en la cubierta al aire libre y 0.007 en la cubierta localiza en un recinto cerrado.

Si observamos la comparativa entre los esquemas resultantes del ratio, que es la opción dentro del programa de simulación, que permite visualizar que tan cerca se encuentra la estructura resultante de sobrepasar el coeficiente de seguridad, para el limite de cualquier parte de la estructura, siendo el limite máximo el valor "1" representado en rojo en la escala de color [137] (figura 9.44), se concluye que la cubierta exterior al aire libre es la alternativa estructural que presenta un mayor número de tonalidades cian (> 0.2), junto con tonalidades que alcanzan el rojo presentadas en las barras rigidizantes (> 0.1).

Se observa que todas las cubiertas dentro de un recinto interior presentan una totalidad acertada y representan estructuras en equilibrio. El mejor comportamiento se visualiza en la cubierta seccionada, aunque la cubierta interior también arroja resultados favorables en la escala de colores.

Figura 9.44 Comparación ratio en las tres alternativas de cubierta, en recinto cerrado y al aire libre.
Fuente: Elaboración del autor



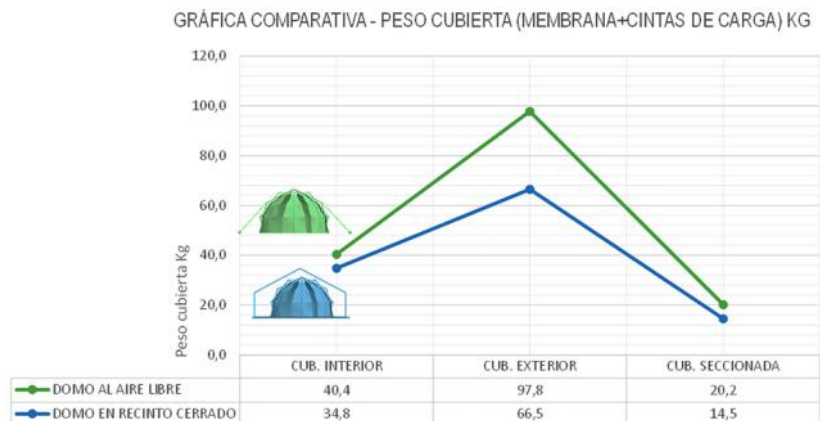
En las alternativas de cubiertas al aire libre, la afectación de la carga de viento es visible, generando diferentes áreas de tonalidades cian (> 0.2) y tonalidades de color rojo (> 1) en las barras rigidizantes, siendo la más favorable la cubierta seccionada y la cubierta exterior es la que presenta un mayor número de áreas color cian (> 0.2).

Se puede concluir que en general todas las alternativas se encuentran en un rango correcto, ya que no se visualizan tonalidades violeta (> 0.7) sobre la membrana y la simulación permite validar la estabilidad estructural y el estado de equilibrio de las cubiertas analizadas.

Por consiguiente, aunque todas describen un estado de equilibrio acertado, la cubierta seccionada es la que presenta el mejor comportamiento y es la opción más ligera (figura 9.45). Además al ser secciones modulares independientes, la fabricación y montaje es mucho más sencilla, siempre y cuando las condiciones arquitectónicas y ambientales del domo a cubrir permitan aplicar este tipo de cubierta.

Figura 9.45 Comparación peso en las tres alternativas de cubierta, en recinto cerrado y al aire libre

Fuente: Elaboración del autor



Siempre queda la opción de cubrirlo totalmente, ambas opciones, cubierta interior o cubierta exterior, si las exigencias del proyecto lo determina, la proyección de este tipo de cubiertas son totalmente viables estructural y constructivamente.

Cabe aclarar, que el análisis realizado en cada una de las alternativas de cubierta, fue proyectado con la estructura soporte en su estado final de despliegue, cuando se ha configurado un domo estable. Es importante entender, que debido a las características de instalación de la estructura, esta incluye etapas previas del montaje de la membrana que no se contemplaron en la simulación.

Se entiende que en las diferentes etapas de despliegue, cada semiarco soporta durante su elevación, media sección de membrana. Es así que surge el interés por saber el comportamiento de la tela y de la estructura soporte durante el proceso de despliegue, proponiendo de esta forma la proyección de este análisis como investigación a futuro a realizar.

Finalmente, la decisión general de los detalles de anclajes proyectados para sujetar la membrana a la estructura, responden a las características de funcionalidad de los domos desplegados. Bajo el principio de obtener un despliegue simultáneo entre estructura y cerramiento, los accesorios sugeridos se basan en elementos de conexión sencillos, de fácil manipulación y asequibles en el mercado, que permitan montar y desmontar fácilmente la cubierta.

De manera que, las soluciones técnicas consisten en sistema de mosquetones, anillas y ollaos con bordes rigidizados sobre la tela, que permita la conexión entre ambos elementos y al mismo tiempo soporten los posibles desplazamientos y rotaciones que puedan aparecer durante las etapas de despliegue y uso de la instalación.

Con el objetivo de utilizar el mínimo de mecanismos para la correcta elevación de la cubierta textil y garantizar el buen comportamiento estructural del conjunto, la instalación de cada sección de membrana y en coherencia con el proceso de despliegue, incluye una relinga central del tipo cremallera que permite configurar su forma final, establecer la continuidad entre patrones y aportar la estabilidad y rigidez necesaria para obtener una estructura en equilibrio, con un mínimo de arrugas y generando un carácter suave y de arquitectura ligera.

Cada uno de los procesos realizados para la proyección de las cubiertas presentadas en el presente apartado, son fundamentales para obtener resultados viables estructural y constructivamente, aunque los análisis de estructurales son acertados, en la práctica no hay que olvidar lo susceptibles que son este tipo de estructuras al vandalismo y a posibles cambios intempestivos del clima.

Por eso, siempre como medida adicional de seguridad, es necesario optar por la redundancia estructural, incluyendo cables de refuerzo y dispositivos de frenado que eviten posibles movimientos de plegado de la estructura, previniendo de esta forma fallos o colapso estructural.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

DOMOS DESPLEGABLES

MÉTODO GEOMÉTRICO A PARTIR DE POLÍGONOS REGULARES

Natalia Paola Torres Londoño

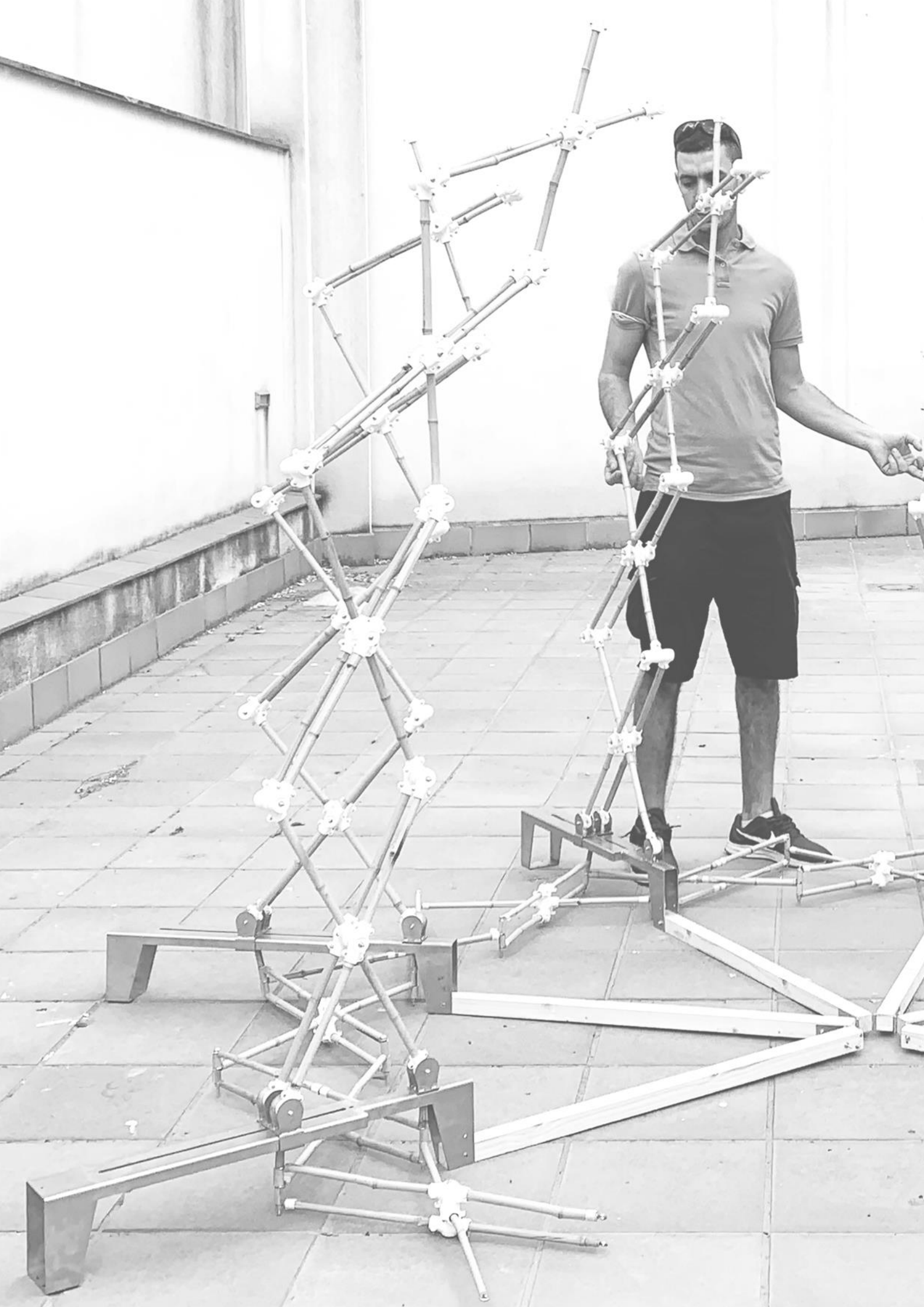
Tesis doctoral dirigida por:

Dr. Ramon Sastre Sastre

Tutor: Xavier Gimferrer Vilaplana

TERCERA PARTE. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Universidad Politécnica de Catalunya
Doctorado en Tecnología de la Arquitectura, de la Edificación y del Urbanismo
Departamento de Tecnología de la Arquitectura
Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés



10

CAPÍTULO

**Tabla interactiva.
Construcción de prototipos**



Contenido del capítulo

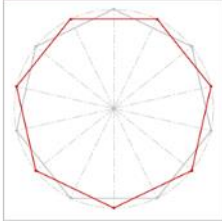
10.1 Tabla interactiva	444
10.2 Normativa.....	446
10.3 Escenario desplegable	451
10.3.1 Concepto	451
10.3.2 Búsqueda de la forma	452
10.3.3 Componentes estructurales.....	454
10.3.4 Materiales y cantidades.....	456
10.3.5 Dimensiones	458
10.3.6 Montaje y proceso de despliegue.....	460
10.3.7 Desmontaje y proceso d pliegue.....	462
10.3.8 Fabricación e implementación	464
10.3.9 Uso y durabilidad	468
10.4 Stand Egg	470
10.3.1 Concepto	470
10.3.2 Búsqueda de la forma	471
10.3.3 Componentes estructurales.....	475
10.3.4 Materiales y cantidades.....	477
10.3.5 Dimensiones	478
10.3.6 Montaje y proceso de despliegue.....	480
10.3.7 Fabricación e implementación	484
10.3.8 Uso y durabilidad	488

10.5 Domo bambú	490
10.5.1 Concepto	490
10.5.2 Búsqueda de la forma - Modelo físico en madera	491
10.5.3 Componentes estructurales.....	494
10.5.4 Materiales y cantidades.....	497
10.5.5 Dimensiones	498
10.5.6 Proceso de despliegue.....	500
10.5.7 Fabricación e implementación	502
10.5.8 Búsqueda de la forma - Modelo físico en bambú.....	505
10.5.9 Conexiones para las barras de bambú. Impresión 3D.....	508
10.5.10 Soporte plataforma plegables 3D.....	512
10.5.11 Dimensiones	514
10.5.12 Proceso de despliegue.....	516
10.5.13 Fabricación e implementación	519
10.5.14 Uso y durabilidad	528

POLÍGONO

Pentágono

Hexágono

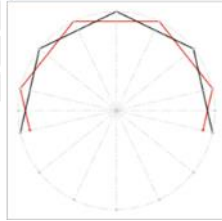
Heptágono

a.

ARCO ELEVACIÓN

Rebajado

Medio Punto

Herradura

b.

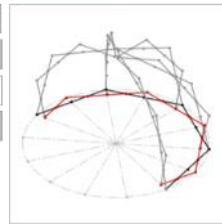
ARCO PLATAFORMA

Rebajado

Medio Punto

Herradura

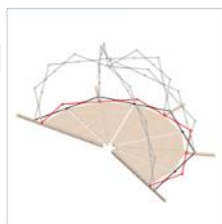
Completo



c.

GEOMETRÍA PLATAFORMA

Sin plataforma

Con Plataforma

d.

CUBIERTA

Sin cubierta

Interior

Exterior

Seccionada

e.

10.1 Tabla Interactiva

El método geométrico para la configuración de domos desplegables a partir de polígonos regulares, permite generar un proceso de búsqueda de la forma que genera la definición de semiarcos planos, compuestos por módulos de tijeras.

La cantidad de módulos de tijeras y morfología específica para configurar diferentes espacialidades, parten de la exploración geométrica desarrollada en esta investigación, definiendo las variables principales para obtener una geometría final para un domo desplegable que incorpora adicionalmente el proceso de despliegue de los cerramientos de suelo y cubierta.

De esta manera, se expone las determinantes para configurar una tabla interactiva en la plataforma Excel, para la búsqueda de la forma de domos desplegables a partir del método propuesto, que permita al usuario explorar diversas posibilidades modificando las siguientes variables en cuanto a forma, componentes y dimensión (figura 10.1):

Variables geométricas:

-Tipo de polígono regular (figura 10.1 a)

-Tipo de arco en elevación (figura 10.1 b)

-Tipo de arco en planta (figura 10.1 c)

Componentes de cerramiento:

-Incluir o no plataforma de suelo (figura 10.1 d)

-Tipo de cubierta: Sin cubierta, interior, exterior, seccionada (figura 10.1 e)

Variables de dimensión:

-Longitud de barra o diámetro total.

La figura 10.2 expone un ejemplo en el uso de la tabla interactiva, visualizando de manera gráfica la configuración de un domo desplegable, seleccionando y definiendo las variables que requiere un diseño específico. Con el objetivo de comprender los datos e imágenes resultantes, se describe los valores que componen la tabla para interactuar con la misma.

Figura 10.1 Variable a definir en la configuración de domos desplegables.

Fuente: Elaboración del autor

La tabla se divide en tres partes principales, definidas en tres columnas. La primera columna (A) corresponde a todas las variables geométricas a introducir por el usuario, junto con los componentes de cerramiento a incluir o no. La segunda columna (B), representa el resultado gráfico de la configuración espacial seleccionada y en la parte inferior, la representación de proceso de despliegue, en la vista seleccionada.

Y la tercera columna incluye toda la información numérica para dimensionar el domo a configurar, definido en la longitud de la barra o diámetro requerido, indicando la posición de las articulaciones en la barra. Además arroja las dimensiones resultantes de la altura libre y flecha según el arco seleccionado.

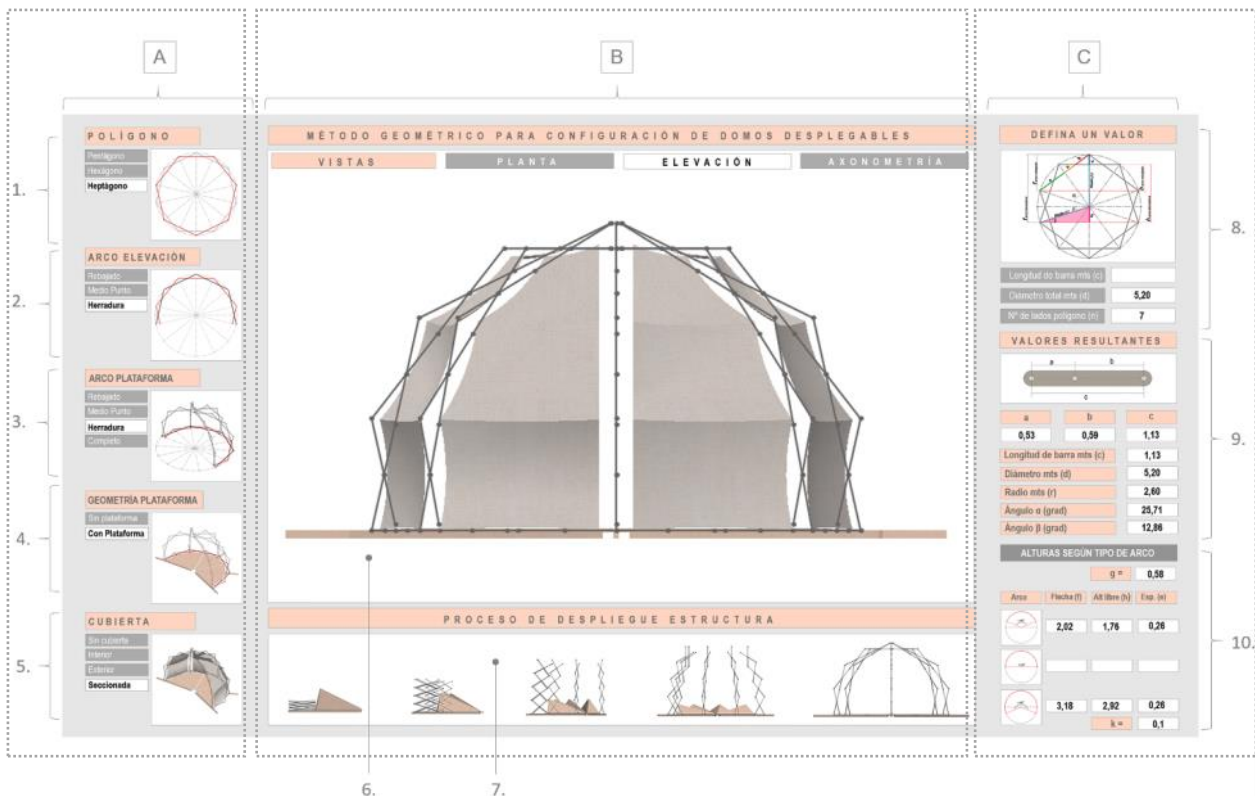


Figura 10.2

Columna A. Variables geométricas a definir

1. Selección de polígono: Cuadrado, pentágono, hexágono, heptágono u octágono.
2. Selección de arco en elevación: Rebajado, medio punto o herradura.
3. Selección de arco plataforma: Rebajado, medio punto, herradura o completo.
4. Incluir o no plataforma plegable
5. Incluir o no cubierta: Cubierta interior, exterior o seccionada.

Columna B. Resultantes gráficas, configuración de la forma de domos desplegables.

6. Vistas domo: Planta, elevación o axonometría.
7. Proceso de despliegue según vista seleccionada.

Columna C. Resultados numéricos

8. Esquema gráfico valores numéricos a hallar. Definición de longitud de la barra o diámetro requerido.
9. Valores numéricos resultantes .
10. Alturas y flechas resultantes según arco seleccionado. Verificación del valor (k). Relación $e/r = 0.1$

Fuente: Elaboración del autor

10.2 Normativa

Las estructuras desarrolladas en la presente investigación se catalogan como estructuras temporales y la normativa a aplicar en España para este tipo de estructuras corresponde a la UNE-EN-13782 [20], la cual establece los requisitos de seguridad que deben aplicarse durante los procedimientos de diseño, cálculo, fabricación, instalación y mantenimiento para todo tipo de estructuras con cubiertas temporales.

Esta normativa [20], señala tres definiciones para las diferentes alternativas de estructuras temporales a construir:

- *Carpa: Estructura móvil, instalada temporalmente como construcción abierta o cerrada, es decir, tiendas de gran tamaño, hangares, salas, recintos de exposición, cubierta gradas.*
- *Carpa con una estructura portante primaria: Carpa con elementos estructurados y paredes de cerramiento que constituyen una estructura de apoyo portante.*
- *Carpa clásica de mástil: Carpa de mástiles centrales sometida a un fuerte atirantamiento para estabilizar la cubierta textil.*

Por las características mencionadas anteriormente, los domos a construir estarían clasificados dentro de las dos primeras categorías, son estructuras móviles, abiertas o cerradas que describen una estructura portante primaria correspondiente a los semiarcos desplegados y si es el caso, a la plataforma de suelo plegable.

Aunque la fabricación de los prototipos que se exponen a continuación, se realizan a nivel experimental para la comprobación y observación de la viabilidad técnica y constructiva del método geométrico propuesto para proyectar domos desplegados y no cuentan con la formalización de un ensayo verificado, la consideración de la normativa es primordial para llevar a cabo la aplicación a futuro de este tipo de estructuras.

De esta forma, y según la normativa a aplicar, la descripción de los prototipos pretende incluir la información necesaria para avanzar en la documentación técnica indispensable para validar este tipo de estructuras, presentando la documentación del diseño, dimensiones, descripción del montaje y utilización en cada caso específico.

Cabe aclarar que no se realizan análisis estructurales exhaustivos, ya que no es el principal interés de esta investigación, estos se proyectan como futuras investigaciones complementarias a desarrollar.

La verificación de la estabilidad y del equilibrio de la estructura, se realiza de forma experimental a través de pruebas de carga en situ que permitan observar el comportamiento del prototipo realizado.

No obstante, se mencionan como información complementaria algunos de términos y puntos principales que enumera la normativa para estructuras temporales [20], correspondiente a los principales apartados desarrollados:

4. Requisitos generales del diseño, análisis e inspección. Documentos de diseño, descripción de la construcción y utilización, planos de ejecución.
5. Principios de análisis numérico. Verificación, selección de los materiales textiles (uniones de textiles),
6. Cargas de cálculo. Acciones permanentes, cargas convencionales, acciones variables (cargas dinámicas, cargas debidas a la acción del viento, viento sobre la estructura portante de la membrana, cargas debidas ala nieve), fuerzas sísmicas y combinación de cargas.
7. Verificación de la estabilidad y del equilibrio. Verificación de los riesgos de vuelco, desplazamiento y levantamiento, peso propio de las cubiertas de la carpa, estructuras dotadas de una estructura portante primaria (montaje con lastrado para la protección contra las cargas debidas a la succión del viento, contravientos, fuerzas del revestimiento que se ejercen sobre la estructura debidas a la acción del viento), membrana (pretensado, detalles de diseño y fabricación de la membrana), verificación de la capacidad portante de los textiles técnicos y de sus unión, margen de seguridad, medidas preventivas y postensado.
8. Anclajes al suelo. Capacidad portante de anclajes por lastrado, de anclajes mediante estacas y ensayo de los mismos.

9. Otros componentes estructurales. Cables, cuerdas, cadenas, dispositivos de seguridad, accesorios, trinquetes y piezas de unión.

10. Criterios particulares de diseño y fabricación. Vías de acceso y de salida de recintos, salas de espectáculos y otras comportamiento frente al fuego, uniones y soldaduras, juntas soldadas de estructuras de acero y de aluminio y uniones textiles.

11. Fabricación y suministro. Certificados, observaciones sobre las especificaciones del diseño, descripción de los procedimientos de instalación y de explotación.

12. Verificación. Cualificación, competencia.

13. Procedimientos de aprobación, verificación y ensayos. Identificación, aprobación inicial (revisión de los documentos del proyecto y de construcción, inspección de los trabajos de construcción) inspección después de una reparación, modificación o accidentes y realización de informes.

14. Manual de utilización

15. Utilización y explotación. Examen detallado periódico, verificación de la instalación, itinerarios de evacuación, diseño de salida de emergencia, escaleras, sistemas de calefacción y de cocina, instalación eléctrica y extintores

Las directrices aquí señaladas, especifican los requisitos de seguridad a tener en cuenta en la construcción de estructuras temporales, tomando en cuenta aquellos que refieren a la tipología de estructuras desarrolladas en la presente investigación.

Se aclara que la construcción de los domos desplegados, se realizan a nivel de prototipado, para aplicaciones concretas temporales, con la intención de validar el método geométrico a nivel experimental y a escala real. La validación técnica y cumplimiento de la normativa para este tipo de estructuras esta sujeta a la realización de todos los términos y requisitos anteriormente expuestos, que se proyectan a futuro, con el objetivo de lograr la aplicación y difusión arquitectónica de este tipo de estructuras.

Con el objetivo de analizar la viabilidad constructiva del método propuesto para la configuración de domos despletables a través de la demostración, se describe a continuación los diferentes prototipos construidos durante la investigación. Cada uno de ellos permitió explorar diferentes estrategias de diseño geométrico, basadas el método propuesto, así como en la exploración de materiales y diseño de conexiones con nuevas tecnologías.

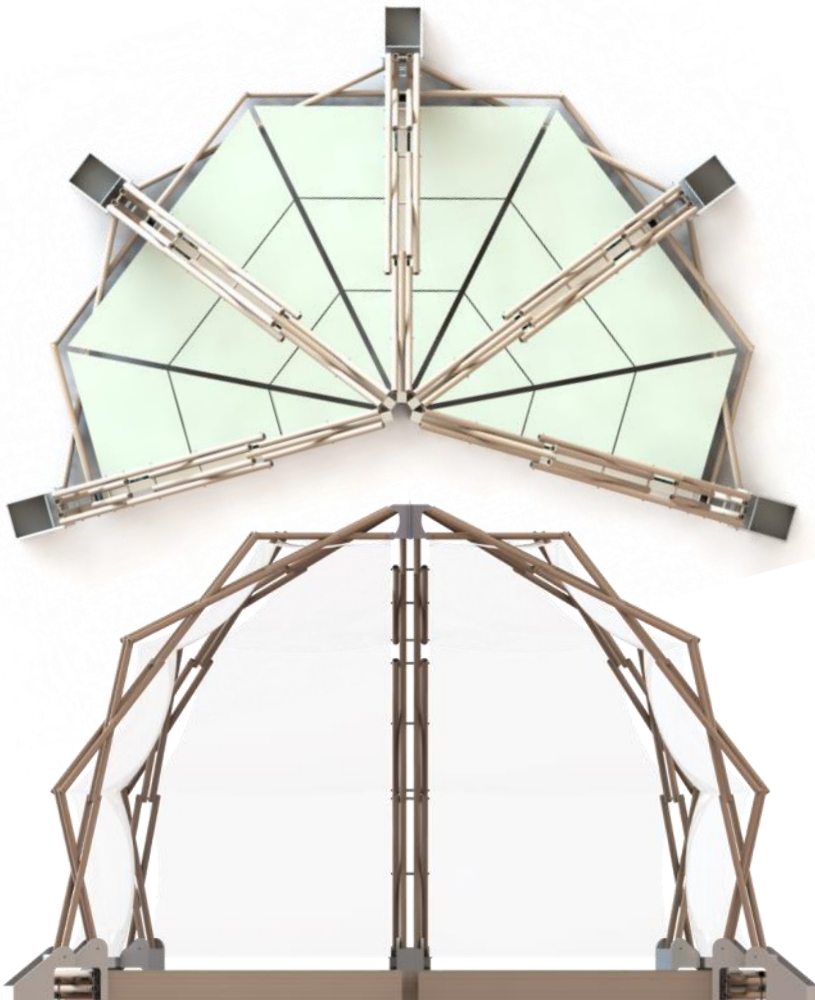


Figura 10.3 Escenario Desplegable
Fuente: Elaboración del autor

10.3 Escenario desplegable

El orden de descripción de los prototipos construidos es cronológico, siendo el *Escenario Desplegable* el primer prototipo construido para esta investigación, su desarrollo y construcción se realizó durante la estancia de investigación en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. México.

Cabe aclarar que parte de los resultados y desarrollo de investigación relacionado con los prototipos realizados se han publicado previamente en artículos científicos [89], [90], [91] y [92], en el presente capítulo se desarrolla una descripción a mayor detalle de cada uno de los prototipos desarrollados como demostración de método geométrico propuesto.

10.3.1 Concepto

En el marco de la celebración de los eventos culturales: *Manifiesto de Arquitectura y Zócalo*, organizado por los estudiantes de la SAARQ. (Sociedad de Alumnos de Arquitectura) y SALDI (Sociedad de Alumnos de Diseño Industrial) respectivamente, del Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, México. Se propone un escenario transportable para dichos eventos temporales, con la capacidad de plegarse para lograr un fácil y rápido proceso de montaje y desmontaje sin la necesidad de mano de obra especializada.

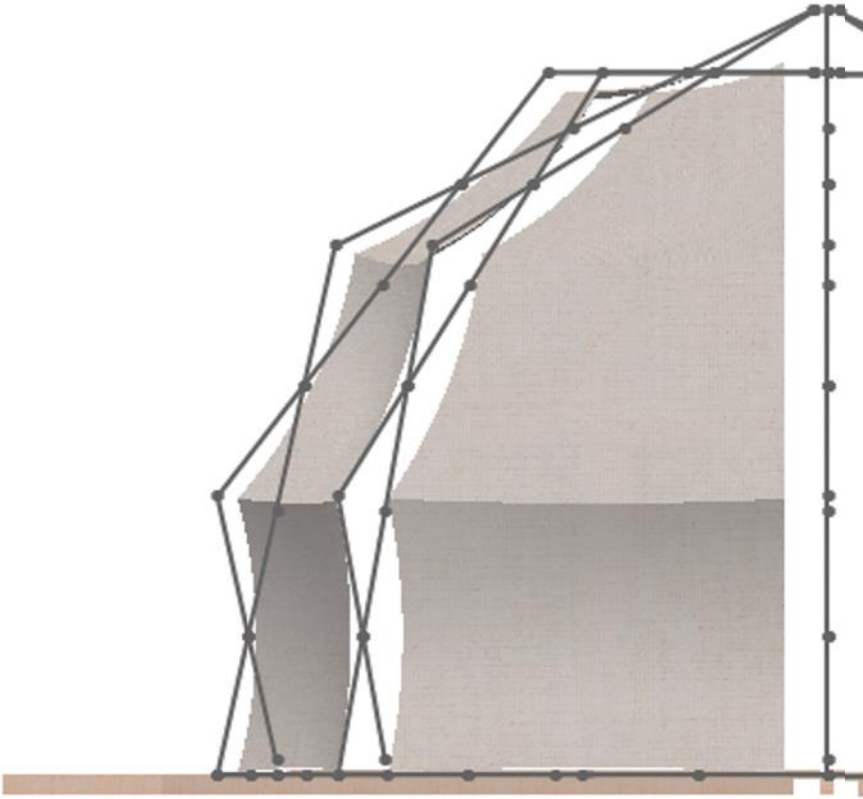
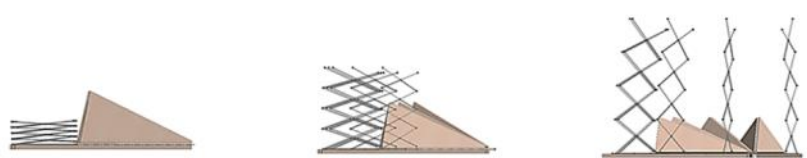
Los requerimientos para las dimensiones del escenario consisten en ocupar un diámetro máximo de 5,20 metros y una altura de 4,00 metros dentro de espacios cubiertos. Se prioriza en la utilización de materiales sostenibles y reutilizados.

Al ser eventos temporales, la durabilidad del escenario se proyecta hasta máximo de un mes, siendo una estructura que se utilizara solo en cuatro sesiones específicas, para después proceder a su desmontaje y reutilizar los componentes estructurales en otros proyectos.

10.2.2 Búsqueda de la forma

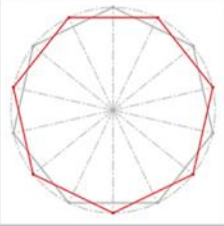
Bajo los requerimientos expuestos en el apartado anterior, se implementa la tabla para la búsqueda de la forma y geometría idónea para el escenario, seleccionando como mejor opción, la geometría de un heptágono, con un arco en elevación y en planta del tipo herradura. Se incluye plataforma y se selecciona una cubierta seccionada. La tabla arroja una barra de 1,13 m, que genera un diámetro de 5,20 m, flecha de 3,18 m y una altura libre de 2,92 m.

Tabla 10.1 Tabla Interactiva. Búsqueda de la forma domos desplegables. Fuente: Elaboración del autor

MÉTODO GEOMÉTRICO PARA CONFIGURAR	
VISTAS	PLANTA
	
<p style="text-align: center;">PROCESO DE DESPLIEGUE</p> 	

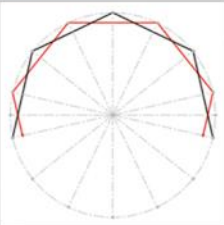
POLÍGONO

- Pentágono
- Hexágono
- Heptágono**



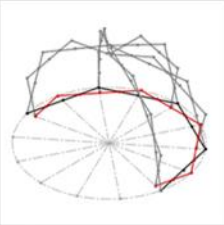
ARCO ELEVACIÓN

- Rebajado
- Medio Punto
- Herradura**



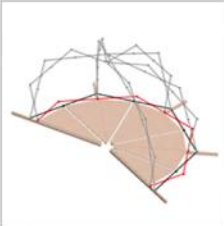
ARCO PLATAFORMA

- Rebajado
- Medio Punto
- Herradura**
- Completo




GEOMETRÍA PLATAFORMA

- Sin plataforma
- Con Plataforma**



CUBIERTA

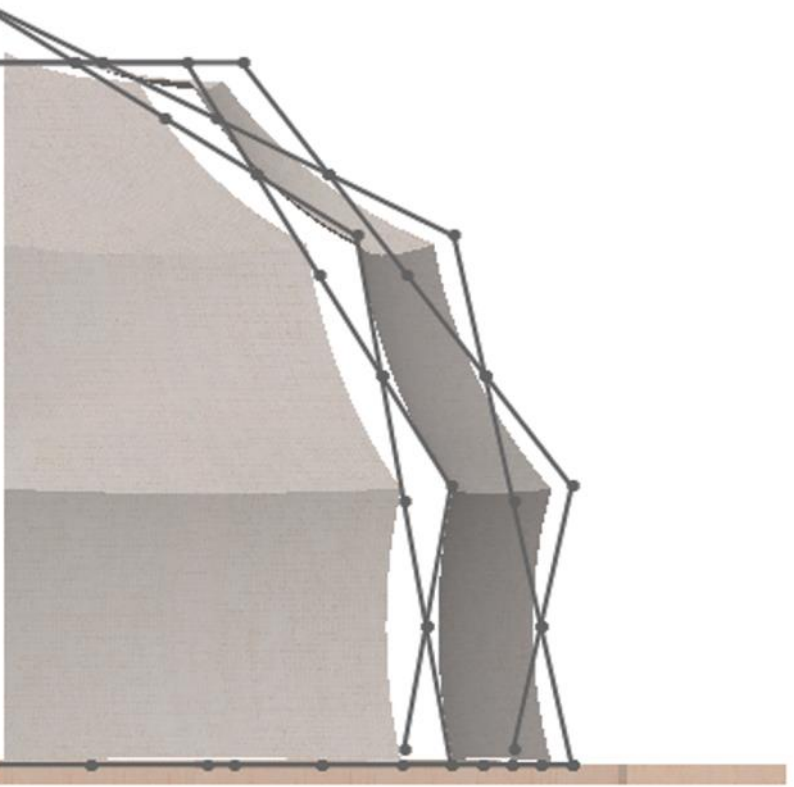
- Sin cubierta
- Interior
- Exterior
- Seccionada**



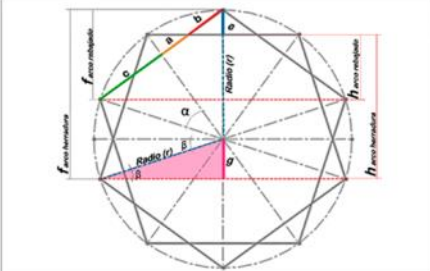
Cabe aclarar que las dimensiones resultantes, permiten visualizar al usuario un acercamiento a la geometría final del domo a proyectar y que solo considera los ejes de las barras y puntos de articulación, es decir, la tabla no contempla los espesores reales de los materiales a utilizar y componentes adicionales a incorporar, como el nodo, las bases, o la plataforma. Así que es necesario tener en cuenta la sección de los materiales e incrementos necesarios, al momento de introducir los valores dimensionales de la longitud de barra o diámetro requerido, que se ajusten a los requerimientos de diseño o espacio útil a ocupar (Tabla 10.1).

ACCIÓN DE DOMOS DESPLEGABLES

ELEVACIÓN
AXONOMETRÍA

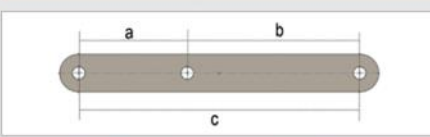


DEFINA UN VALOR



Longitud de barra mts (c)	<input type="text"/>
Diámetro total mts (d)	5,20
Nº de lados polígono (n)	7




VALORES RESULTANTES



a	b	c
0,53	0,59	1,13
Longitud de barra mts (c)	1,13	
Diámetro mts (d)	5,20	
Radio mts (r)	2,60	
Ángulo α (grad)	25,71	
Ángulo β (grad)	12,86	

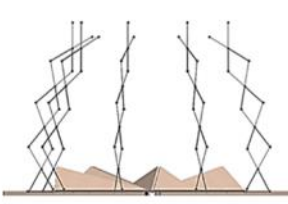
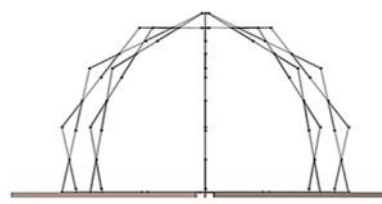
ALTURAS SEGÚN TIPO DE ARCO

	g =	0,58
--	-----	-------------

Arco	Flecha (f)	Alt libre (h)	Esp. (e)
	2,02	1,76	0,26
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	3,18	2,92	0,26

k =	0,1
-----	------------

MÓDULO ESTRUCTURAL

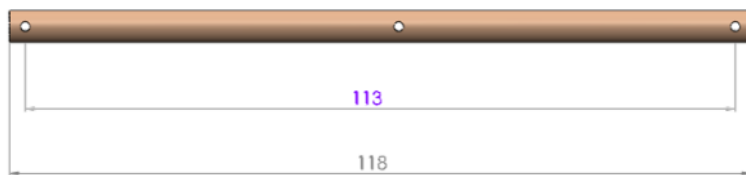



10.3.3 Componentes estructurales

Partiendo del valor de la longitud de la barra y los puntos de articulación que arroja la tabla para la búsqueda de la forma en domos desplegables, el valor resultante es de 1,13 m, se aumenta en forma proporcional para que aloje los agujeros a realizar.

Se determina de esta forma, que la barra tendrá una longitud total de 1,18 m y el material para su construcción es tubo de cartón de 0,5 m de diámetro y 0.05 m de espesor (figura 10.4).

Figura 10.4 Longitud de la barra
Fuente: Elaboración del autor



A partir de aquí se configuran los semiarcos desplegables conformados por la agrupación de módulos de tijeras y con una sección acertada para la estabilidad de la estructura. (Ver capítulo 6). A continuación se diseñan los componentes estructurales que alojarán y recibirán los semiarcos desplegables.

La figura 10.5 describe los materiales, componentes estructurales, accesorios y herrajes principales para construir una sección del domo, definida básicamente en:

- Los módulos de tijeras para los semiarcos
- La estructura plegable del suelo
- Las bases para los arcos y la plataforma plegable.
- La sección de membrana sujeta entre arcos.
- Y el nodo principal que estabiliza el domo.

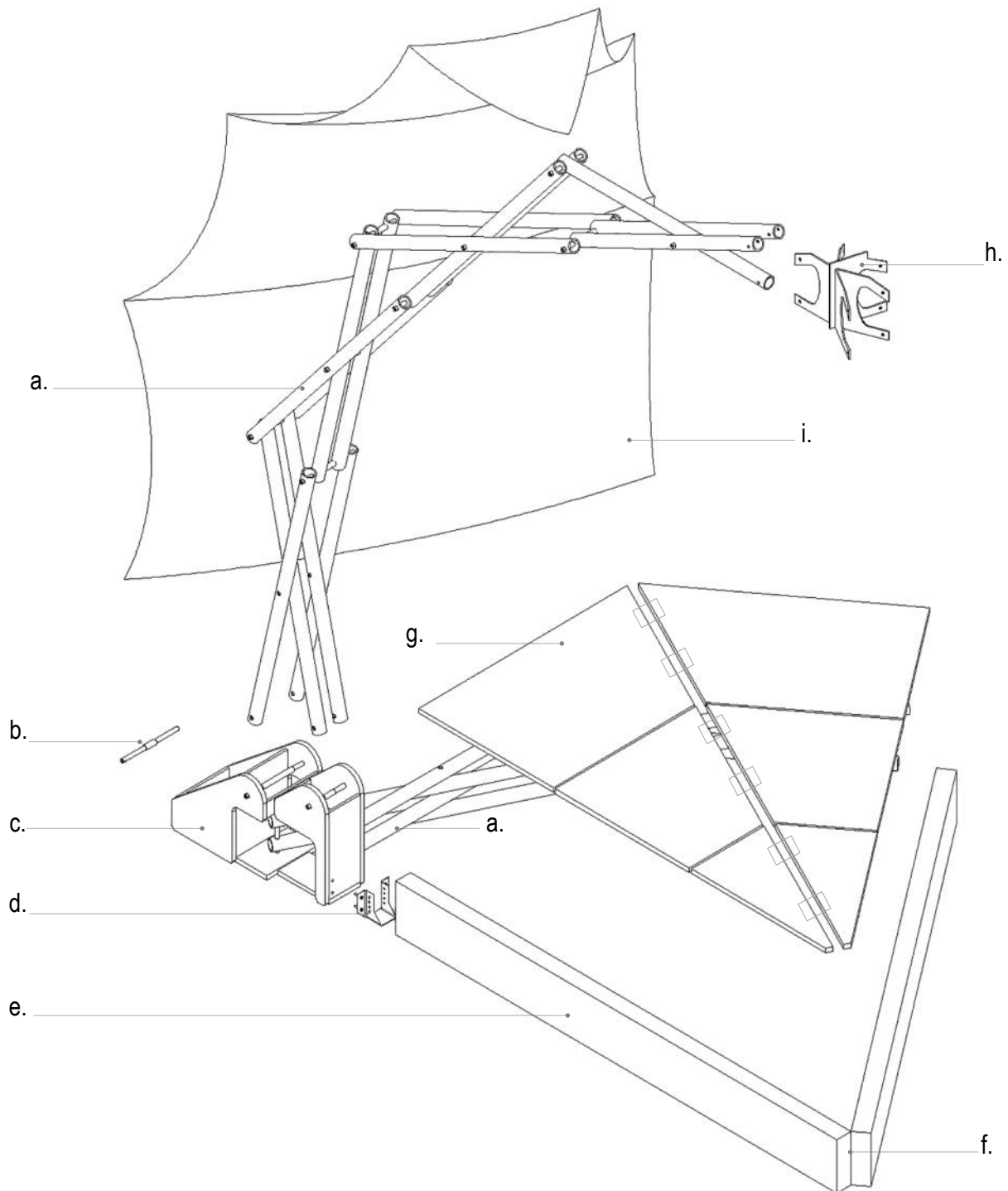


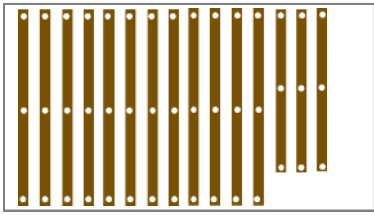
Figura 10.5 Axonometría explotada. Componentes sección escenario desplegable

- a. Tubos de cartón para formar los módulos de tijera . Ø 50 mm espesor 5 mm
- b. Pasador en barra de bambú Ø 15 mm y separador en barra de bambú Ø 30 mm. Incluye Tornillos, tuercas para anclar mosquetón de la membrana. Posicionados en todas las articulaciones móviles de los semiarcos y tijeras de suelo.
- c. Bases semiarcos realizadas con tablero de aglomerado 60x120x16. Material reutilizado de las mesas de arquitectura desechadas.
- d. Soporte metálico para viga de madera
- e. Viga en madera. Tablón pino americano 22x70x2140. Reutilizadas
- f. Bisagras tipo T
- g. Paneles para plataforma plegable. Tablero de aglomerado 60x120x16. Incluye bisagras tipo libro
- h. Nodo central en laminas de Alucobond®. Espesor 3 mm
- i. Membrana en lycra. Incluye ollaos rigidizados para anclaje a los semiarcos mediante mosquetones.

Fuente: Elaboración del autor

10.3.4 Materiales y cantidades

BARRAS TUBOS DE CARTÓN Ø 50 MM



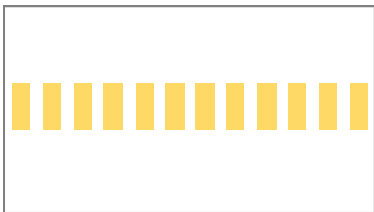
				SUBTOTAL
SEMIARCOS	5	BARRAS	15	75
TIJERAS SUELO		BARRAS	32	32
			TOTAL	107

PASADORES BAMBÚ Ø 15MM



				SUBTOTAL
SEMIARCOS	5	BARRAS	12	60
TIJERAS SUELO		BARRAS	28	28
			TOTAL	88

SEPARADORES BAMBÚ Ø 15MM



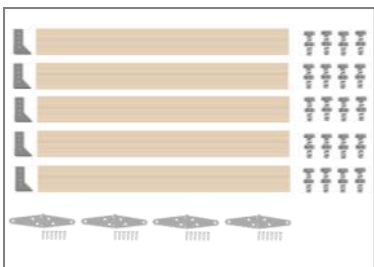
				SUBTOTAL
SEMIARCOS	5	BARRAS	12	60
TIJERAS SUELO		BARRAS	10	10
			TOTAL	70

BASES - TABLERO AGLOMERADO 600*1200*16 MM



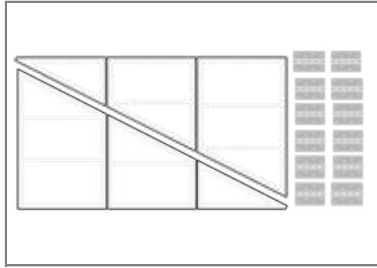
Despiece piezas para bases de los semiarcos				SUBTOTAL
TABLEROS		5		5
			TOTAL	5

VIGAS MADERA + ACCESORIOS



				TOTAL
VIGAS		5		5
SOPORTE		5		5
TORNILLO SOPORTE		20		20
BISAGRAS TIPO T		4		4

PLATAFORMA - TABLERO
AGLOMERADO 600*1200*16 MM



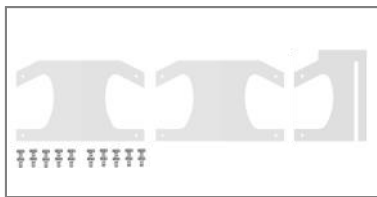
Despiece piezas plataforma plegable		TOTAL
TABLERO	5	5
BISAGRAS TIPO LIBRO	48	48

CUBIERTA MEMBRANA



Patronaje sección de cubierta desplegable		TOTAL
SECCIONES	4	TELA M ²
		3
		OJALES METAL
		10
		MOSQUETONES
		10

NODO - PANEL ALUCOBOND



Despiece para piezas nodo central		TOTAL
LÁMINA 1000*1000*3 MM	1	1
TORNILLOS	10	10

Figura 10.6 Materiales y cantidades fabricación escenario desplegable Fuente: Elaboración del autor

10.3.5 Dimensiones

Figura 10.7 Elevación escenario desplegado.
Fuente: Elaboración del autor

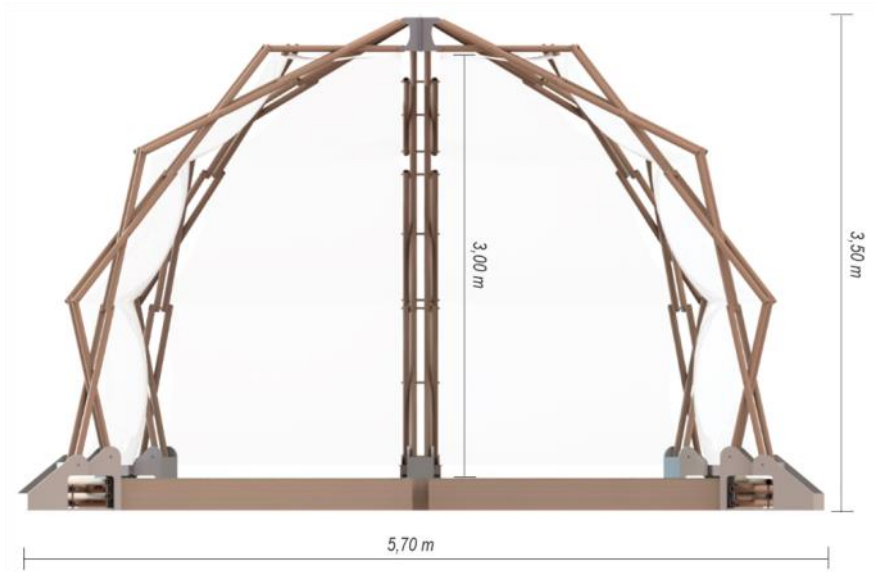


Figura 10.8 Planta escenario desplegado.
Fuente: Elaboración del autor

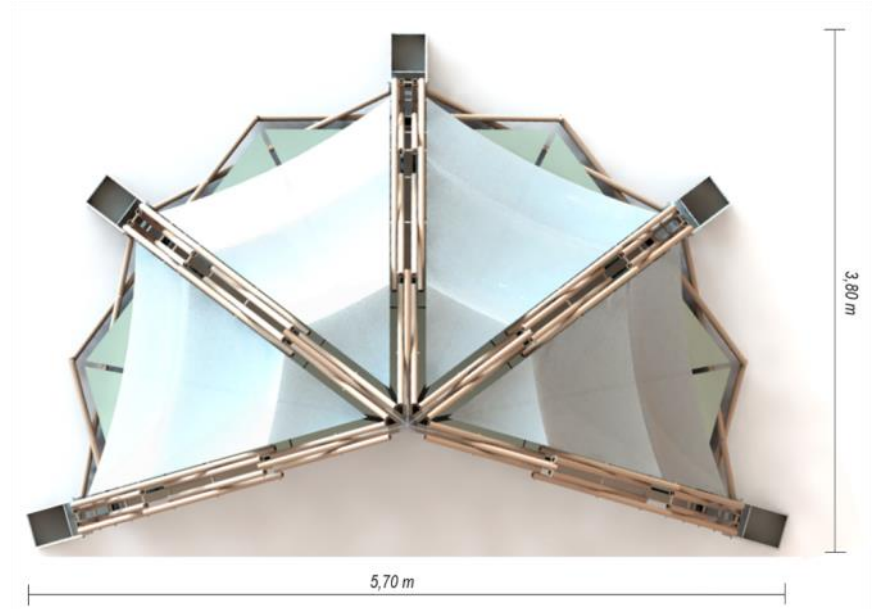


Figura 10.9 Axonometría escenario desplegado
Fuente: Elaboración del autor





Figura 10.10 Elevación escenario plegado.
Fuente: Elaboración del autor

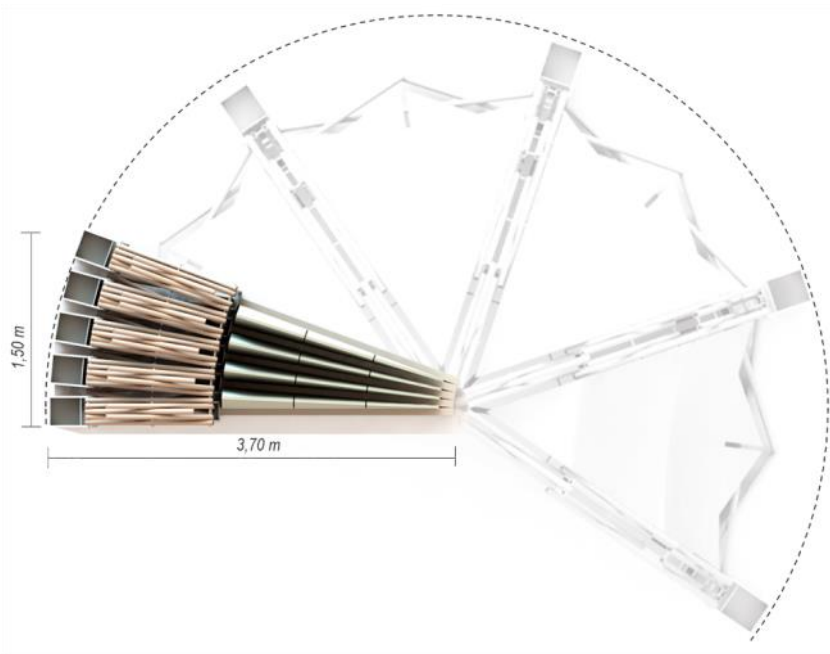


Figura 10.11 Planta escenario plegado.
Fuente: Elaboración del autor

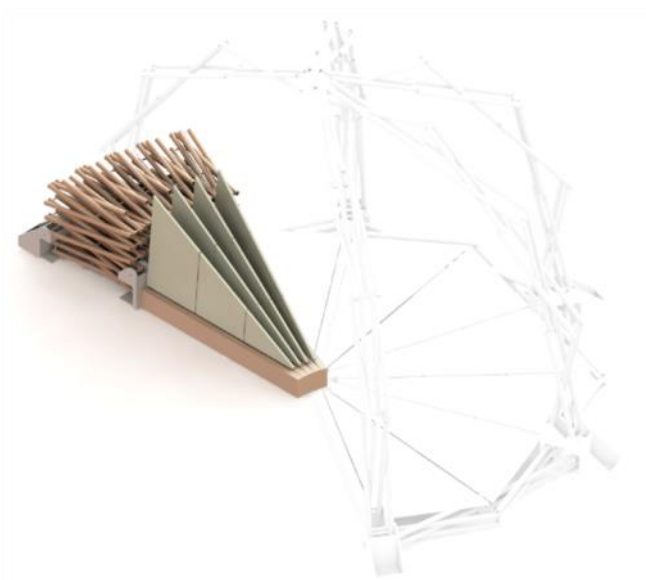


Figura 10.12 Axonometría escenario plegado
Fuente: Elaboración del autor

Figura 10.13 Proceso de montaje escenario desplegable.

- a) Equipo mínimo. 3 personas y herramienta básica
- b) Transporte
- c) Descarga y posicionamiento
- d) Fijación de las vigas
- e) Sujeción sección de membrana entre arcos. Incluye cremallera central para facilitar el proceso de despliegue
- f) Contrapeso para las bases

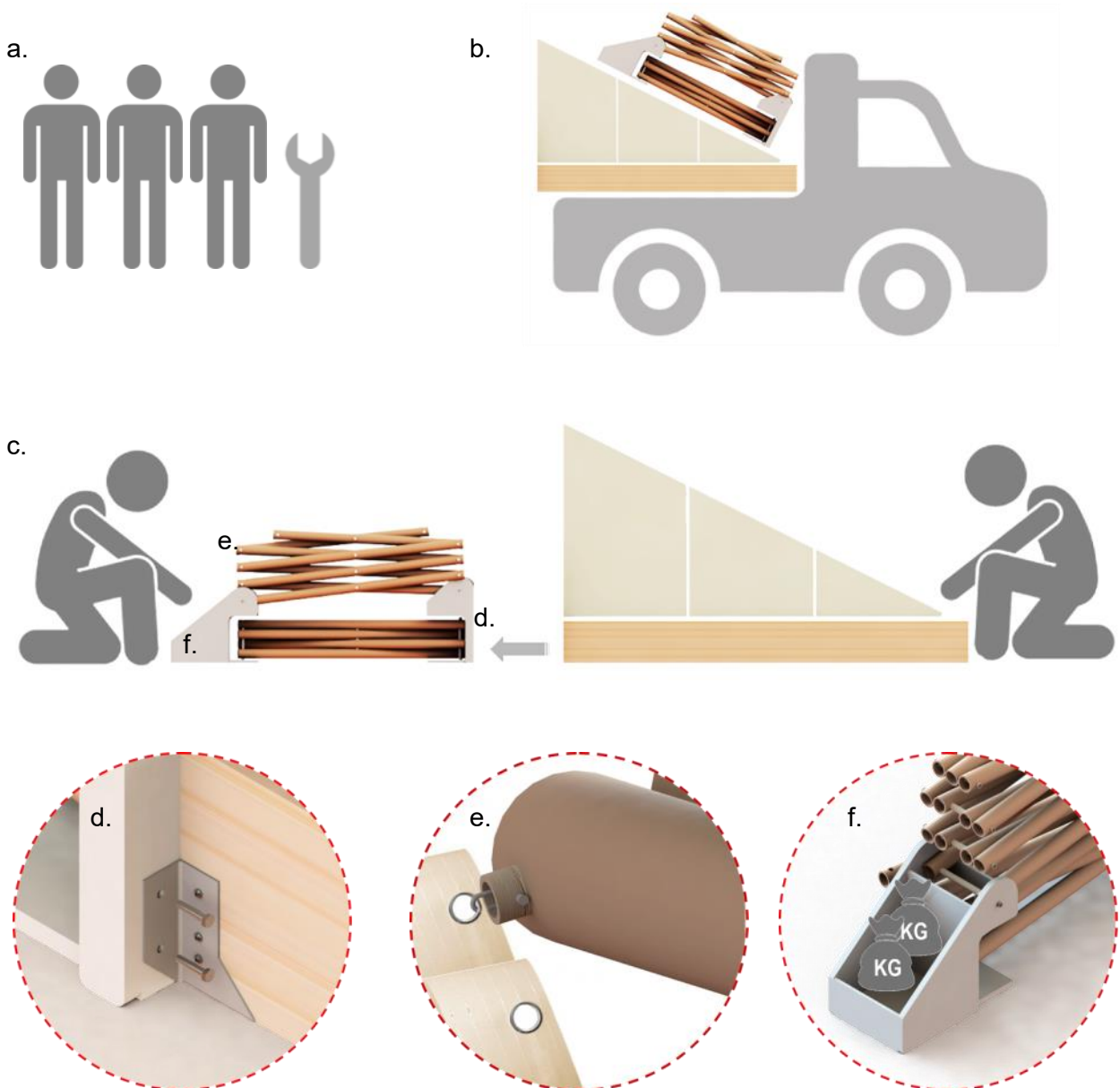
Fuente: Elaboración del autor

10.3.6 Montaje y proceso de despliegue

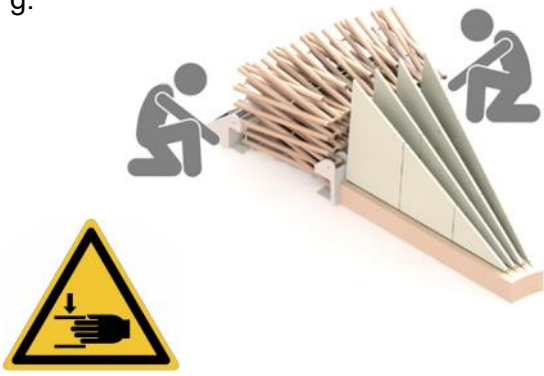
La figura 10.13 representa a modo de guía los pasos para el proceso de montaje y despliegue del escenario, identificando el equipo necesario para su ejecución y los procedimientos de ensamblaje necesarios previos al despliegue. Cabe mencionar, la importancia de tener precaución a la hora de manipular los semiarcos, aunque son estructuras livianas hay que manipularlas con cuidado, preferiblemente hacia los extremos exteriores de las barras de los módulos de tijeras, posicionando las manos en los laterales del semiarco, evitando el riesgo de atrapamiento.

Tiempo aproximado de montaje: 20 minutos

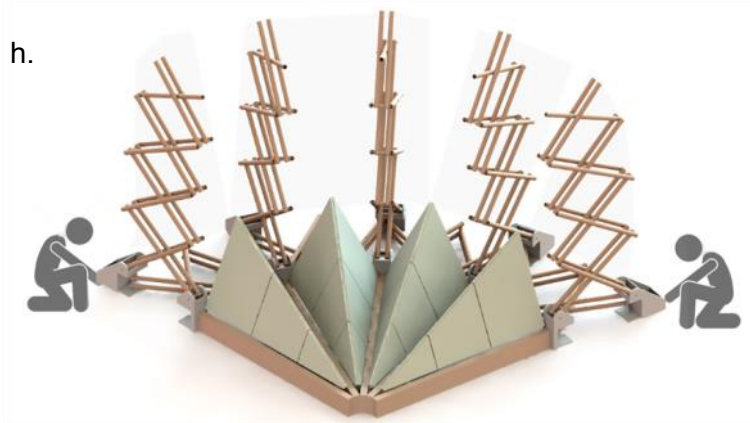
Tiempo aproximado para el proceso de despliegue: 15 minutos



g.



h.



i.

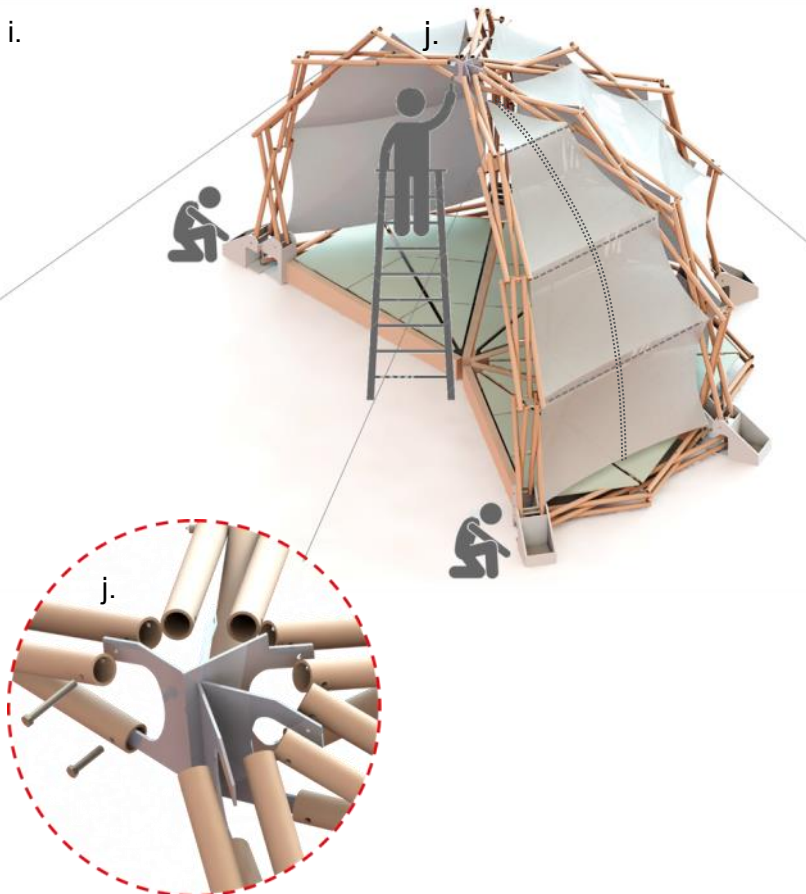


Figura 10.14 Proceso de despliegue escenario.
 g) Inicio de despliegue
 h) Etapa intermedia de despliegue
 i) Etapa final de despliegue:
 Articulación a nodo principal
 Cierre de cremalleras centrales de las membranas.

Cuando el montaje se realiza al exterior es necesario la implementación de cables tipo vientos y barras de rigidización entre semiarcos

Fuente: Elaboración del autor

10.3.7 Desmontaje y proceso de plegado

Las estructuras desarrolladas en la presente investigación, son definidas como estructuras temporales, ya que gracias a su característica principal de obtener un despliegue para su utilización y posteriormente proceder al repliegue para su transporte y almacenamiento, son catalogadas como estructuras efímeras que deben ser montadas y desmontadas.

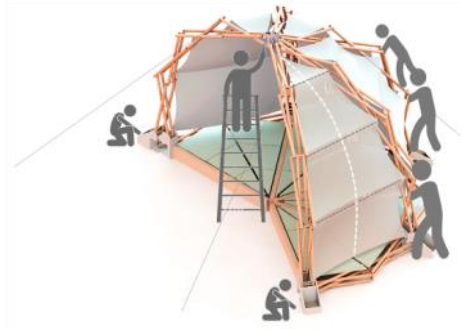
En la mayoría de los casos analizados previamente, la descripción del montaje de este tipo de estructuras es muy detallado, pero poco se habla del proceso de desmontaje, que según las características de la estructura, puede no ser el mismo al proceso reversible realizado durante el montaje, requiriendo otras herramientas o aumentando en número el personal de desmontaje.

Para el caso que nos ocupa en el escenario desplegable, la gravedad y el peso propio de los semiarcos son los factores más importantes para el proceso de desmontaje.

Para proceder al repliegue de la estructura, una vez su utilización haya finalizado, el primer paso es garantizar que el proceso de pliegue se realizara sin dificultades y con la mayor seguridad posible, para ello es necesario desmontar los elementos que puedan obstaculizar el proceso de repliegue de la estructura, todos aquellos elementos que no son propios de la estructura (decoración, equipos de iluminación, sonido y cableados). Y posteriormente retirar aquellos elementos estructurales que se instalaron como sistemas de bloqueo del movimiento, rigidización adicional o redundancia estructural.

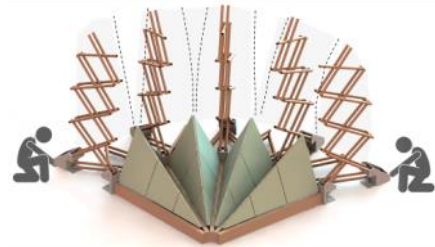
También es necesario, prever el desmontaje o repliegue de la cubierta durante el proceso de desmontaje. La solución más práctica a nivel constructivo es desmontar la membrana previamente, antes de plegar a estructura. Pero como bien se ha señalado anteriormente, que el objetivo es lograr el despliegue y pliegue de la estructura con sus cerramientos simultáneamente, así que se deberá proceder a abrir las cremalleras centrales de cada sección de membrana posicionadas entre los semiarcos, para facilitar el repliegue sin esfuerzos de tensión generados por la cubierta.

Esta situación sucede porque a medida que se repliega la estructura, la forma de la sección de la membrana se deforma debido al posicionamiento que van tomando los puntos de anclaje de la cubierta hasta obtener el pliegue total, las cremalleras permiten dividir la membrana en dos sub-secciones, evitando que los semiarcos sufran algún tipo de volcamiento lateral.



Ahora, para proceder a la desconexión de los semiarcos del nodo principal, es necesario contar con el equipo humano necesario para garantizar la seguridad del desmontaje. La escala y el material de los semiarcos, genera una estructura ligera que se manipula y controla fácilmente, de esta manera se requiere una persona desconectando los semiarcos del nodo principal y una persona en cada semiarco, que controle manualmente el repliegue de los semiarcos que se efectúa más rápidamente debido al peso propio.

Se ha de garantizar la seguridad del personal, manipulando correctamente el semiarco en los puntos donde no exista riesgo de atrapamientos, preferiblemente en los laterales de los semiarcos y hacia los extremos exteriores de las barras, además siempre realizar los procedimientos con guantes de seguridad.



La ventaja del método desarrollado facilita el desmontaje de la estructura, una vez se desconectan los semiarcos en la cúspide y se garantiza que no hay mayores fricciones entre los elementos, el tiempo de plegado se optimiza, la estructura se repliega por si sola y se puede proceder al transporte o almacenamiento de la misma, una situación que se repite en los siguientes prototipos realizados (figura 10.14).

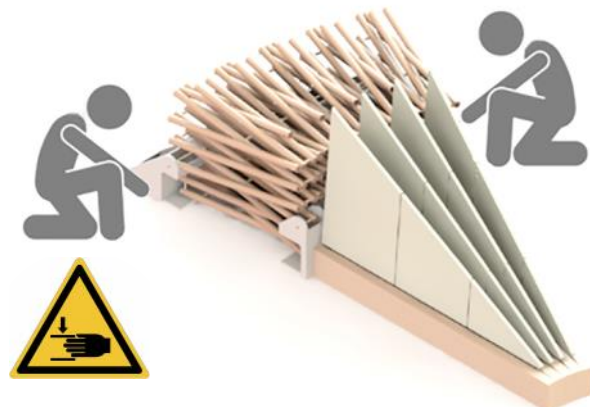


Figura 10.14 Optimización del proceso de desmontaje y repliegue de la estructura, debido al peso propio y sistema de plegado de los semiarcos
Fuente: Elaboración del autor

10.3.8 Fabricación e implementación

De la propuesta conceptual del escenario desplegable al prototipo construido, surgieron algunos imprevistos que obligaron a ajustar los procedimientos de despliegue del prototipo final.

Para el caso específico, los tubos de cartón se emplearon solo para configurar los semiarcos desplegable. Si que se incorpora la plataforma plegable pero no se incluyen las barras correspondientes a las tijeras del suelo, por esta razón no se genera el despliegue simultáneo de la estructura del suelo con los semiarcos.

La fabricación y ensamblaje de componentes consiste en configurar por una parte, los semiarcos con sus respectivas bases y por otra parte la plataforma desplegable.

La figura 10.15 expone el seguimiento fotográfico del proceso de fabricación y ensamblaje de estos componentes, junto con imágenes de los detalles constructivos de mayor interés, como la articulación entre barras, articulación entre vigas soporte de la plataforma y la conexión al nodo.

Para el proceso de despliegue (figura 10.16), al no incorporar las tijeras del suelo, el despliegue se divide en dos etapas. La primera etapa consiste en desplegar la plataforma plegable, posicionando las vigas a modo de apertura de un abanico, logrando la configuración final, situando cada viga en un eje radial en planta, correspondiente a la geometría proyectada.

Y la segunda etapa, una vez posicionados los semiarcos en su lugar y la plataforma plegable esta plana, se procede a la preinstalación de la membrana, sujetando la cubierta textil en los puntos de anclaje en los semiarcos plegados. A continuación se procede a desplegar cada semiarco para conectarlo al nodo central en la cúspide, manipulando manualmente y a través de un control visual, para obtener la posición ideal de despliegue.

La configuración espacial del domo toma forma, al desplegar cada uno de los semiarcos, que elevan simultáneamente la membrana, la cual es finalmente tensada y fijada a su posición final cuando el domo se encuentra totalmente desplegado y es una estructura estable.



Figura 10.15a Seguimiento fotográfico, fabricación y ensamble escenario desplegable.
Fuente: Elaboración del autor



Figura 10.15 b Seguimiento fotográfico, fabricación y ensamble escenario desplegable.
Fuente: Elaboración del autor



Figura 10.16 Proceso de despliegue escenario desplegable.
Fuente: Elaboración del autor

10.3.9 Uso y durabilidad

El escenario desplegable se realiza como primer prototipo a escala 1:1, para comprobar la viabilidad constructiva del método geométrico propuesto en esta investigación, respondiendo a la necesidad de una estructura temporal ligera desmontable, que sirviera como escenario para exposiciones y conferencistas dentro de un espacio cerrado, facilitando así las condiciones para la selección de los materiales, ya que no estarían expuestos a la intemperie y la estructura no estaría sometida a cargas de viento, lluvia o nieve.

Además solo se estima un máximo de cuatro procesos de pliegue y despliegue, para luego proceder a desmontaje total de la estructura y reutilizar sus componentes en otros proyectos.

Debido a la geometría de medio domo, se visualizo una inclinación hacia adelante de la estructura, generado por el empuje de los semiarcos, que tienden a continuar su proceso de despliegue, al no existir los semiarcos que configuran la geometría de un domo completo, de esta manera fue necesario incorporar una cuerda en el semiarco central posterior atado al muro portante del recinto para reducir este empuje.

Durante su utilización, la estructura se mantuvo estable, aunque los arcos no se sometieron a cargas adicionales, más allá de su peso propio, tras dos procesos de pliegue y despliegue de la estructura, las barras superiores de los semiarcos, presentaron fisuras y deformación por pandeo.

Se enumeran los posibles causas, referidas al peso del nodo, fallo en la conexión semiarcos-nodo, permitiendo que el nodo se desplazara y la posibilidad de humedeciendo de las barras que se encontraban a mayor altura y muy cerca del conducto del aire acondicionado, afectando la capacidad estructural de los tubos de cartón.

Como solución temporal, se remplazan las barras y se implementan nuevos tubos de cartón reforzados en los extremos y centro de la barra a través de abrazaderas del mismo material.

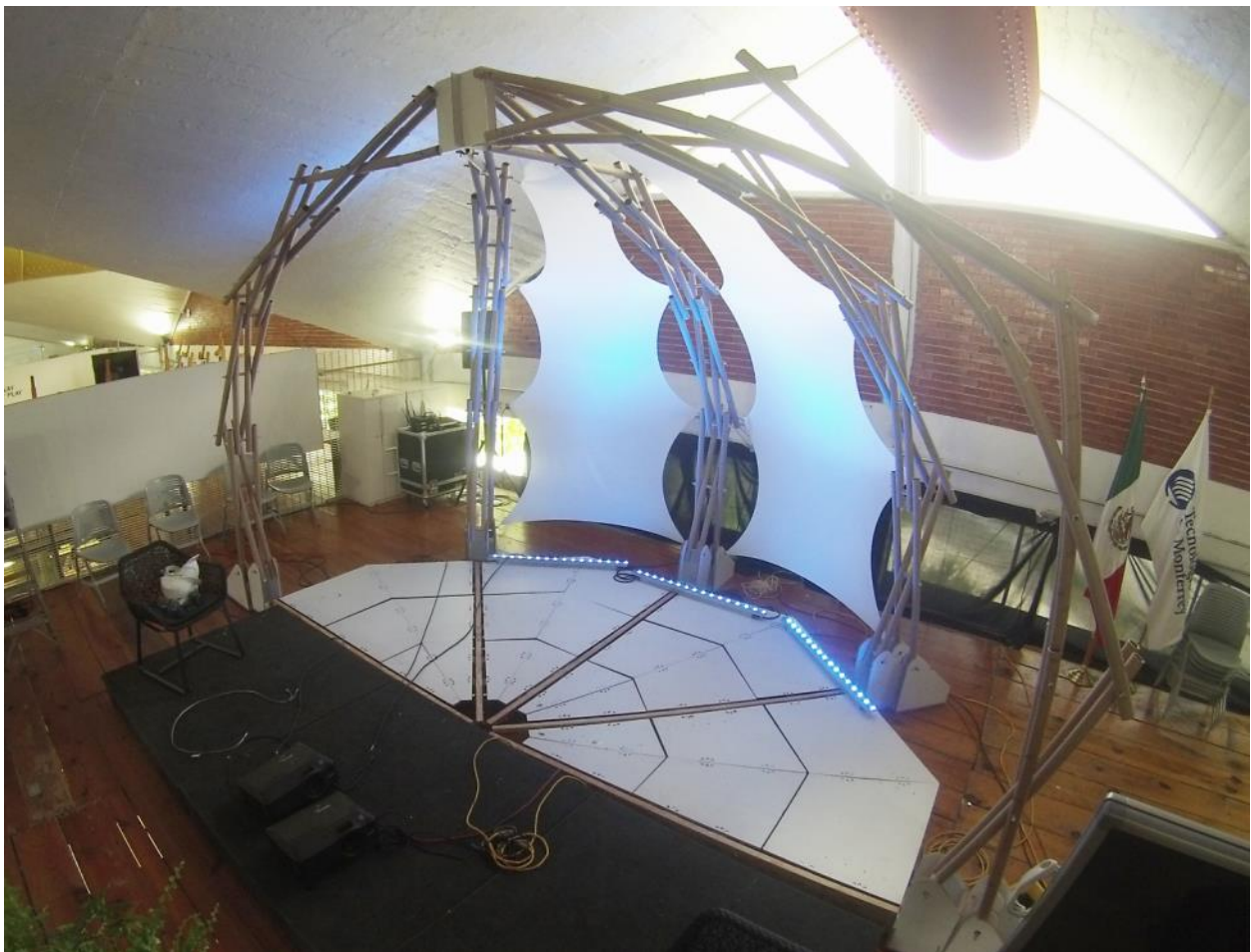
La plataforma plegable realizada con paneles reutilizados de madera aglomerada, presentaron fisuras y levantamiento de la capa de acabado en las zonas donde se localizan las bisagras que articulan dos paneles y generan la cresta de la plegadura.

Este fallo, reafirma la necesidad de que este punto de articulación debe realizarse a través de una bisagra flexible.

Finalizada la vida útil de escenario, el diseño modular y conexión entre elementos facilita el desmontaje y recuperación de la mayoría sus componentes para su posterior reutilización en otros proyectos.

Figura 10.17 Montaje escenario desplegable.

Fuente: Elaboración del autor



10.4 Stand Egg

10.4.1 Concepto

El desarrollo y construcción del presente prototipo, se realiza con el objetivo de diseñar un domo que implemente el despliegue simultáneo de la estructura de suelo, junto con el despliegue de los semiarcos, siendo el principal interés, el comprobar la viabilidad técnica y constructiva del método propuesto en esta investigación para el diseño de domos desplegables. Parte de los resultados fueron publicados previamente en la revista *Archi Doct* [92] y que se desarrollan con mayor detalle en el presente apartado.

Para esta oportunidad se diseña un stand desplegable, bajo los requerimientos de ocupar un diámetro máximo de 3.00 metros y una altura máxima de 2.50 m, transportable y liviano.

El diseño no incorpora la plataforma de suelo, debido a las exigencias de liviandad y se propone instalar secciones de membranas entre arcos como cerramiento vertical. Con las variables del diámetro, altura y tipos de cerramientos definidas, se procede a la búsqueda de la forma en la tabla interactiva (figura 10.19 y 10.20).



Figura 10.18 Stand Egg.
Fuente: Elaboración del autor

10.4.2 Búsqueda de la forma

Partiendo de polígono a seleccionar, se define el heptágono estrellado como la geometría base para la configuración del stand, se elige el arco de herradura como mejor opción para la elevación y en planta (tabla 10.2).

Al introducir los valores numéricos, se obtiene una barra de 0.62 m, para lograr un diámetro de 2.86 m y una altura total de 1,75 m. Se considera que esta proporción es acertada para el área a cubrir que se exige, pero la altura es demasiado baja, de esta forma se implementa una solución que permite aumentar la altura libre del recinto y es viable para cualquier geometría.

En la tabla 10.2, en la sección de arco en elevación, se presenta la opción de adicionar módulos de tijeras rectas con articulación central a los módulos inferiores que forman el arco base (figura 10.20). Esto permite aumentar la altura libre del domo a desarrollar y generar nuevas configuraciones espaciales del tipo elipse en altura. Considerando la misma longitud de barra y cumpliendo con las condiciones de plegabilidad, el nuevo semiarco con mayor altura se pliega correctamente.

La altura adicional se representa en la tabla 10.2 y en el esquema geométrico general con el valor de (t), la altura aumenta según el número de módulos de tijeras que se incluyan.

$$e = \sqrt{b^2 - a^2}$$

$$g = (r) \sin \beta$$

Arco rebajado

$$h = r - (e + g)$$

$$f = h + e$$

Arco herradura

$$h = g + (r - e)$$

$$f = h + e$$

Aumentar altura del arco con módulos de tijeras (art. central)

$$t = (c) \cos \beta$$

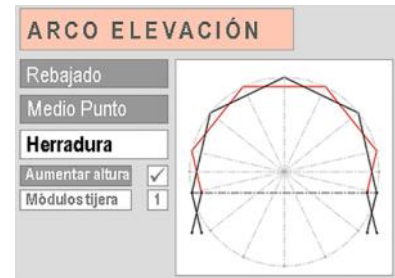
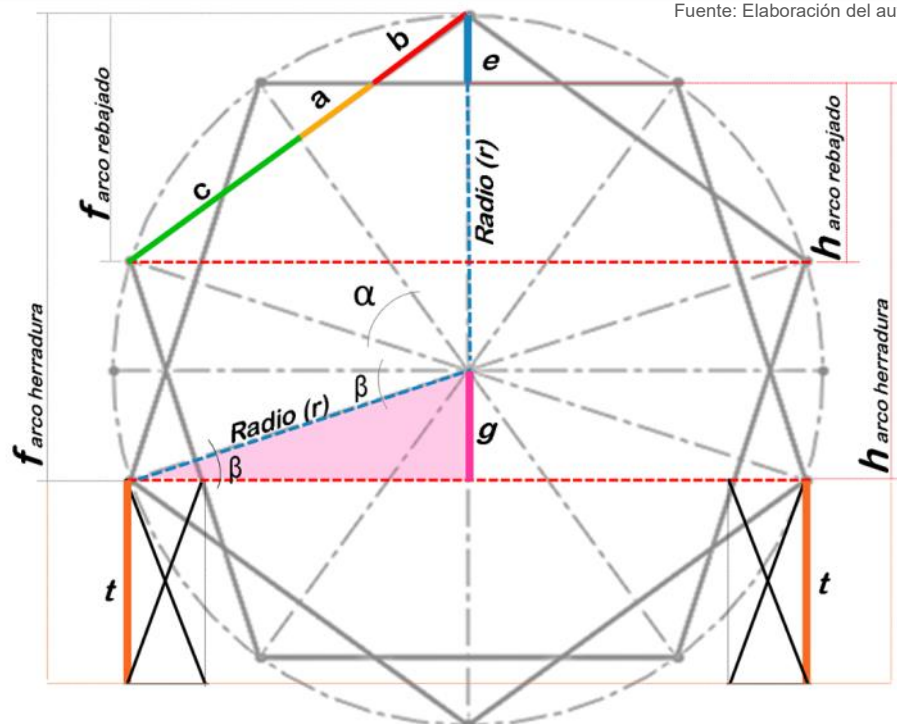


Figura 10.19 Sección en la tabla interactiva. Aumento de altura del semiarco adicionando un módulo de tijera inferior con articulación central

Fuente: Elaboración del autor

Figura 10.20 Esquema geométrico. Aumento de altura del semiarco adicionando un módulo de tijera inferior

Fuente: Elaboración del autor

Para esta aplicación, solo se agrega un módulo de tijera (1f), aumentando la flecha total a 2,35 m y obteniendo una altura libre de 2.21 m. La geometría resultante del domo, similar a un huevo, inspira la denominación del stand como Stand Egg.

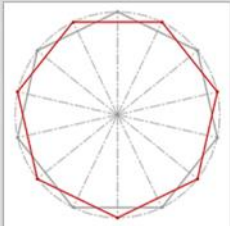
Nuevamente cabe aclarar, que los resultados y dimensiones arrojados en la tabla interactiva, corresponden a los puntos de articulación de las barras y genera solo una geometría que expone una forma inicial trazada con líneas y ejes generales.

POLÍGONO

Pentágono

Hexágono

Heptágono



MÉTODO GEOMÉTRICO PARA CONFIGURACIÓN

ARCO ELEVACIÓN

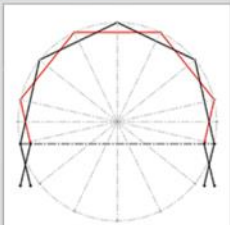
Rebajado

Medio Punto

Herradura

Aumentar altura

Módulos tijera 1



VISTAS

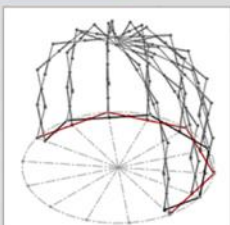
ARCO PLATAFORMA

Rebajado

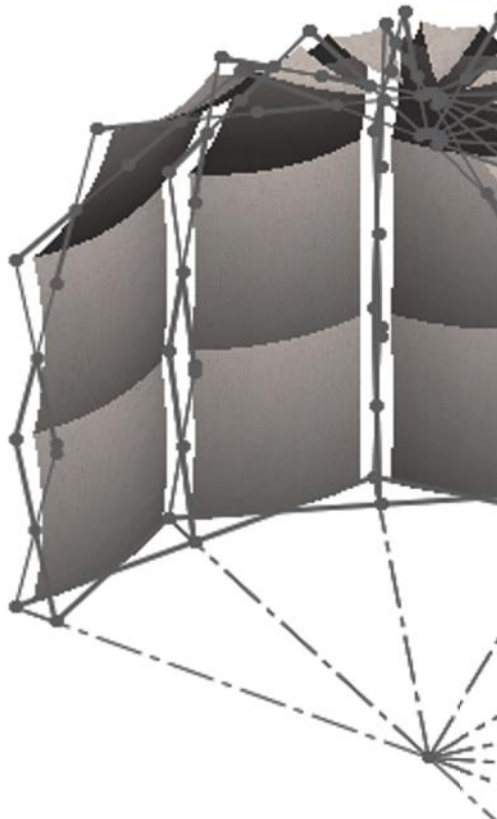
Medio Punto

Herradura

Completo



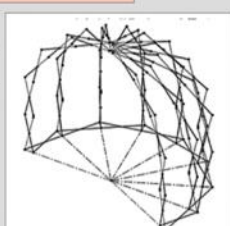
PLANTA



GEOMETRÍA PLATAFORMA

Sin plataforma

Con Plataforma



PROCESO DE DESPLIEGUE


CUBIERTA

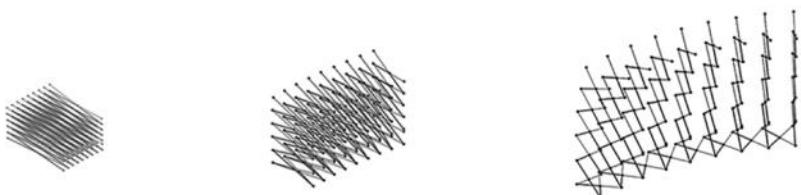
Sin cubierta

Interior

Exterior

Seccionada



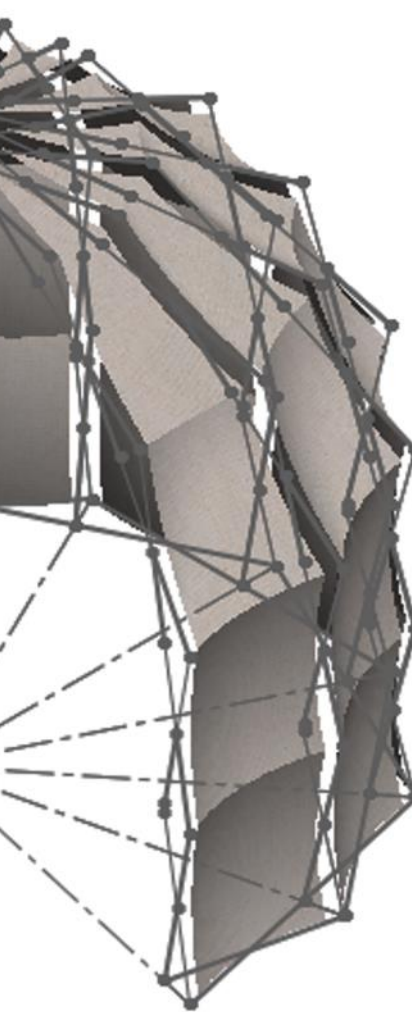


Se ha de tener en cuenta los incrementos adicionales en la longitud de la barra para alojar los correspondientes agujeros para las articulaciones, junto a la sección y material a implementar en la barra. Así como el incremento de altura, al incorporar la estructura del suelo correlacionada con los semiarcos desplegables.

Tabla 10.2 Tabla Interactiva. Búsqueda de la forma domos desplegables. Fuente: Elaboración del autor

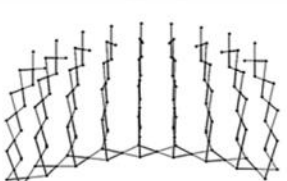
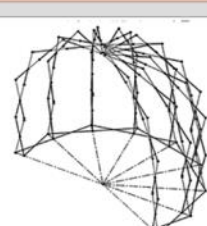
ACCIÓN DE DOMOS DESPLEGABLES

ELEVACIÓN

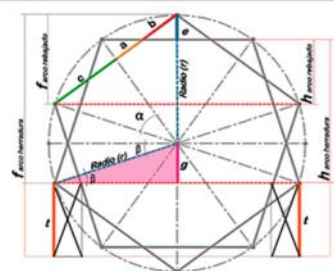


AXONOMETRÍA

ELEGIR ESTRUCTURA

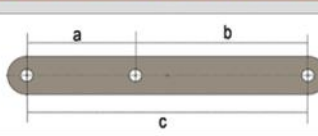



DEFINA UN VALOR



Longitud de barra mts (c)	0,62
Diámetro total mts (d)	<input type="text"/>
Nº de lados poligono (n)	7

VALORES RESULTANTES



a	b	c
0,29	0,33	0,62
Longitud de barra mts (c)	0,62	
Diámetro mts (d)	2,86	
Radio mts (r)	1,43	
Ángulo α (grad)	25,71	
Ángulo β (grad)	12,86	

ALTURAS SEGÚN TIPO DE ARCO

g =	0,32	1 t =	0,60
-----	-------------	-------	-------------

Arco	Flecha (f)	Alt libre (h)	Esp. (e)
	1,11	0,97	0,14
	1,71	1,57	0,14
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
	1,75	1,61	0,14
	2,35	2,21	0,14

k =	0,10
-----	-------------

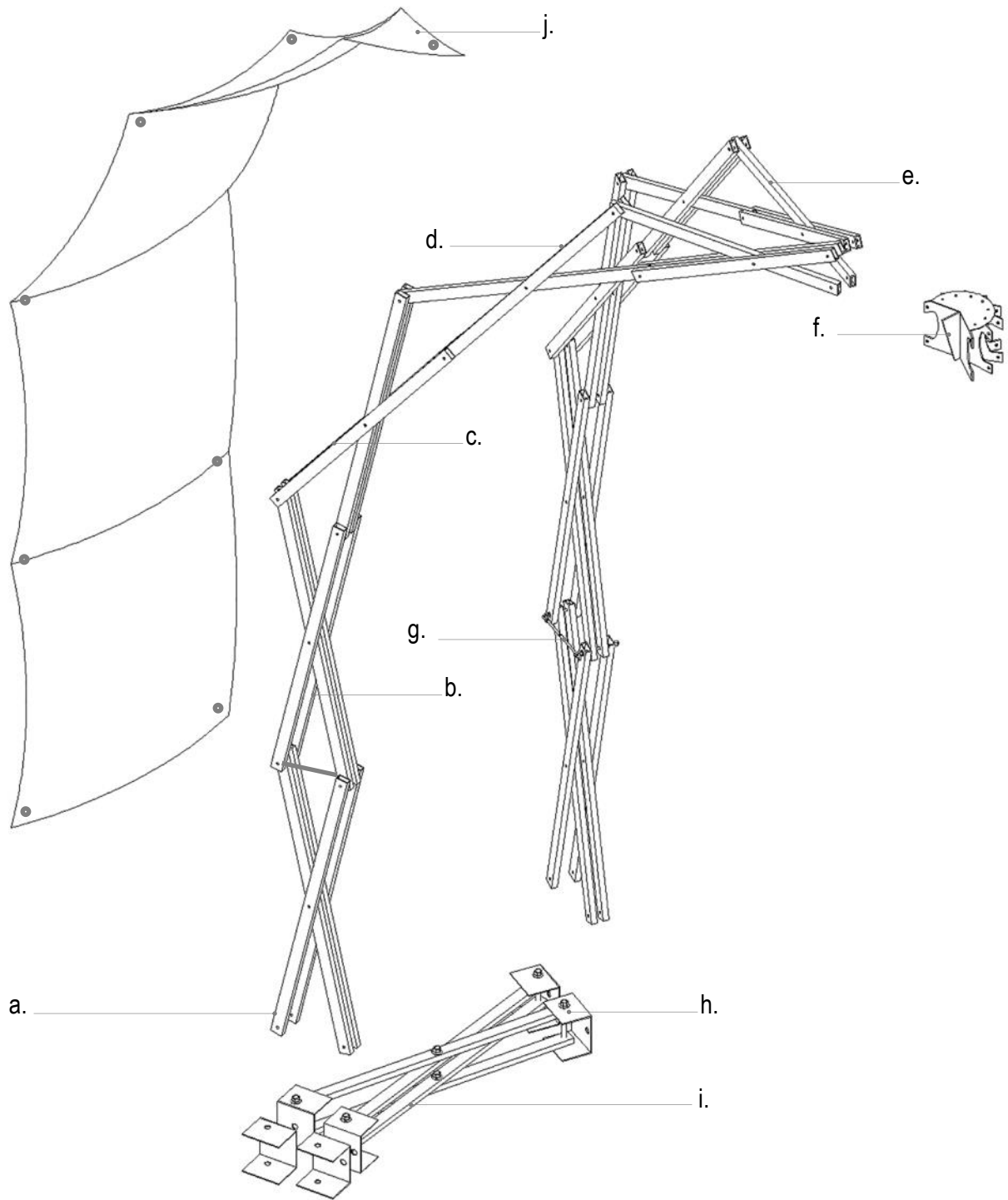


Figura 10.21 Axonometría explotada. Componentes sección Stand Egg

- a. Módulo (1). Tijera con articulación central . 4 barras. Perfil tubular rectangular en aluminio 12,7 X 25,4 mm
 b. Módulo (2). Tijera con articulación excéntrica . 4 barras. Perfil tubular rectangular en aluminio 12,7 X 25,4 mm
 c. Módulo (3). Tijera con articulación excéntrica . 4 barras. Perfil tubular rectangular en aluminio 12,7 X 25,4 mm
 d. Módulo (4). Tijera con articulación excéntrica . 3 barras. Perfil tubular rectangular en aluminio 12,7 X 25,4 mm
 e. Módulo (5). Tijera con articulación excéntrica. Longitudes recortadas por articulación con el nodo. 3 barras. Perfil tubular rectangular en aluminio 12,7 X 25,4 mm
 f. Nodo central en laminas de Alucobond®. Espesor 3 mm
 g. Sistemas de bloque adicional. Barra roscada + armellas
 h. Soportes metálicos. Sistema de anclaje para postes de madera. Articulación entre semiarcos y tijeras del suelo
 i. Módulo de tijera suelo. 4 barras. Perfil tubular rectangular en aluminio 12,7 X 25,4 mm
 j. Cubierta textil entre semiarcos. Lycra, incluye ojetes para anclaje a los semiarcos mediante mosquetones.

Fuente: Elaboración del autor

10.4.3 Componentes estructurales

La figura 10.21 expone a manera de axonometría explosionada los componentes estructurales que forman la sección estándar o porción característica de la geometría del domo desarrollado, definidos en:

- Módulos de tijeras para los semiarcos

Material: Perfil tubular rectangular en aluminio 12,7 X 25,4 mm (1/2' X 1')

Cada semiarco se compone de cinco módulos de tijeras. Numerados de abajo hacia arriba, los módulos de tijera del 1 al 3 se componen de cuatro barras y los módulos 4 y 5 se componen de tres barras (figura 10.22).

Aunque la prioridad es tratar de obtener el mayor número de barras de la misma longitud para facilitar su fabricación y montaje, debido a las características constructivas para implementar el nodo, es necesario recortar las barras del último módulo de tijera que se articula al mismo. La figura 10.22 señala los diferentes tipos de barras utilizados.

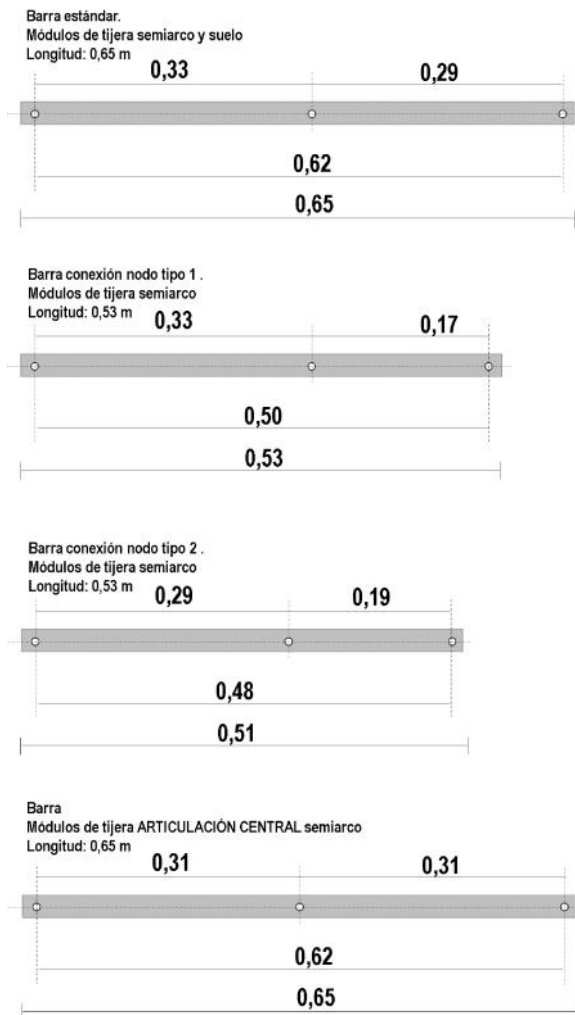


Figura 10.22 Longitudes de la barra para configuración del Stand Egg.
Fuente: Elaboración del autor

- Módulos de tijeras para la estructura del suelo

Material: Perfil tubular rectangular en aluminio 12,7 X 25,4 mm (1/2' X 1')

Cada módulo de tijera de suelo esta compuesto por cuatro barras de aluminio articuladas a los semiarcos a través de los soportes metálicos. Cada módulo de tijera del suelo, recibe un semiarco en cada extremo logrando la correlación del despliegue simultáneo entre tijeras horizontales y tijeras verticales.

- Soportes

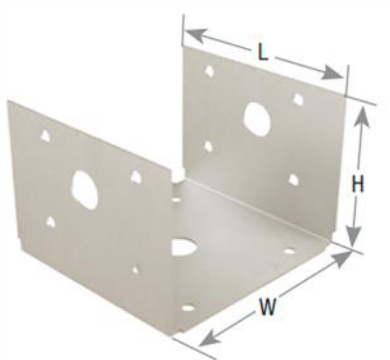
Corresponde a piezas en U, denominados anclajes metálicos para postes de madera. Dimensión W:3-9/16', H: 2-1/2', L: 3-3/8' (figura 10.23). Permiten la articulación entre los semiarcos y el módulo de tijera de suelo correspondiente.

- Nodo principal

Pieza que articula todos los semiarcos en la cúspide del domo y estabiliza la estructura. Realizada a través del maclado de placas de composite cubiertas por laminas de aluminio (Alucobond®).

Figura 10.23 Soportes metálicos. Articulación entre semiarcos y módulos de tijera de suelo.

Fuente: <https://www.mitek-us.com/resources/product-catalog/>
Recuperado [12/07/2019]



D44-TZ

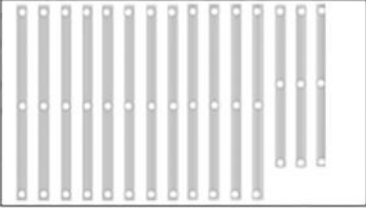


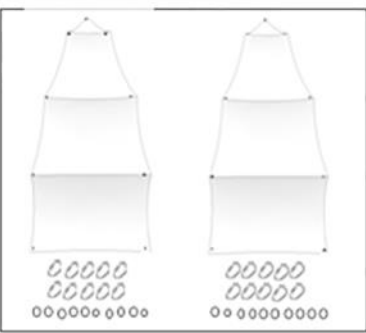
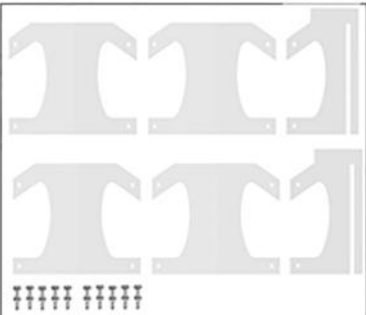
Dimensions (in)		
W	H	L
3-9/16	2-1/2	3-3/8

- Membrana.

Cubierta textil en lycra, sujeta entre semiarcos a través sistemas de mosquetones que se anclan a las hembrillas posicionadas en cada articulación de los módulos de tijera.

10.4.4 Materiales y cantidades

Figura 10.24 Materiales y cantidades fabricación Stand Egg
Fuente: Elaboración del autor

BARRAS TUB. ALUM. □25,4X12,7 MM				SUBTOTAL		
		SEMIARCOS	8	BARRAS	17	136
		TIJERAS SUELO		BARRAS	28	28
		TOTAL			164	
HERRAJES SEMIARCOS				TOTAL		
		SEMIARCOS	9			
		HEMBRILLAS CERRADA M6 - 60 X SEMIARCO	30	270		
		ARANDELAS M6 X SEMIARCO	92	828		
		MANGUITOS CILÍNDRICO M6- 30 X SEMIARCO	20	20		
		TUERCA M10 X SEMIARCO	18	162		
SOPORTE SEMIARCOS				TOTAL		
		TIJERAS SUELO	7			
		SOPORTE PARA MADERA TIPO U/USP	4	28		
		VARILLA ROSCADA M10-80	5	35		
		ARANDELAS M10	20	140		
		TUERCAS M 10	20	140		
CUBIERTA MEMBRANA				TOTAL		
		Patronaje sección de cubierta desplegable				
		SECCIONES	7	TELA M²	2	10,5
				OJALES METAL	22	154
				MOSQUETONES	22	154
NODO - PANEL ALUCOBOND				TOTAL		
		Despiece para piezas nodo central				
		LÁMINA 1000*1000*3 MM	1	1		
		TORNILLOS M6-30	18	18		
		TORNILLOS M6-60	18	18		
		ARANDELAS M6	36	36		
		TUERCAS M6	18	18		

10.4.5 Dimensiones

Figura 10.25 Elevación Stand Egg desplegado Fuente: Elaboración del autor

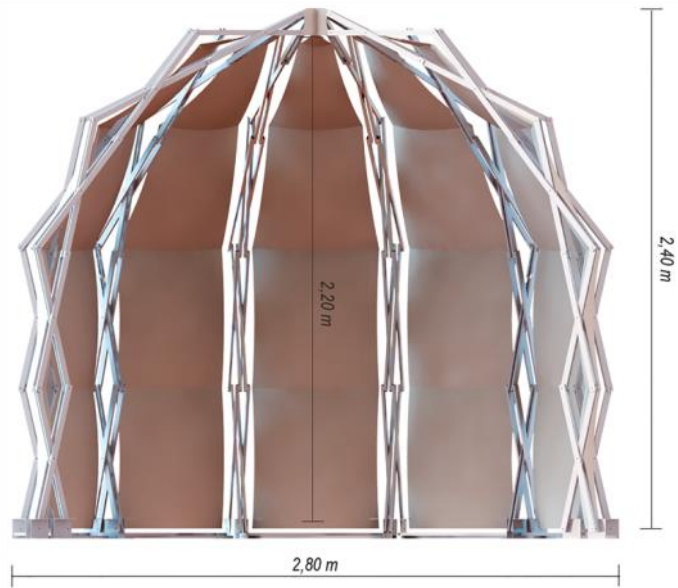


Figura 10.26 Planta Stand Egg desplegado. Fuente: Elaboración del autor

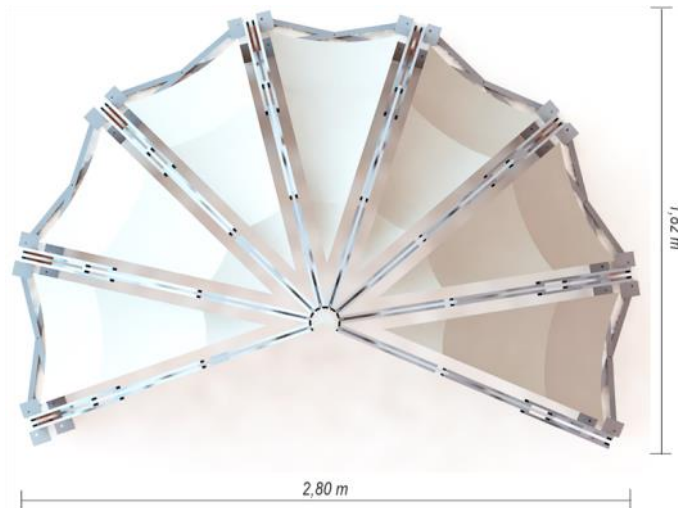


Figura 10.27 Axonometría Stand Egg desplegado. Fuente: Elaboración del autor



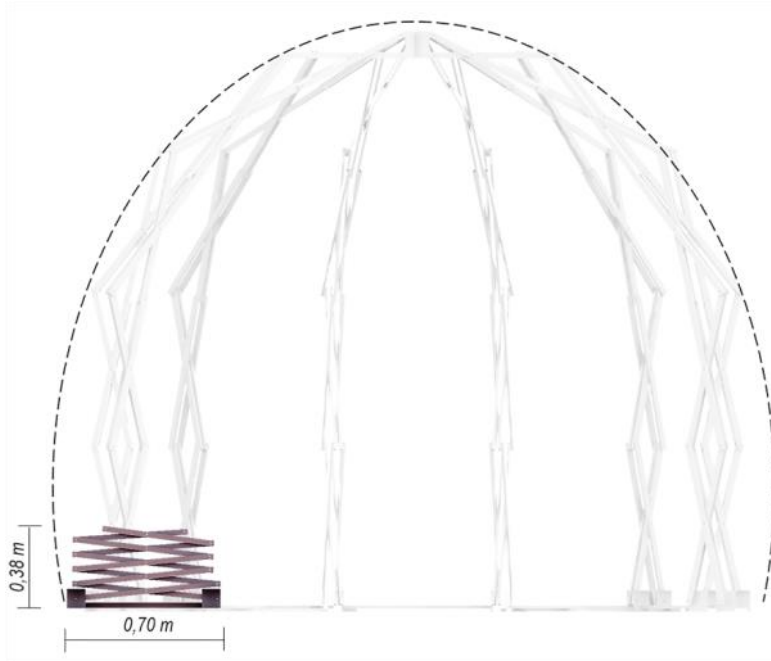


Figura 10.28 Elevación Stand Egg plegado.

Fuente: Elaboración del autor



Figura 10.29 Planta Stand Egg plegado.

Fuente: Elaboración del autor

Figura 10.30 Axonometría Stand Egg plegado

Fuente: Elaboración del autor

10.4.6 Montaje y proceso de despliegue

La figura 10.31 expone las etapas a seguir para el transporte, manipulación, montaje y despliegue del stand. El conjunto estructural plegado logra unas dimensiones de 1,40 x 0,70 x 0,38 m, viable para transportar en un plato de un vehículo tipo van o camioneta, también es viable separar la estructura por secciones y ensamblarla en situ. Se cuenta con un equipo de cuatro personas para la implementación del proceso de despliegue del stand.

El proceso de despliegue de esta estructura difiere del anterior prototipo descrito, ya que el Stand Egg no incorpora la plataforma del suelo, y de esta manera no cuenta con las vigas posicionadas de forma radial, que controlan el despliegue con radio constante. Para este prototipo que solo incluye las tijeras del suelo, el despliegue que se describe es de radio variable (Ver capítulo 8).

Esta tipología de despliegue condiciona el espacio requerido en planta para lograr el despliegue sin interferencias, ya que como se ha visto en capítulos anteriores, su recorrido genera, en las primeras etapas un despliegue casi lineal y en las etapas intermedias del despliegue, toma una curvatura repentina y se posiciona finalmente para obtener la geometría establecida.

De esta manera, se ha de tener en cuenta durante el proceso de despliegue, el área necesaria, aproximadamente dos veces el diámetro del domo desarrollado, para que la agrupación de módulos de tijeras del suelo pueda desplegarse sin dificultades (figura 10.32).

El Stand Egg no configura un domo completo, así que el tope de apertura se controla visualmente cuando todos los semiarcos verticales, que se han desplegado simultáneamente y se juntan en la cúspide, garantizado obtener previamente la posición ideal de despliegue.

La fuerza necesaria y seguridad del despliegue se obtiene gracias a las cuatro personas consideradas como el equipo necesario para controlar manualmente la estabilidad de los arcos, que por su esbeltez tienden a volcarse a los lados, pero esta situación se controla fácilmente y no tiene mayor dificultad cuando se incorpora el nodo y se fija los semiarcos a la piedra angular, estabilizando la estructura.

Finalizado el proceso de despliegue, se requiere de una escalera de montaje adicional para poder llegar a la altura de la cúspide y asegurar la articulación del nodo con los semiarcos por medio de tornillos pasantes y tuercas.

El sistema de cubierta proyectado como una cubierta textil en lycra es preinstalada cuando la estructura esta plegada y se eleva conjuntamente con los arcos, anclando los extremos superiores de la tela al nodo cuando la estructura es estable.

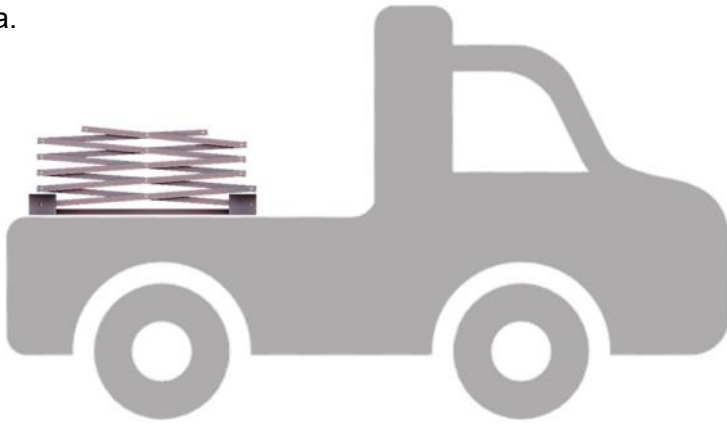
Cabe recortar el riesgo de atrapamiento debido a las características de la estructura, así que una correcta manipulación de los módulos de tijeras mientras se pliegan o despliegan es manipularlos desde las caras extremas de las barras.

Tiempo aproximado de montaje: 15 minutos

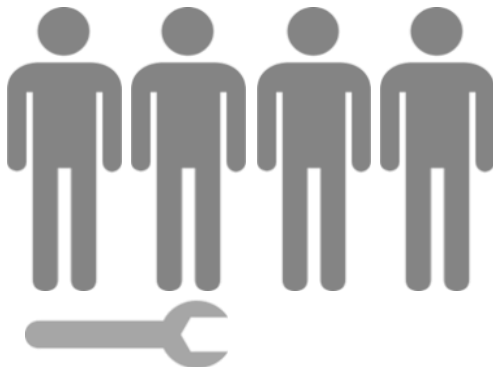
Tiempo aproximado para el proceso de despliegue: 5 minutos

Peso de estructura: 40 kg

a.



b.



c.



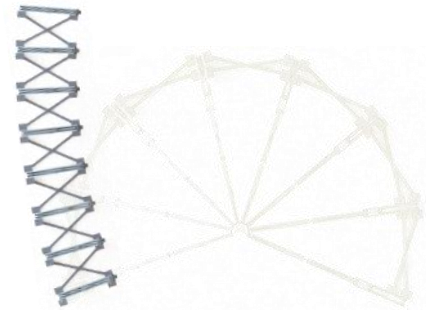
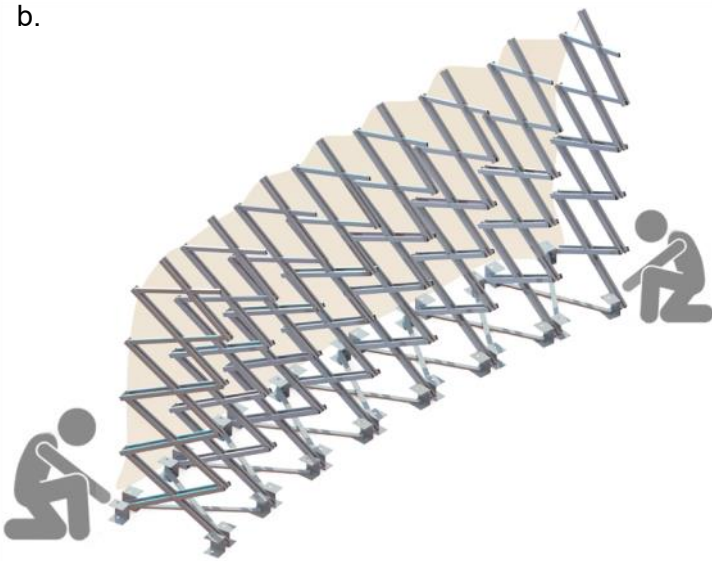
Figura 10.31 Transporte y equipo necesario montaje Stand Egg.
 a) Transporte en vehículo tipo van o camioneta
 b) Equipo de 4 personas requerido para el montaje y despliegue de la estructura.
 c) Precaución riesgo de atrapamiento por la manipulación de la estructura.

Fuente: Elaboración del autor

a.



b.



c.

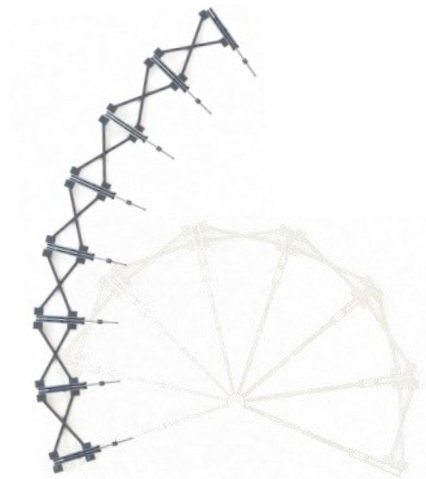
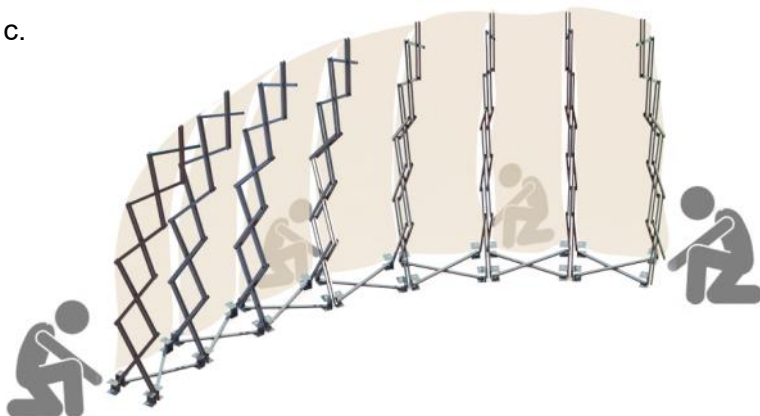
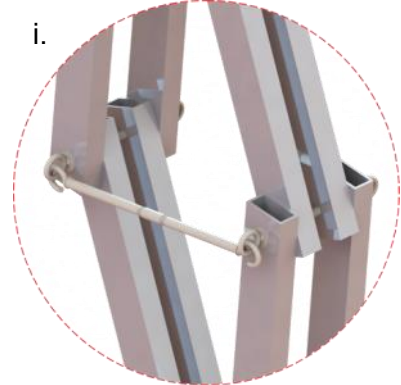
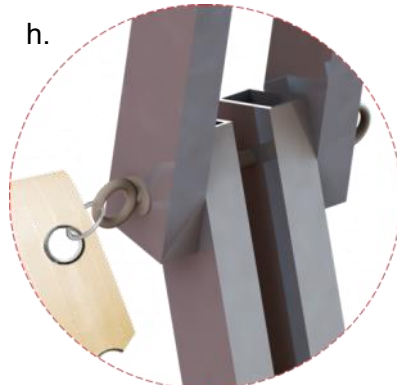
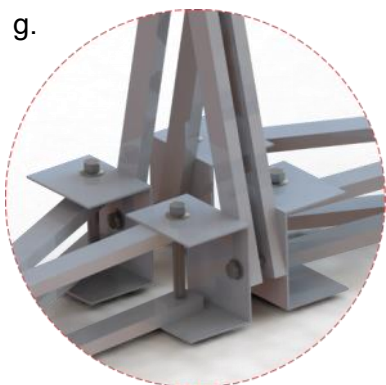
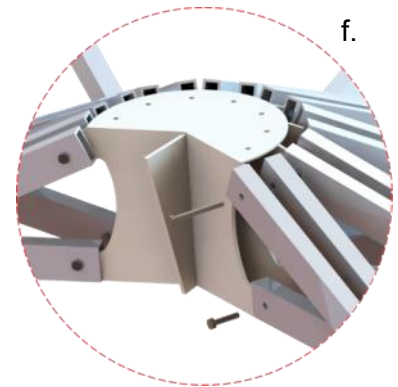
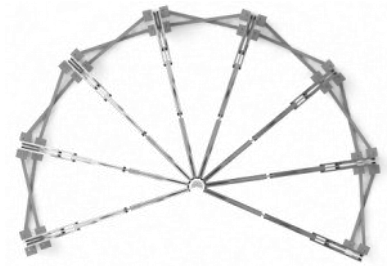
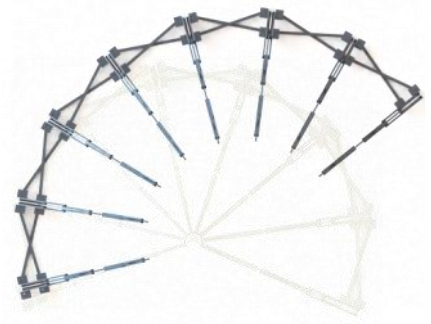
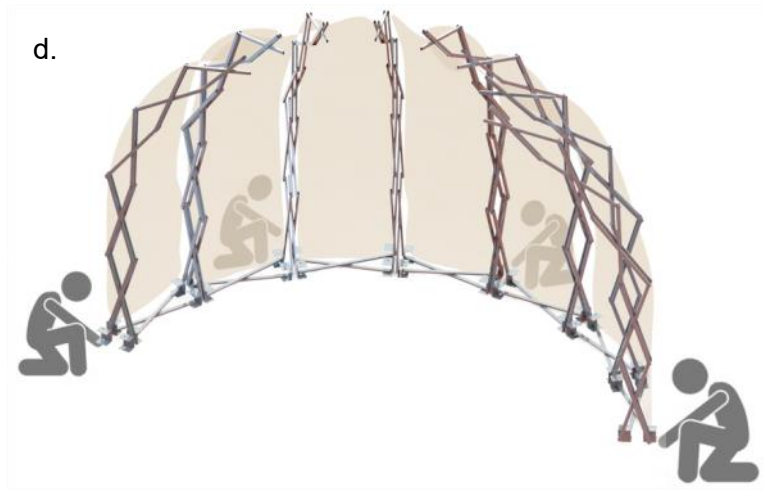


Figura 10.32 Proceso de despliegue Stand Egg.

a) Inicio de despliegue. b) Etapa intermedia de despliegue. c) Etapa de despliegue con mayor extensión
 d) Etapa de despliegue con curvatura variable. e) Etapa final de despliegue: Articulación a nodo principal.
 f) Detalle conexión nodo -semiarcos. g) Detalle conexión semiarco con tijeras de suelo. h) Detalle sujeción membrana. i) Detalle sistema adicional de bloqueo de movimiento.

Cuando el montaje se realiza al exterior es necesario la implementación de cables tipo vientos

Fuente: Elaboración del autor



10.4.7 Fabricación e implementación

La fabricación y ensamble de los componentes para el Stand Egg se divide en tres procesos fundamentales: Corte de barras, realización de agujeros y ensamble de módulos tijera para los semiarcos y la estructura del suelo. Cada uno de los procesos conlleva un control métrico, verificación de la longitud y posicionamiento de los agujeros para garantizar el correcto despliegue de las tijeras. Además se debe realizar una correcta clasificación de los módulos de tijeras según su posición y componente estructural al cual pertenecen, la figura 10.33 expone una galería de imágenes representativas sobre el proceso de fabricación y ensamble de componentes.

Durante el ensamble de los semiarcos, se ha de verificar la correcta unión entre módulos de tijeras, garantizando la condición de plegabilidad y el posicionamiento de un módulo de tijera con respecto al adyacente para obtener la curvatura establecida dada por la geometría base (Ver capítulo 3, apartado 3.2.2). Además se debe corroborar el orden en que se añaden las tijeras, ya que los módulos de tijeras con cuatro barras, pertenecen a los módulos inferiores del semiarco, siendo la tijera de articulación central el módulo inicial y los módulos de tijeras con tres barras pertenecen a tijeras superiores (figura 10.21).

Cada articulación de los módulos de tijeras de los semiarcos debe incluir los accesorios necesarios para unir las barras entre sí, proporcionando el sistema de sujeción de la membrana. El sistema de articulación entre barras se componen de dos arandelas y dos hembrillas cerradas con rosca métrica unidas a través de un manguito, que realiza la función de pasador.

Una vez están armados los semiarcos, se procede a ensamblarlos con la agrupación de tijeras del suelo. El sistema de conexión entre ambos componentes se realiza a través de conector tipo U, que se incluye en cada extremo de un módulo de tijera de suelo y se articula lateralmente, con los correspondientes extremos inferiores del primer módulo de tijera de cada semiarco, a través de un tornillo pasante asegurando la articulación con su respectiva tuerca y arandela, obteniendo finalmente la correlación mecánica para el despliegue simultáneo de la estructura.

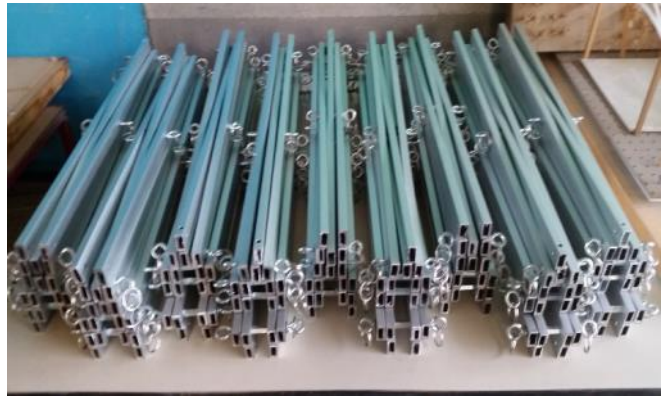


Figura 10.33 Seguimiento fotográfico, fabricación y ensamble Stand Egg. Fuente: Elaboración del autor

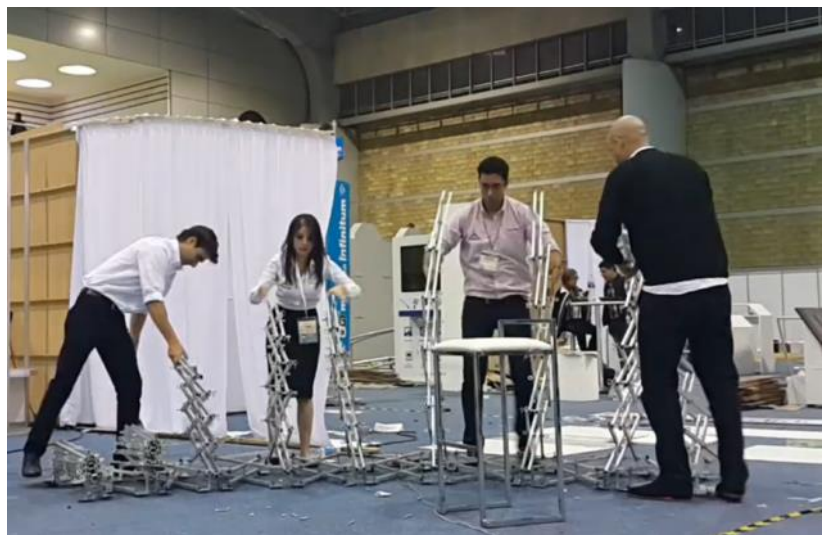




Figura 10.34 Proceso de despliegue prototipo Stand desplegable.
Fuente: Elaboración del autor



Figura 10.35 Sistema de bloqueo Stand desplegable.
Fuente: Elaboración del autor

10.4.8 Uso y durabilidad

El Stand Egg es diseñado como una construcción de uso temporal, proyectado para una duración de cinco años, en la actualidad la estructura se ha expuesto siete veces en diferentes eventos, estando en función durante cinco días en cada evento.

Referente al proceso de despliegue, que se realiza manualmente, se ha de destacar que la esbeltez de los semiarcos verticales y la cantidad de los mismos dificulta el despliegue, se necesitan más de dos personas para el proceso de montaje que controlen la estabilidad de la estructura, aunque una vez los semiarcos están conectados al nodo, el domo es estable y bastante rígido, sin incluir un sistema de bloqueo adicional. De todas maneras, por seguridad, si que se implementa un sistema de bloqueo por semiarco (figura 10.35)

No obstante, el proceso de desmontaje es mucho más rápido, se procede a la desconexión de los semiarcos de nodo principal y por peso propio, el proceso de plegado se realiza fácil y rápidamente, una de las principales ventajas que ofrece el método propuesto.

Figura 10.36 Pruebas de carga prototipo Stand Egg
Fuente: Elaboración del autor



También, a diferencia del escenario desplegable, la escala, la longitud de la barras y principalmente la elección del material en perfiles tubulares de aluminio, genera una estructura de mayor rigidez y estabilidad, permitiendo realizar pruebas de carga sobre el prototipo y observar a escala real las deformaciones resultantes, que resultaron favorables al añadir el peso de una persona sobre el domo (figura 10.36).

En la actualidad la estructura se encuentra en perfectas condiciones, en proceso de mejoras para optimizar el despliegue y el sistema de mecanismo más idóneo para la articulación del nodo y los semiarcos.

Figura 10.37 Stand Egg en uso y posicionado al aire libre
Fuente: Elaboración del autor



Figura 10.38 Geometría domo desplegable en bambú.
Fuente: Elaboración del autor

10.5 Domo Bambú



10.5.1 Concepto

Como prototipo final para esta investigación se propone desarrollar la geometría de un domo completo, proponiendo barras de bambú como material principal para las barras de los módulos de tijeras, con el objetivo de lograr estructuras desplegables con materiales sostenibles (figura 10.38).

Su desarrollo y fabricación se realizó gracias al apoyo de:

- Bambusa Estudio - Especialistas en Diseño de Estructuras y Decoración con Bambú [103].
- Ateneu de Fabricació Ciutat Meridiana [100].
- Y el laboratorio de fabricación CAD-CAM de la Universidad de Bath. Junto con el apoyo técnico de la PhD (c). Eliana Cortes.

Parte de los resultados y los avances obtenidos sobre este apartado son descritos en el artículo científico *Deployable Bamboo Dome* [85]

A continuación en los siguientes apartados se describe a mayor detalle el desarrollo y experimentación con esta nueva propuesta que integra en su diseño la utilización del bambú e incorporación de piezas específicas realizadas con impresión 3D.

El domo de bambú se desarrolla en dos fases, una primera fase que comprende la realización de un modelo a una escala menor, con barras de madera de sección circular, que se enfatiza en estudiar la geometría, el proceso de despliegue y la viabilidad de las conexiones entre componentes. Y una segunda fase que implementa las barras de bambú y conexiones realizadas a medida con impresión 3D, en un nuevo modelo a mayor escala.

10.5.2 Búsqueda de la forma - modelo físico en madera

Como se describe anteriormente, para el desarrollo del domo en bambú se inicia con un primer modelo en madera que representa a escala, un acercamiento a los detalles constructivos a desarrollar. La búsqueda de la forma para este primer modelo, parte de una longitud de barra ya establecida, en este caso una barra de madera de sección circular que se vende comercialmente como producto de manualidades de longitud de 300 mm y diámetro de 15 mm.

Se escoge esta dimensión por ser una proporción de barra que se adapta a los diferentes herrajes que se encuentran comercialmente, idóneos para realizar las diferentes conexiones entre módulos de tijera. Es así que se propone una barra que incluye en sus extremos armellas cerradas para madera, obteniendo una longitud total entre puntos de articulación de 320 mm (figura 10.39).

Ahora, a través de la tabla interactiva se procede a seleccionar la geometría de diseño y establecer el punto de posicionamiento de la articulación central para cada barra que conforman los módulos de tijera introduciendo como valor base 320 mm como la longitud de la barra estándar (tabla 10.3).

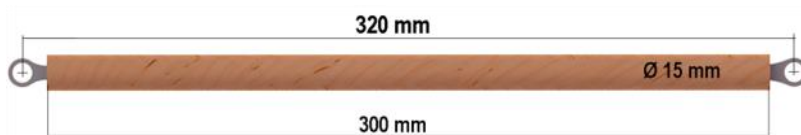


Figura 10.39 Longitud de barra, domo desplegable en madera
Fuente: Elaboración del autor

La definición de los parámetros para la búsqueda de la forma para el modelo físico, se establecen en un domo configurado a partir del hexágono, con una arco de elevación de medio punto y que incorpora un módulo adicional de tijera con articulación central para aumentar la flecha y la altura libre.

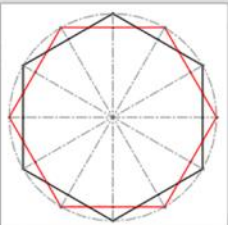
Finalmente, para la configuración del suelo del domo se determina la geometría completa del hexágono, sin plataforma plegable y con cubierta exterior.

POLÍGONO

Pentágono

Hexágono

Heptágono



MÉTODO GEOMÉTRICO PARA CONFIGURAR

ARCO ELEVACIÓN

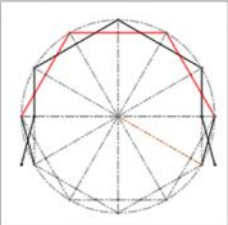
Rebajado

Medio Punto

Herradura

Aumentar altura

Módulos tijera 1



VISTAS

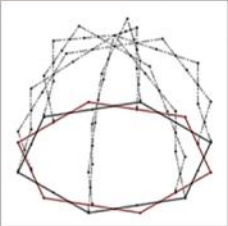
ARCO PLATAFORMA

Rebajado

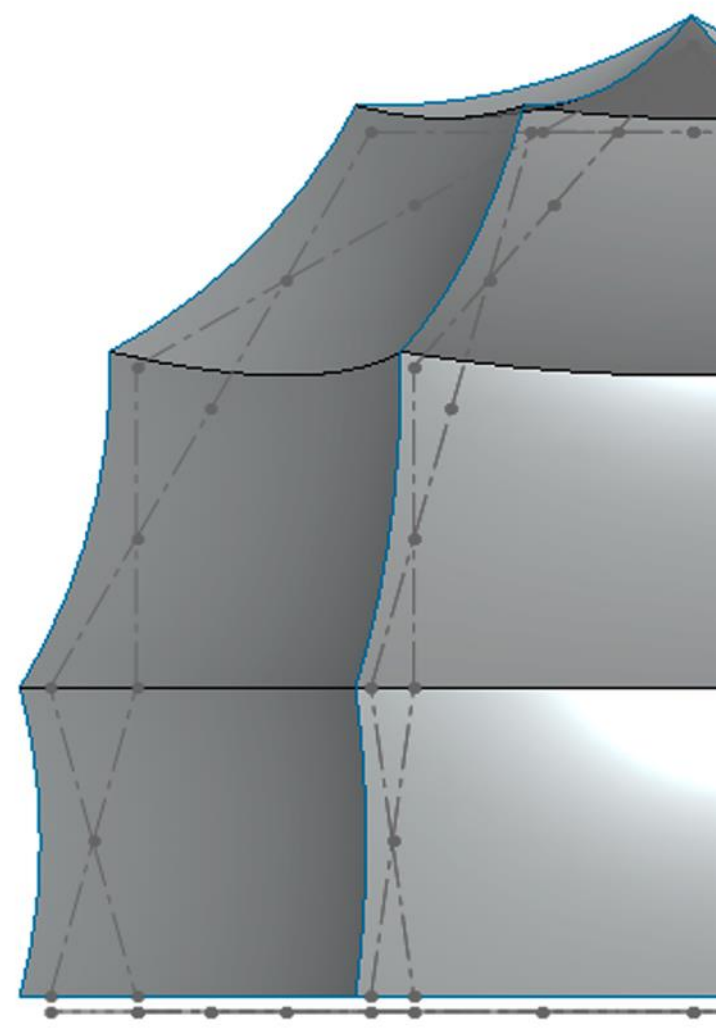
Medio Punto

Herradura

Completo



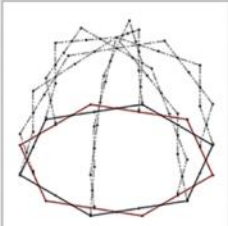
PLANTA



GEOMETRÍA PLATAFORMA

Sin plataforma

Con Plataforma



PROCESO DE DESPLIEGUE

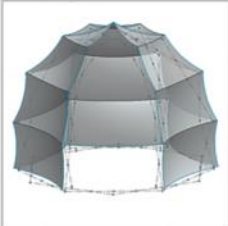
CUBIERTA


Sin cubierta

Interior

Exterior

Seccionada



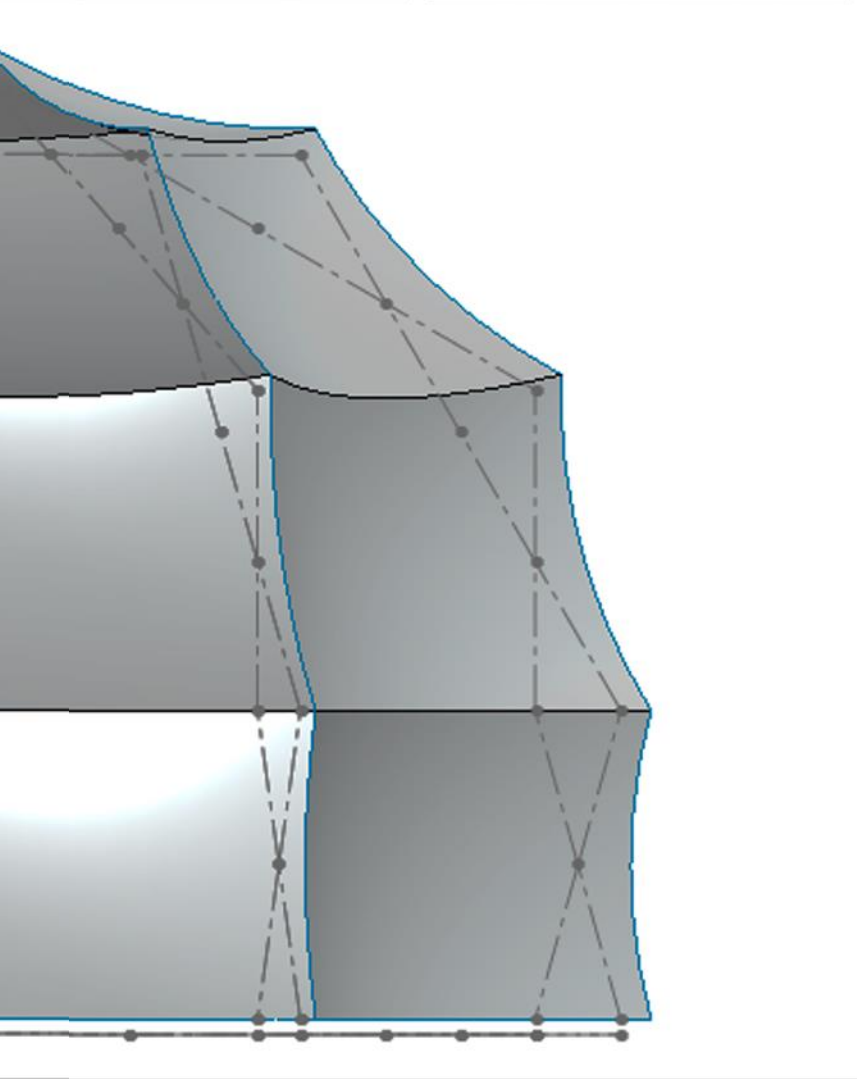


Como en los casos anteriores, a la hora de utilizar la tabla interactiva, se ha de tener en cuenta los incrementos adicionales correspondientes a la sección y accesorios a implementar en la barra. Así como el incremento de altura al incorporar la estructura del suelo, correlacionada con los semiarcos desplegables.

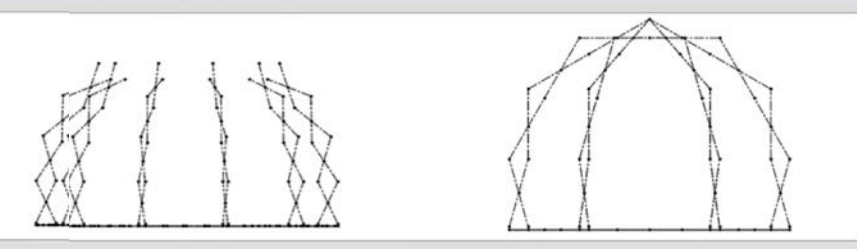
Tabla 10.3 Tabla Interactiva. Búsqueda de la forma domos desplegables. Fuente: Elaboración del autor

ACCIÓN DE DOMOS DESPLEGABLES

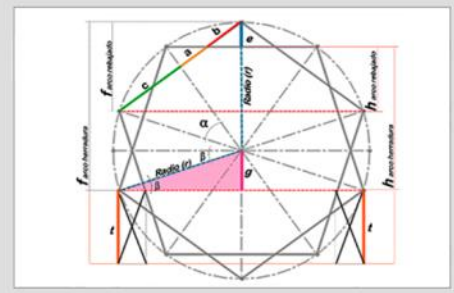
ELEVACIÓN AXONOMETRÍA



ESQUEMA ESTRUCTURAL



DEFINA UN VALOR

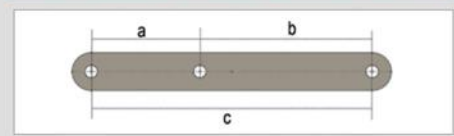


Longitud de barra mts (c)

Díámetro total mts (d)

Nº de lados polígono (n)

VALORES RESULTANTES



a	b	c
<input type="text" value="0,15"/>	<input type="text" value="0,17"/>	<input type="text" value="0,32"/>
Longitud de barra mts (c)		<input type="text" value="0,32"/>
Díámetro mts (d)		<input type="text" value="1,28"/>
Radio mts (r)		<input type="text" value="0,64"/>
Ángulo α (grad)		<input type="text" value="30"/>
Ángulo β (grad)		<input type="text" value="15"/>

ALTURAS SEGÚN TIPO DE ARCO

g = 1 t =

Arco	Flecha (f)	Alt libre (h)	Esp. (e)
	<input type="text" value="0,32"/>	<input type="text" value="0,23"/>	<input type="text" value="0,09"/>
	<input type="text" value="0,62"/>	<input type="text" value="0,53"/>	<input type="text" value="0,09"/>
	<input type="text" value="0,65"/>	<input type="text" value="0,55"/>	<input type="text" value="0,09"/>
	<input type="text" value="0,95"/>	<input type="text" value="0,85"/>	<input type="text" value="0,09"/>
	<input type="text" value="0,96"/>	<input type="text" value="0,87"/>	<input type="text" value="0,09"/>
	<input type="text" value="1,26"/>	<input type="text" value="1,17"/>	<input type="text" value="0,09"/>
k =		<input type="text" value="0,13"/>	

10.5.3 Componentes estructurales

Una sección del domo esta compuesta por dos semiarcos desplegados que se juntan en la cúspide a través del nodo principal y que se articulan en sus bases por medio de la agrupación de dos módulos de tijeras.

Los módulos de tijeras de los semiarcos se componen de tres barras y los módulos de tijeras del suelo se componen de cuatro barras. Todas las barras son de madera con sección circular maciza y describen la misma longitud, a excepción del último módulo de tijera de los semiarcos donde las distancias de las barras son acortadas para ajustarse a la geometría y a la incorporación de nodo que las recibe.

Para este modelo físico se incorporan armellas cerradas en los extremos de las barras, que permiten la articulación entre módulos de tijeras a través del sistema de pasador tuerca y arandelas, sin la necesidad de realizar agujeros en los extremos de las barras, aunque si que se realiza el agujero de la articulación excéntrica en cada barra.

De especial interés, se propone una conexión entre los semiarcos y las tijeras del suelo, que incorpora pletinas planas del tipo cruz, pletinas en ángulo recto, una rueda de carga y un pasador continuo que enlaza todos los componentes en un único eje, para obtener el despliegue simultáneo entre la agrupación de tijeras verticales y las agrupación de tijeras en horizontal (figura 10.40 y 10.41)

Se completan los componentes estructurales con la sección de membrana realizada en lycra y el nodo central realizado a través de la tecnología de impresión 3D (figura 10.40).

Aunque para este modelo a escala no se utilizan las barras de bambú, las soluciones presentadas son un acercamiento para las conexiones a realizar con las barras de bambú que se describen más adelante.

El interés de exponer este modelo es dar a conocer la viabilidad constructiva de las conexiones utilizadas, ya que los accesorios y herrajes implementados se consiguen a nivel comercial e industrial favoreciendo de esta forma la viabilidad técnica de este tipo de estructuras.

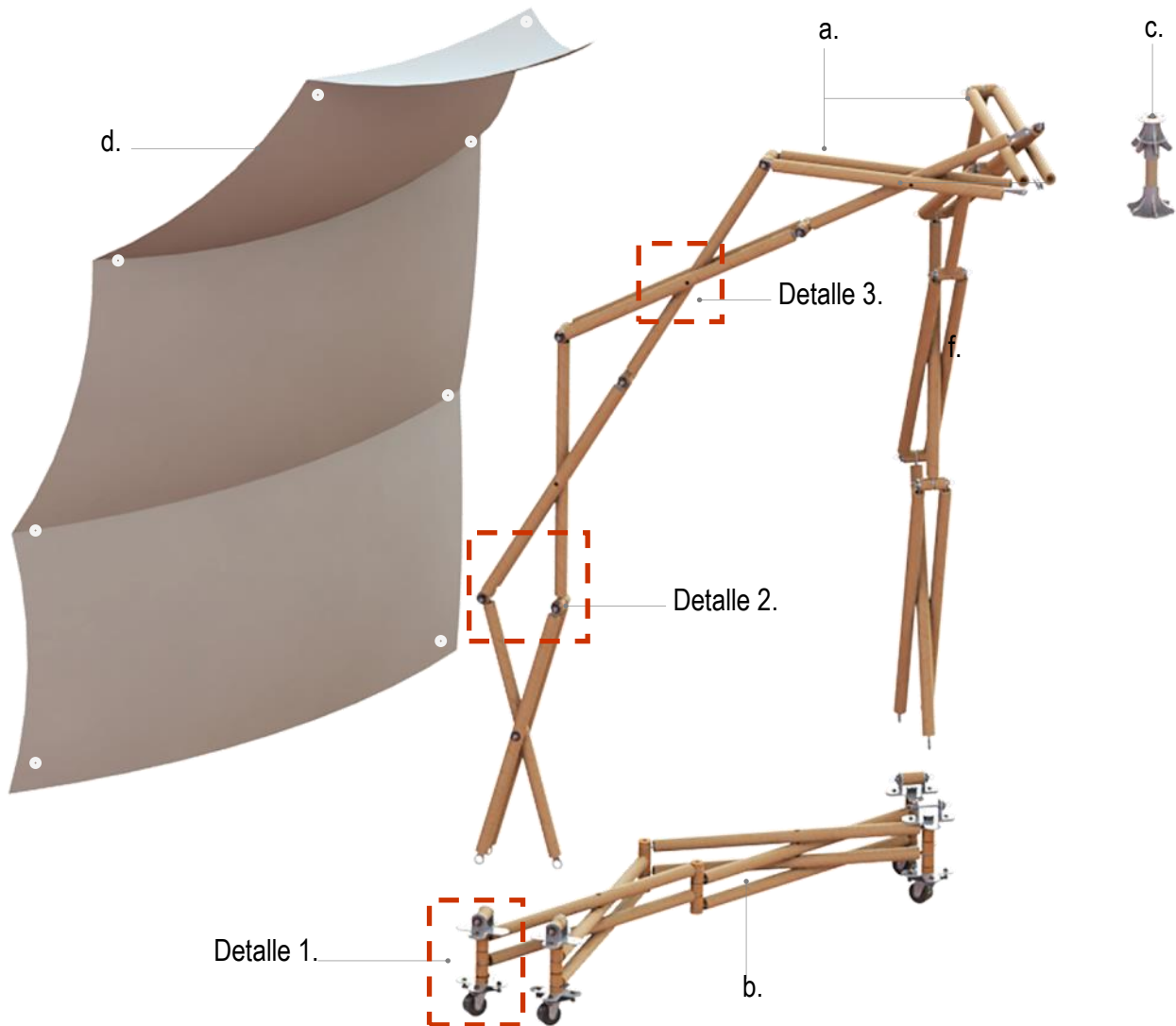


Figura 10.40 Axonometría explotada. Componentes sección Domo desplegable en madera
 a. Semiarcos desplegados. Módulos de tijeras con tres barras de madera. Long 320 mm - Ø15 mm
 b. Estructura de suelo. Módulos de tijeras con cuatro barras de madera. Long 320 mm - Ø15 mm
 c. Nodo central. Piezas realizadas con impresión 3D.
 d. Sección de membrana en lycra.

Fuente: Elaboración del autor

Figura 10.41 Detalle 1. Soporte

- a. Módulo de tijera inicial del semiarco
- b. Armella cerrada.
- c. Separador en madera
- d. Tornillo de fijación ángulos rectos a pletina tipo cruz
- e. Sistema de pasador tuercas y arandela
- f. Ángulo recto
- g. Tuerca para para pasador principal + arandela
- h. Pletina plana tipo cruz
- i. Módulo de tijera suelo
- j. Separadores en madera
- k. Armella cerrada
- l. Pasador principal
- m. Tornillo de fijación entre pletina y rueda
- n. Pletina plana tipo cruz para fijar rueda
- o. Rueda de carga

Fuente: Elaboración del autor

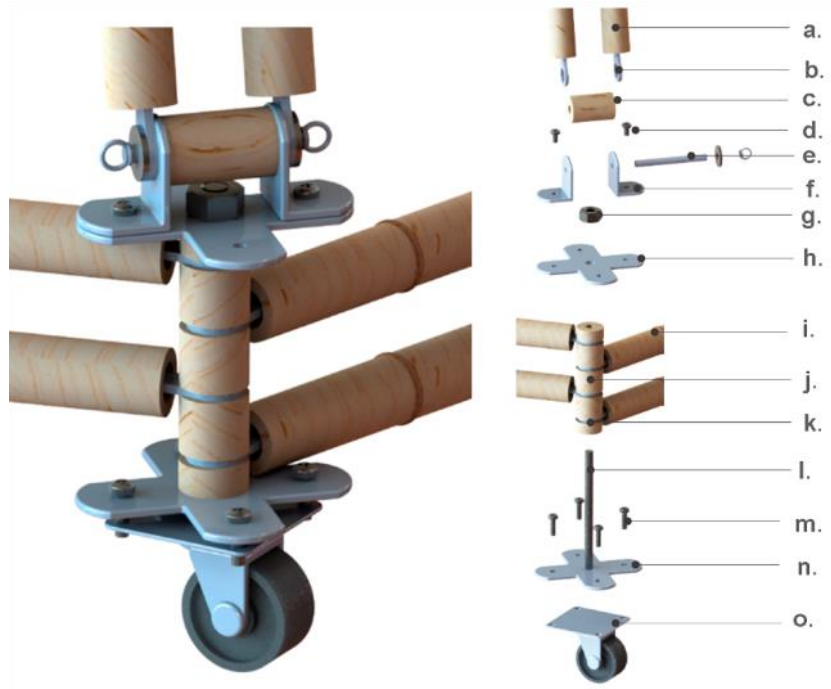


Figura 10.42 Detalle 2
Articulación entre módulos de tijeras

- a. Barra de madera
- b. Armella cerrada
- c. Separadores en madera
- d. Pasador. Varilla roscada
- e. Arandela
- f. Tuerca + anclaje de tela

Fuente: Elaboración del autor

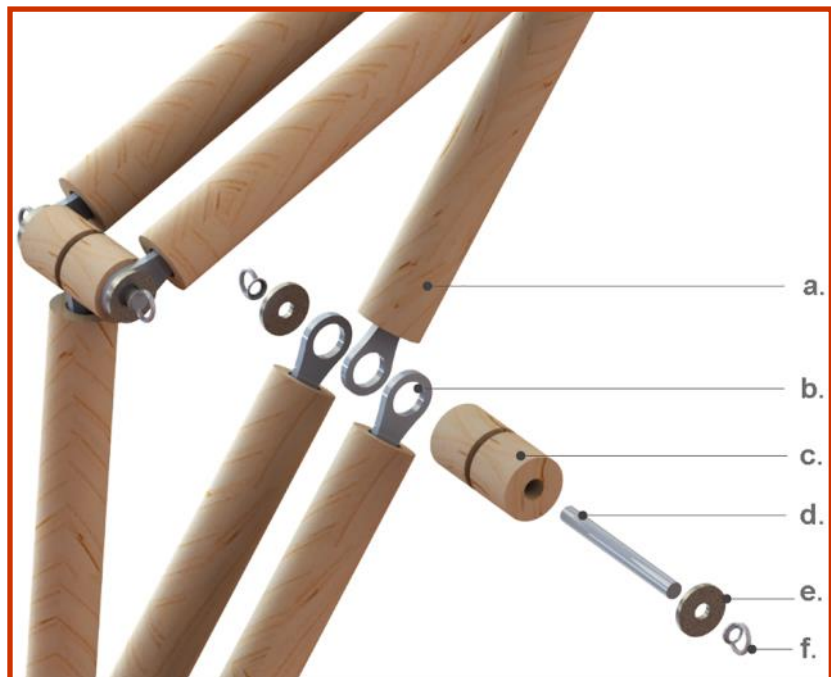


Figura 10.43 Detalle 3

- a. Barra de madera
- b. Pasador. Varilla roscada
- c. Arandela
- d. Tuerca + anclaje de tela

Fuente: Elaboración del autor

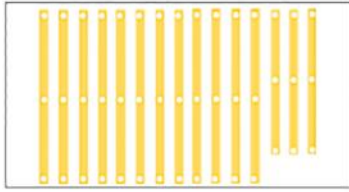


10.5.4 Materiales y cantidades

Figura 10.44 Materiales y cantidades fabricación Domo en madera

Fuente: Elaboración del autor

BARRAS MADERA Ø15 -300MM



SEMIARCOS	6	BARRAS	12	SUBTOTAL	72
TIJERAS SUELO	12	BARRAS	4		48
TOTAL					120

HERRAJES Y SEPARADORES TIJERAS



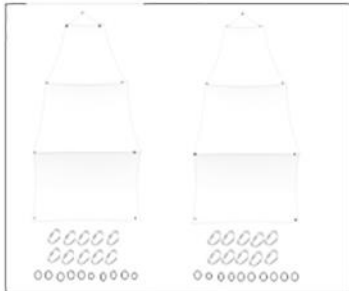
ARMELLA CERRADA 19X60 (UNIDADES)		TOTAL	240
PASADOR TIJERAS. VARILLA ROSCADA Ø 8MM - 55 MM			72
PASADOR ART. VARILLA ROSCADA Ø 8MM - 70 MM			12
PASADOR SOPORTE VARILLA ROSCADA Ø 8MM - 100 MM			12
ARANDELAS M8			216
TUERCAS M8			216
SEPARADORES Ø15 - 10 MM			216

SOPORTE SEMIARCOS



PLETINA SOPORTE TIPO CRUZ 60X18		TOTAL	12
PLETINA SOPORTE TIPO EESCUADRA 20X20X15X1,5			36
TORNILLO M3 -10 MM			36
ARANDELA M3			36
TUERCA M3			36
RUEDA DE CARGA Ø 50			12

CUBIERTA MEMBRANA



Patronaje sección de cubierta desplegable		TOTAL	
SECCIONES	6	TELA M²	0,2
		OJALES METAL	10
		MOSQUETONES	10

NODO - IMPRESIÓN 3D



		TOTAL	
MATERIAL BOBINA PLA	1		1
PINZAS TIPO COCODRILO	12		12

10.5.5 Dimensiones

Figura 10.45 Elevación domo en madera desplegado.
Fuente: Elaboración del autor

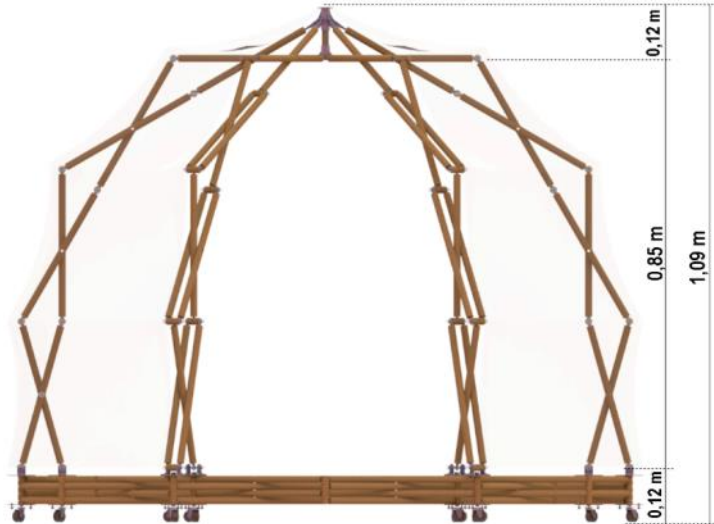


Figura 10.46 Planta domo en madera desplegado.
Fuente: Elaboración del autor



Figura 10.47 Axonometría domo en madera desplegado
Fuente: Elaboración del autor



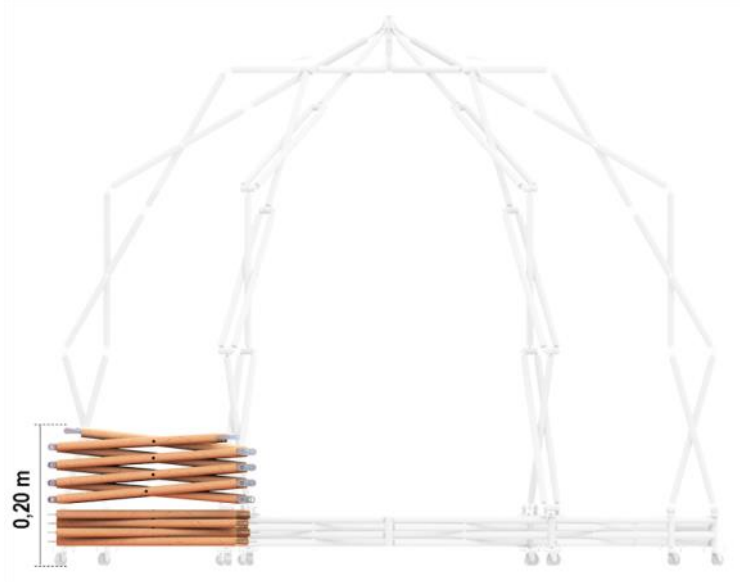


Figura 10.48 Elevación domo en madera plegado.

Fuente: Elaboración del autor

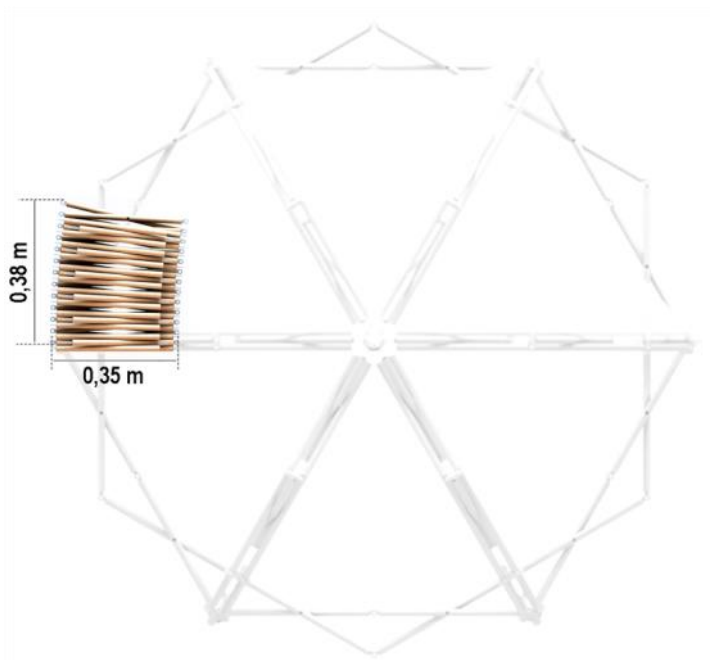


Figura 10.49 Planta domo en madera plegado.

Fuente: Elaboración del autor

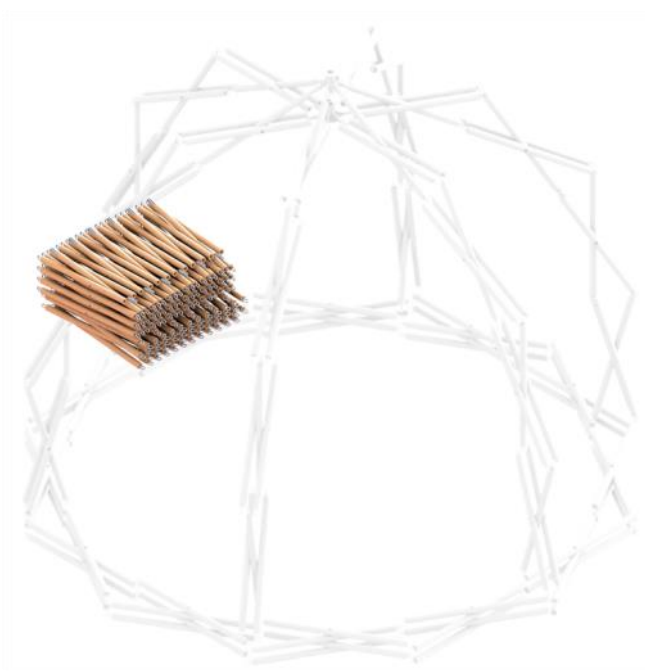


Figura 10.50 Axonometría domo en madera plegado

Fuente: Elaboración del autor

10.5.6 Proceso de despliegue

Dado que para esta propuesta, no se incluye la plataforma del suelo ni las vigas soporte que generan el despliegue con curvatura constante de la estructura. El proceso de despliegue para este modelo se caracteriza por describir un recorrido de apertura con curvatura variable, que se visualiza más claramente en la representación en planta de las etapas del despliegue (figura 10.51).

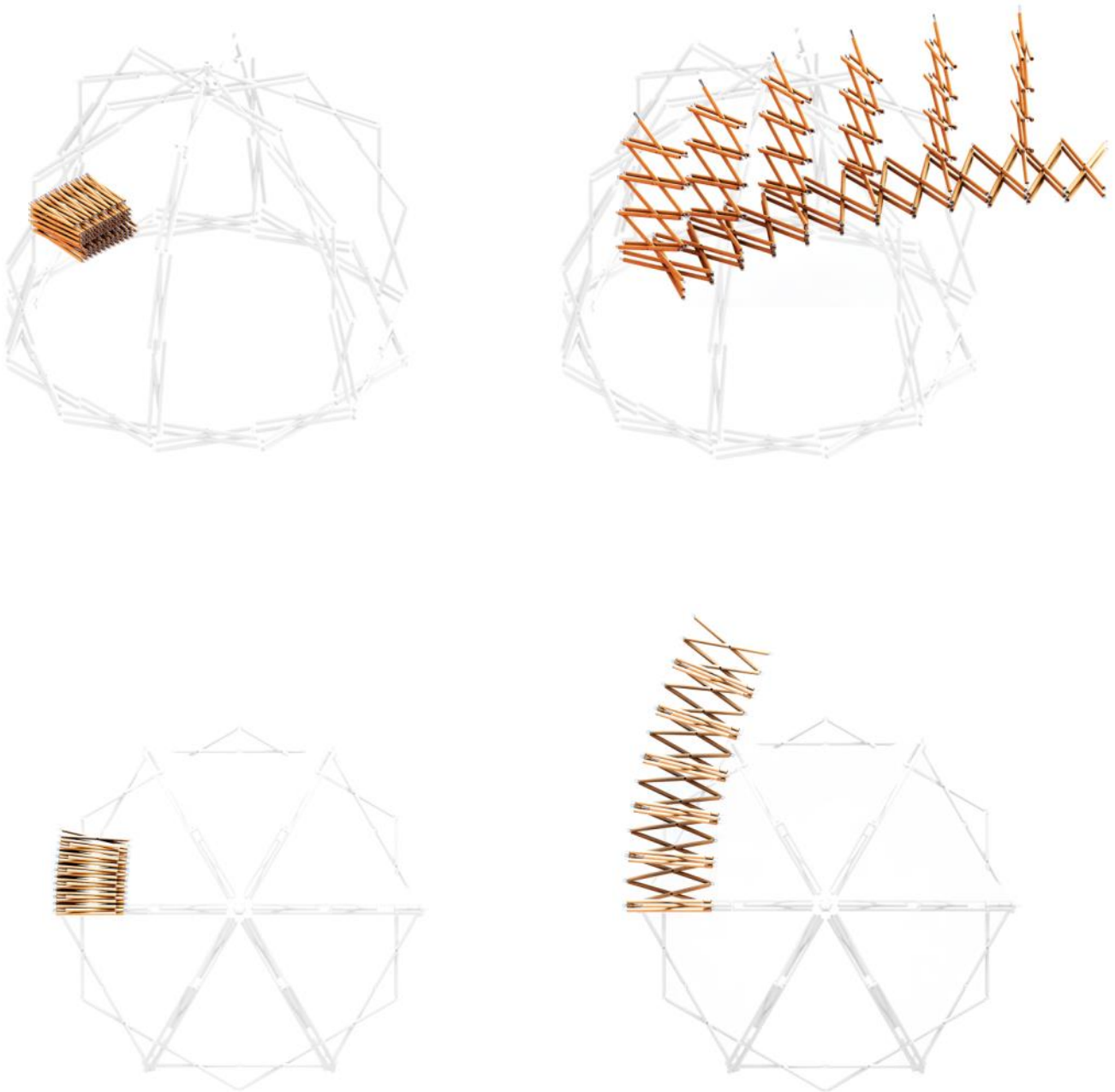
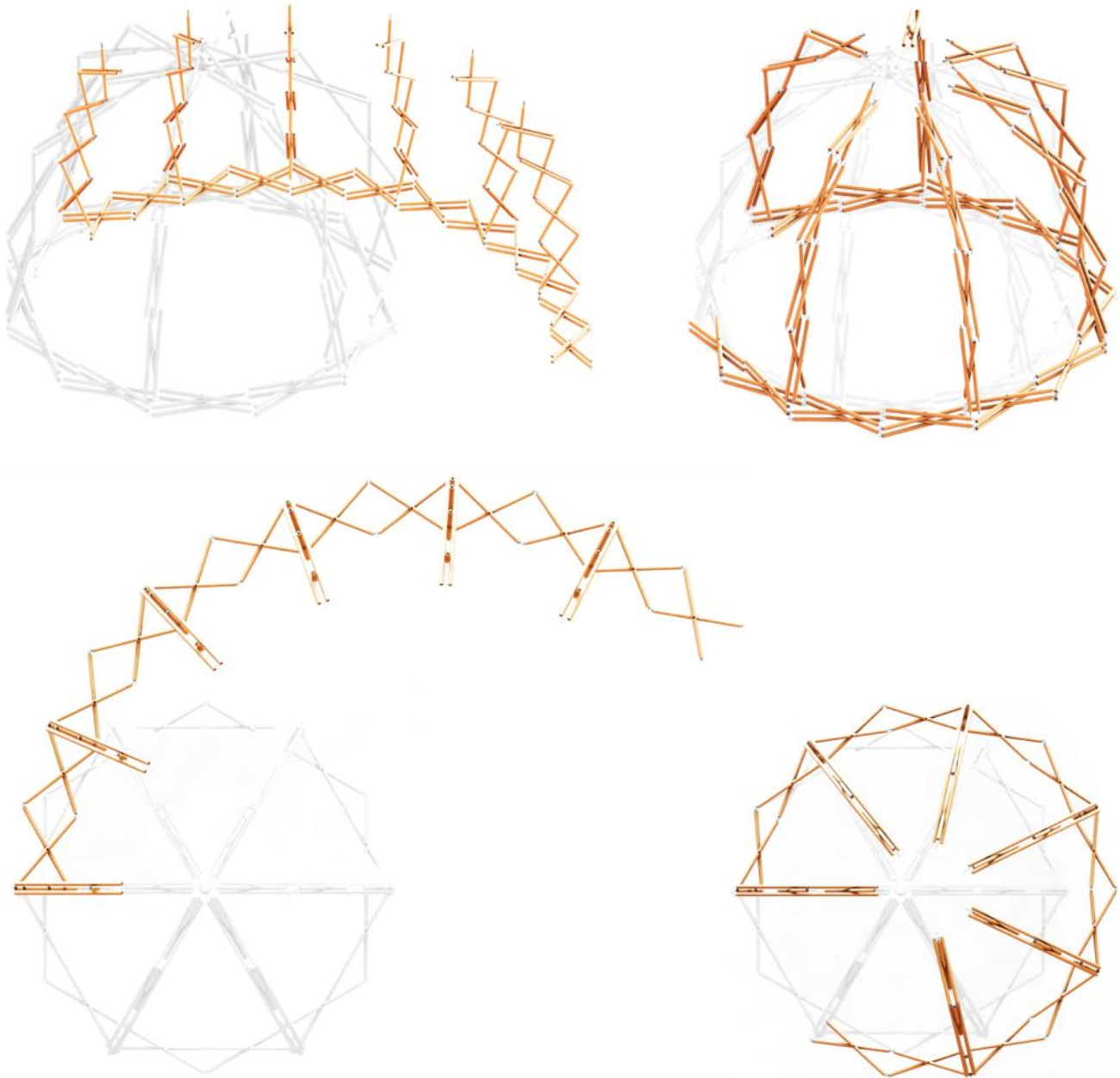


Figura 10.51 Simulación proceso de despliegue domo en madera. Fuente: Elaboración del autor

El número de módulos de tijeras, que conforma la agrupación de la estructura de suelo, condiciona el espacio necesario a requerir para el despliegue. Entre más módulos de tijeras en planta, las etapas de despliegue intermedias requerirán más área para obtener un despliegue sin interferencias, una condición que puede afectar el montaje real de la estructura en espacios interiores.

Se observa que para esta configuración, la etapa de despliegue más crítica ocupa el doble del diámetro establecido por la geometría base.



10.5.7 Fabricación e implementación

Para el modelo a escala en barras de madera, previo al modelo físico en bambú, el proceso de fabricación se optimiza al utilizar barras estandarizadas que vienen ya cortadas, ahorrando así el proceso de preparación y ajuste de cada barra a la longitud requerida.

Realizados los agujeros para la articulación central, según los datos arrojados por la tabla interactiva, se procede al ensamble de módulos de tijeras que forman los semiarcos (tres barras por tijera) y la estructura del suelo (cuatro barras por tijera).

Se debe tener atención en la unión entre módulos de tijeras, enlazando correctamente los tramos largos entre ellos y los tramos cortos respectivamente, alternando los separadores y barras en cada conexión, asegurando el sistema de articulación con los pasadores, tuercas arandelas y demás herrajes específicos, para obtener un mecanismo que permita el pliegue y despliegue sin mayores fricciones (figura 10.52).

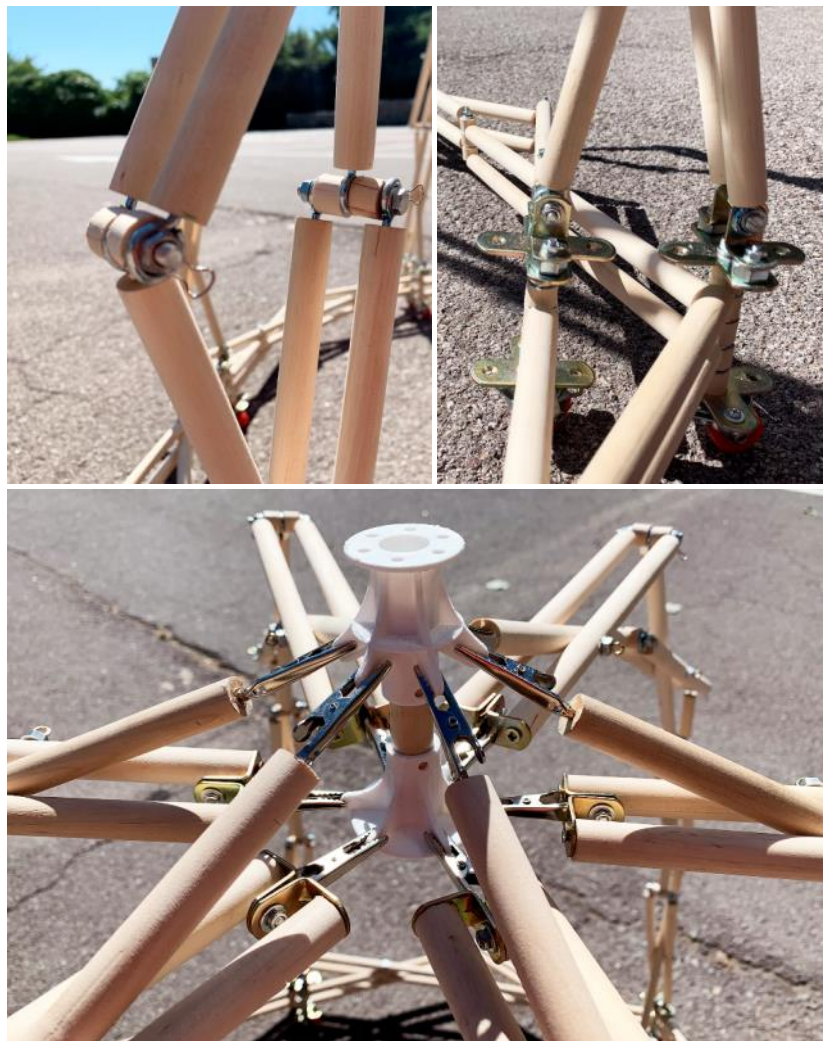


Figura 10.52 Imágenes detalles constructivos prototipo a escala domo desplegable en madera
Fuente: Elaboración del autor

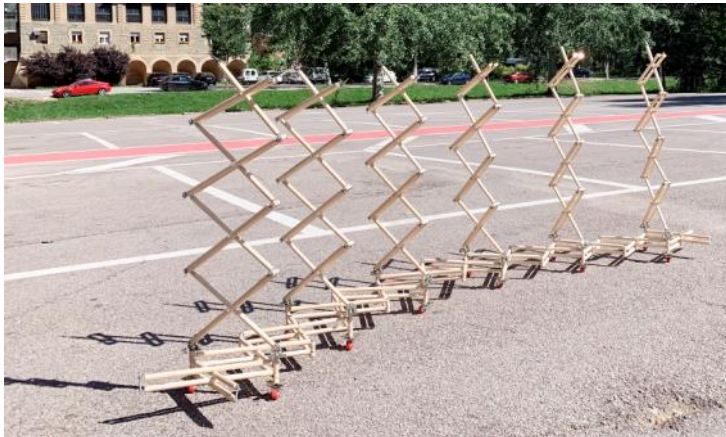


Figura 10.53 Proceso de despliegue prototipo a escala domo desplegable en madera
Fuente: Elaboración del autor



Figura 10.54 Domo desplegable en bambú. Fuente: Elaboración del autor

10.5.8 Búsqueda de la forma - modelo físico en bambú

Partiendo de la experiencia constructiva del domo en madera, se replantea la estructura del domo en bambú incorporando barras de bambú de la especie Tonkin (Pseudosasa Amabilis) Ø 15 mm y espesor de pared de 3 a 4 mm junto con la estructura de la plataforma de suelo, para obtener un despliegue con curvatura constante, que reduzca el espacio requerido para el montaje de la estructura.

Acerca de las articulaciones entre módulos de tijeras, el estudio mantiene el principio de agregar un accesorio a la barra que evite realizar agujeros en los extremos de las barras de bambú, es así que para esta propuesta, se incorpora la tecnología de la impresión 3D para el diseño de conexiones tipo abrazaderas que se adapten a las barras del bambú.

Como parámetro principal para la búsqueda de la forma del prototipo a realizar en bambú, se parte de un diámetro estipulado de dos metros, ajustando los números para obtener una longitud de barra con un número cerrado, la tabla interactiva arroja 0,52 m como resultado del valor (c), correspondiente a la distancia total entre los puntos de articulación ubicados en los extremos de las barras (figura 10.55) (ver tabla 10.4).

La variable como la tipología de arco en altura, se mantiene del tipo medio punto, más el incremento en altura que se añade al incorporar un módulo de tijera con articulación central, al igual que la maqueta anterior realizada en madera. Y espacialmente continua siendo un domo completo que para esta oportunidad, incorpora la estructura de la plataforma para soportar el suelo plegable y propone una cubierta interior desplegable.

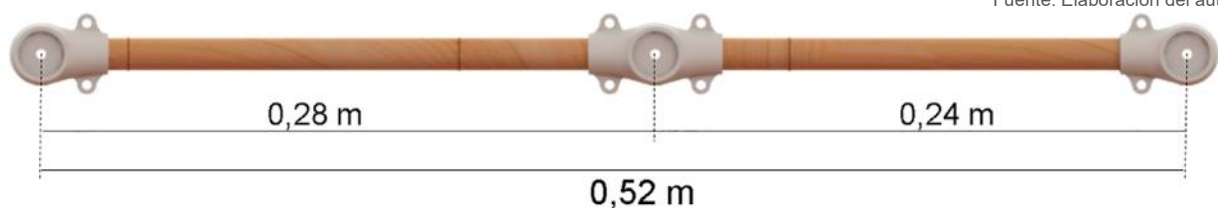


Figura 10.55 Barra estándar.
Domo desplegable en bambú.
Fuente: Elaboración del autor

Los valores arrojados por la tabla interactiva corresponden a las longitudes reales para la fabricación del prototipo del domo en bambú a escala 1:2. De esta manera con barras de bambú de 0.52 metros se obtiene un diámetro total de 2,08 metros con una flecha correspondiente a 1,54 m y una altura libre de 1,40 m. El espesor de arco cumple el factor k obteniendo con un canto de 0.14 m.

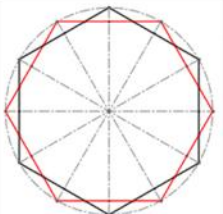
Tabla 10.4 Tabla Interactiva. Búsqueda de la forma domos desplegables. Fuente: Elaboración del autor

POLÍGONO

Pentágono

Hexágono

Heptágono



ARCO ELEVACIÓN

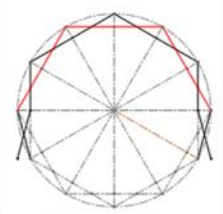
Rebajado

Medio Punto

Herradura

Aumentar altura

Módulos tijera 1



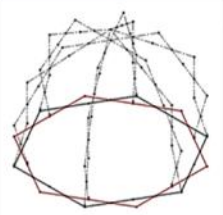
ARCO PLATAFORMA

Rebajado

Medio Punto

Herradura

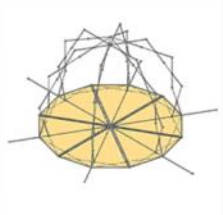
Completo



GEOMETRÍA PLATAFORMA

Sin plataforma

Con Plataforma



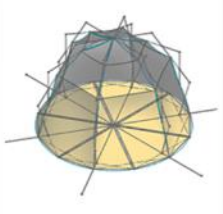
CUBIERTA

Sin cubierta

Interior

Exterior

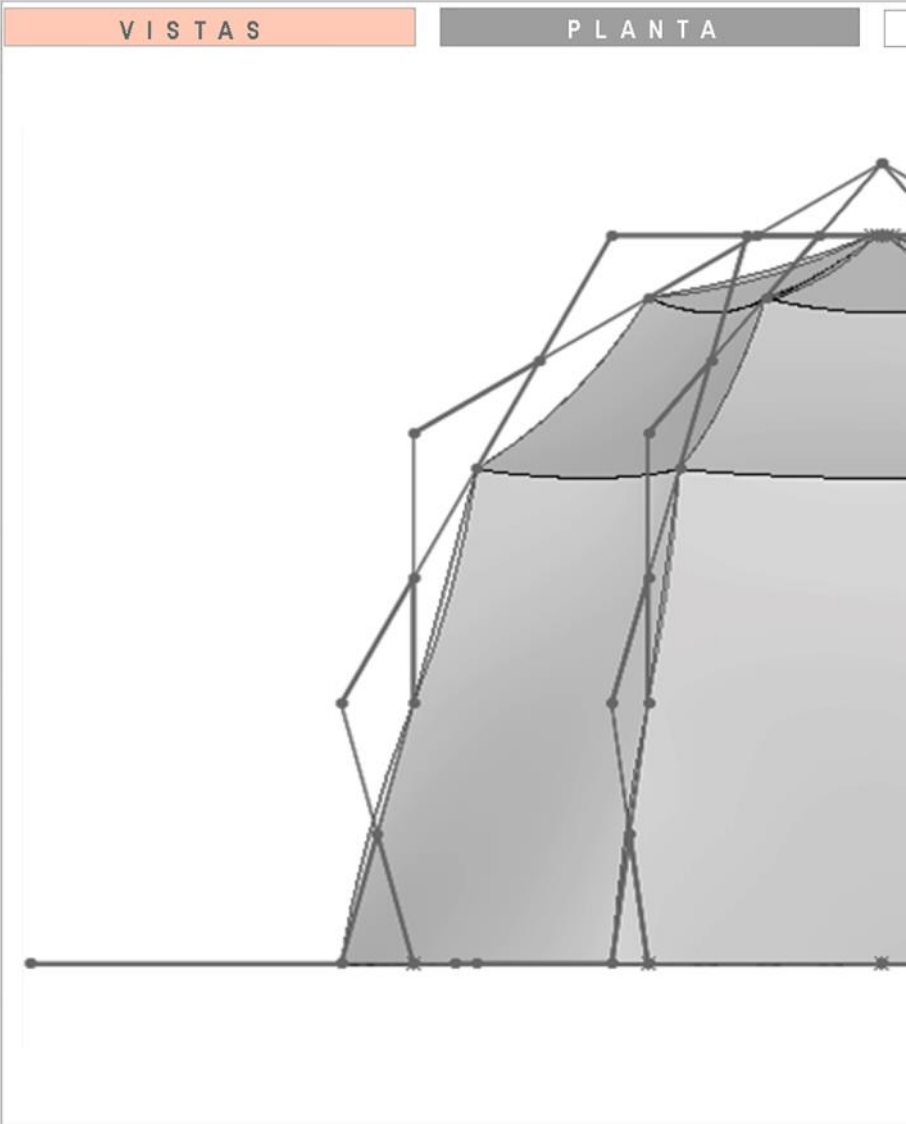
Seccionada



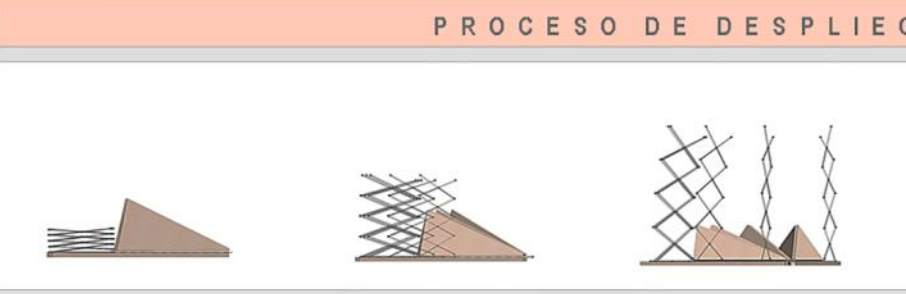
MÉTODO GEOMÉTRICO PARA CONFIGURAR

VISTAS

PLANTA



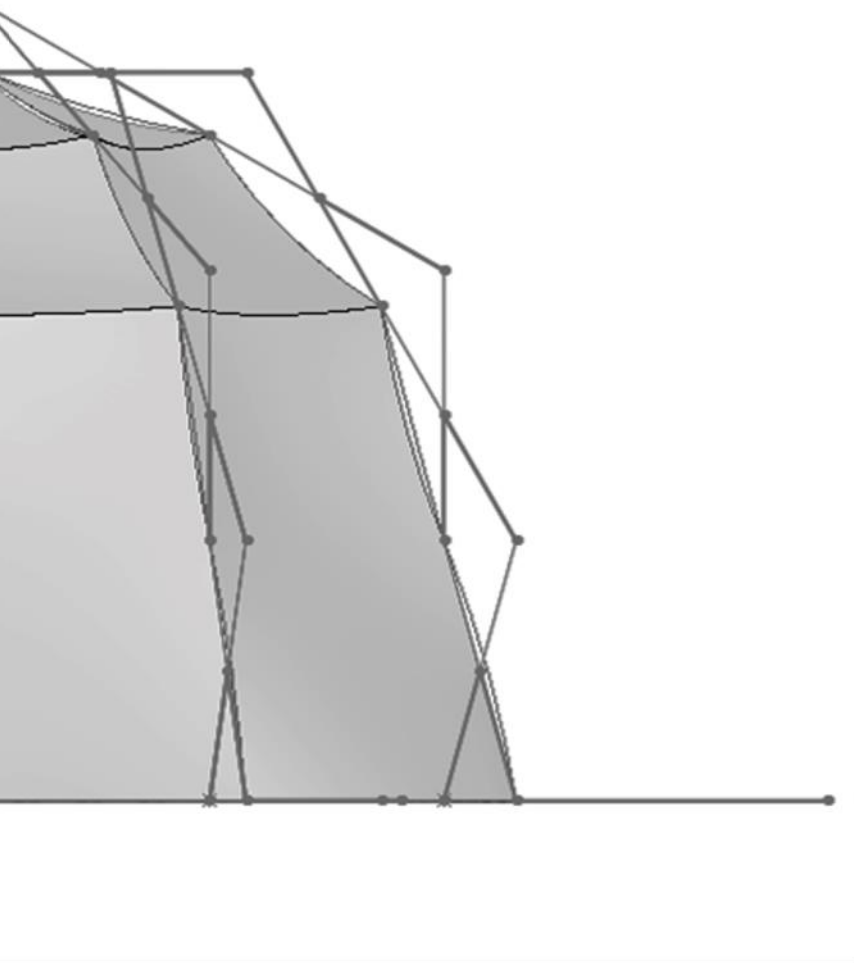
PROCESO DE DESPLIEGUE



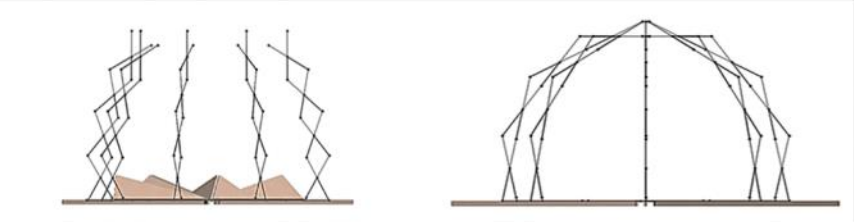
Reiterando las observaciones de la búsqueda de la forma de los anteriores prototipos realizados, la geometría resultante nos acerca a la espacialidad a obtener, pero solo refleja a manera de ejes, los puntos de articulación de los módulos de tijeras. Se ha de tener en cuenta los incrementos necesarios a la hora de incorporar la sección real de los materiales y componentes como las vigas de soporte para la plataforma plegable que se proyecta para este caso específico.

CONSTRUCCIÓN DE DOMOS DESPLEGABLES

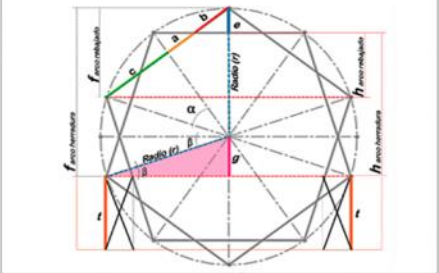
ELEVACIÓN AXONOMETRÍA



OTRO EJEMPLO DE ESTRUCTURA



DEFINA UN VALOR

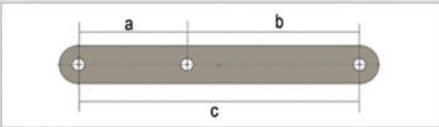


Longitud de barra mts (c)

Díámetro total mts (d)

Nº de lados polígono (n)

VALORES RESULTANTES



a	b	c
0,24	0,28	0,52
Longitud de barra mts (c)	0,52	
Díámetro mts (d)	2,08	
Radio mts (r)	1,04	
Ángulo α (grad)	30	
Ángulo β (grad)	15	

ALTURAS SEGÚN TIPO DE ARCO

g = 1 t =

Arco	Flecha (f)	Alt libre (h)	Esp. (e)
	0,52	0,38	0,14
	1,02	0,88	0,14
	1,04	0,90	0,14
	1,54	1,40	0,14
	1,56	1,42	0,14
	2,06	1,92	0,14
k =			0,13

10.5.9 Conexiones para las barras de bambú - Impresión 3D

Los avances en el desarrollo de nuevas estrategias sostenibles para el sector de las estructuras y la construcción han permitido el impulso tecnológico e investigativo del uso del bambú para diferentes aplicaciones arquitectónicas y de diseño.

Siendo el tema de las conexiones, uno de los campos más amplios que ofrece diferentes alternativas que responden a la diversidad de proyectos realizados con este material. El estado de arte y ejemplos aplicados que refieren al caso de estudio, expone soluciones que principalmente evitan realizar agujeros en los extremos de las barras, si es el caso, se realizan cerca de los anillos propios de las barras de bambú, como estrategia constructiva para evitar el agrietamiento total de la barra debido a las características morfológicas del propio material.

En un panorama general, las soluciones más comunes presentan pletinas embebidas dentro de las barras de bambú, fijadas en tacos de madera u hormigón, reforzadas con resinas o cables de acero que protegen y aseguran los remates extremos de las barras. También existen soluciones del tipo abrazaderas, una alternativa de interés para el presente estudio, que se implementa para desarrollar conexiones, a través de la tecnología de la impresión 3D, que permitan articular las barras entre si y articular módulos de tijeras (figura 10.56).

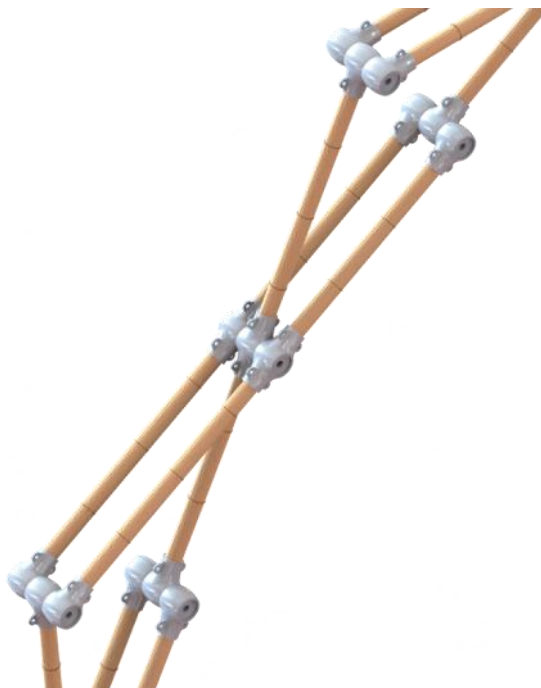


Figura 10.56 Propuesta de conexiones para barras. Semiarco desplegable en bambú.
Fuente: Elaboración del autor

Una primera propuesta, inspirada en la solución para un arco desplegable realizada por Taylor. J y You. Z, [84] (figura 2.55 capítulo 2). Desarrolla una conexión para la articulación central, que consiste en una pieza independiente que contiene el agujero del pasador, para articularse con su barra complementaria para formar la tijera, esta recibe los extremos de tramos de la barra y conforma linealmente la barra completa de un módulo de tijera.



La solución a proponer en esta investigación, retoma este concepto adaptando el diseño a las tres barras que componen un módulo de tijera del domo en bambú, de esta forma se diseña un componente conformado por dos machos y una hembra. Esta última, aloja adicionalmente un habitáculo para posicionar un rodamiento a cada lado para facilitar el proceso de pliegue, e incorporar el agujero apropiado para el paso del pasador y obtener así una articulación que se convierte en un sistema compacto que gira con facilidad (figura 10.57).

Las condiciones para el dimensionamiento y modelado de las piezas de articulación central, radican en mantener el diámetro interior de 15 mm, correspondiente a la sección de las barras en bambú, y un largo de 60 mm para acoger, a modo de abrazadera-tubo, 30 mm de cada tramo de la barra que recibe. Se define un espesor del 3 mm, además de incorporar el agujero que permite el paso del pasador y así la conexión con las otras dos barras laterales.



El cuestionamiento de esta solución, reside en como fijar la pieza a la barra, teniendo en cuenta, que se quiere mantener la posibilidad de reemplazar las barras rotas con facilidad y reutilizar la pieza, es así que se descarta usar pegamento o algún tipo de resina. Se propone entonces realizar un agujero pasante en la barra, del menor diámetro posible, respecto a la sección de la barra, que permita la fijación a través de un pequeño perno, que mantenga la pieza en su posición y enlace de manera segura, la barra de bambú, con la pieza de articulación (figura 10.57).

La figura 10.58, expone a manera de axonometría explosionada los componentes necesarios para conformar el sistema de articulación central con esta solución.



Figura 10.57 Propuesta de conexiones para barras. Semiarco desplegable en bambú. Abrazadera tipo tubo
Fuente: Elaboración del autor

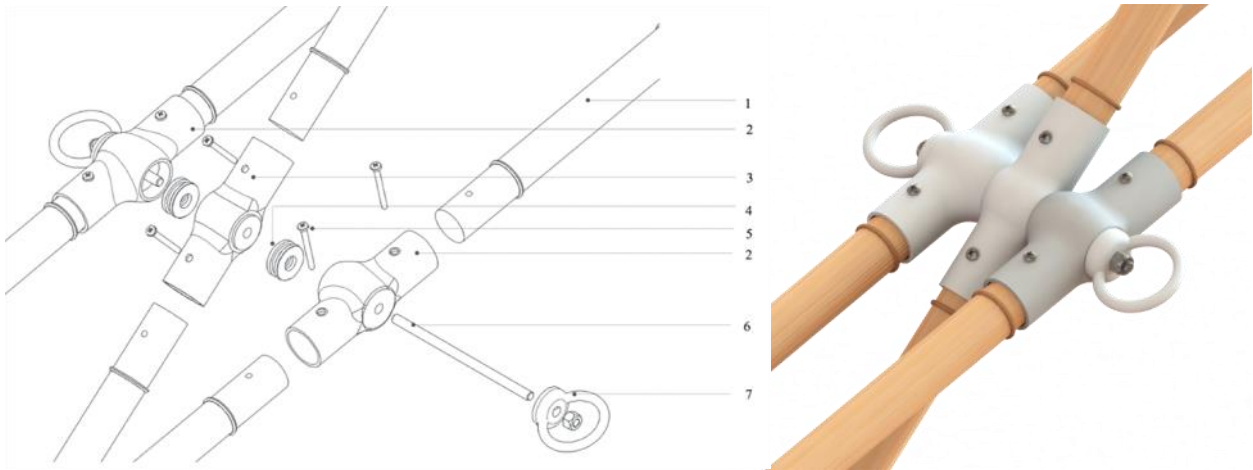


Figura 10.58 Axonometría explosionada. Propuesta de conexiones para barras. Semiarco desplegable en bambú. Abrazadera tipo tubo
Fuente: Elaboración del autor

Dentro de los inconvenientes que se presentan con esta conexión como articulación central del tipo tubo, es el aumento de números de barras a cortar, ya que las barras de un módulo de tijera, se dividen en sus tramos correspondiente para evitar realizar el agujero de la articulación central, además, la selección y corte de la barra deben ser cuidadosos para que no coincidan los anillos propios del bambú justo en los extremos y que impida de esta manera la entrada de la pieza a la conexión tipo tubo, una situación que además genera mayor desperdicio de material.

Por esta razón, se opta por una segunda alternativa, una conexión del tipo abrazadera, dividida en pares longitudinales. Para esta solución, se considera la barra completa con el agujero en la articulación central, intentando obtener durante el proceso de corte de las barras, que dicho agujero quede posicionado en medio de dos anillos, para evitar futuras fisuras, contando con que el sistema de abrazadera contiene y aprieta la barra evitando que se generen grietas (figura 10.59).



Figura 10.59 Propuesta de conexiones para barras. Semiarco desplegable en bambú. Abrazadera, dividida en pares longitudinales
Fuente: Elaboración del autor



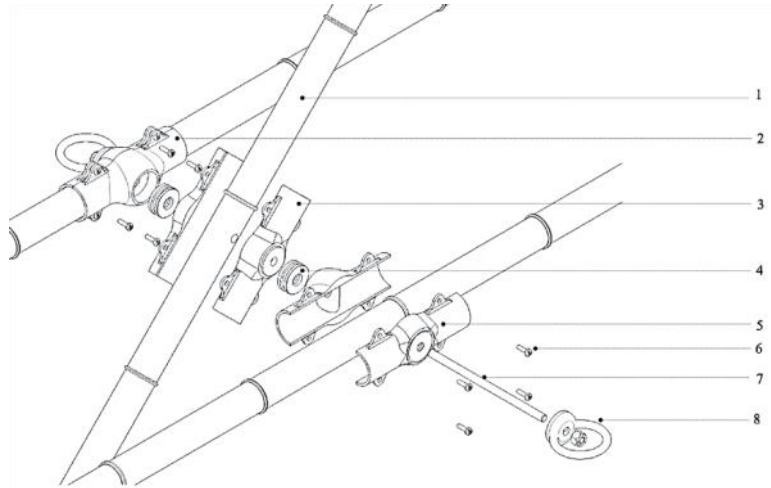


Figura 10.60 Axonometría explosionada. Propuesta de conexiones para barras. Semiarco desplegable en bambú. Abrazadera en pares longitudinales
Fuente: Elaboración del autor

Se utiliza para esta solución del tipo abrazadera, el mismo principio de dos machos y una hembra que se aplicó en la anterior propuesta, que conforma un sistema de conexión compacto a la hora de configurar la conexión en su totalidad. La diferencia radica en el ensamblaje de cada pieza, ya que al ser del tipo abrazadera, cada pieza se divide en dos subpartes que se unen a través de pequeños pernos, que atraviesan unas orejetas que permiten conformar la abrazadera y fijar cada pieza en su posición, para finalmente enlazar todo en conjunto con el pasador principal, que articula las tres barras (figura 10.60).

Para la articulación de los extremos, se utiliza de nuevo el mismo lenguaje de abrazadera, adaptando el diseño de estas piezas correspondiente a la posición de la conexión. El diseño para las conexiones extremas debe respetar el distanciamiento entre barras, así como mantener el paralelismo entre ellas, manteniendo la correspondencia lineal del agujero para atravesar el pasador que articula todos los componentes, uniéndolo el conjunto de conexiones y permitiendo la correcta plegabilidad (figura 10.61)



Figura 10.61 Izquierda Conexiones extremos barras de bambú. Derecha. Conexiones centrales barra de bambú
Fuente: Elaboración del autor



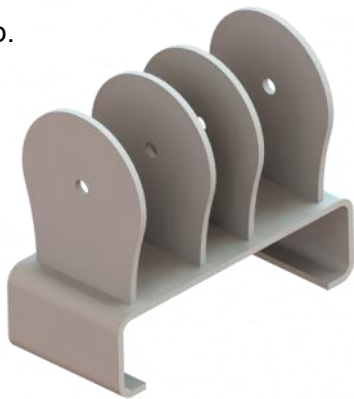
a.



10.5.10 Soporte plataforma plegable

Para este prototipo se incorpora la plataforma plegable, para ello es necesario incorporar la vigas de soporte que soportan el suelo junto con el riel que recibe los semiarcos y acoge el movimiento de plegado correlacionado entre los módulos de tijeras del suelo y de la estructura de domo.

b.



El diseño de estos elementos, basado en la propuesta realizada a nivel de maqueta (figura 8.23. Capítulo 8), replantea el diseño de los soportes presentando como mejor opción, componentes realizados a través de los procesos de corte láser y chapa doblada con acero inoxidable de espesor de 2 mm.

Se propone entonces, para el soporte fijo que recibe el semiarco en su articulación inferior, dos pletinas soldadas a una pletina base con la separación necesaria, para recibir la conexión del tipo abrazadera del tramo corto del primer módulo de tijera de semiarco correspondiente. La pletina base de este componente se fija al riel por medio de dos pernos, que evita la rotación o movimiento de este soporte. Además contiene el agujero central para el pasador vertical que enlaza el módulo de tijera de suelo con el módulo de tijera del semiarco (figura 10.62).

c.



El soporte móvil contiene las cuatro pletinas soldadas a su propia base, para recibir la doble barra correspondiente al tramo largo del primer módulo de tijera del semiarco correspondiente. Para generar que el soporte tenga un movimiento lineal sobre el riel y restringir el movimiento vertical de esta pieza, el soporte móvil se diseña con el ancho suficiente para incorporar un encaje, que a través el proceso de doblado de chapa, permita el deslizamiento sobre el riel sin que se salga de su recorrido (figura 10.62).

d.



Figura 10.62 Componentes estructura plataforma plegable.

a) Soporte fijo

b) Soporte móvil

c) Viga -riel soporte semiarco

d) Viga soporte plataforma plegable.

Fuente: Elaboración del autor

El riel es una pieza más compleja, además de contemplar la guía sobre la cual se desplaza el soporte móvil, el largo de esta pieza debe ser apropiado para recibir el semiarco plegado. La geometría en altura debe alojar los módulos de tijera de suelo sin interferir con el despliegue total de la estructura y contemplar la fijación de las ruedas de carga.

Finalmente para obtener el despliegue de la estructura con curvatura constante, se deben incorporar las vigas de soporte de la plataforma de suelo. Este elemento proyectado en madera, se fija al riel en un extremo y se articula al otro extremo al resto de vigas, a través de bisagras para obtener finalmente el movimiento de abanico que permite el pliegue y despliegue de la estructura.

10.2.7 Componentes estructurales

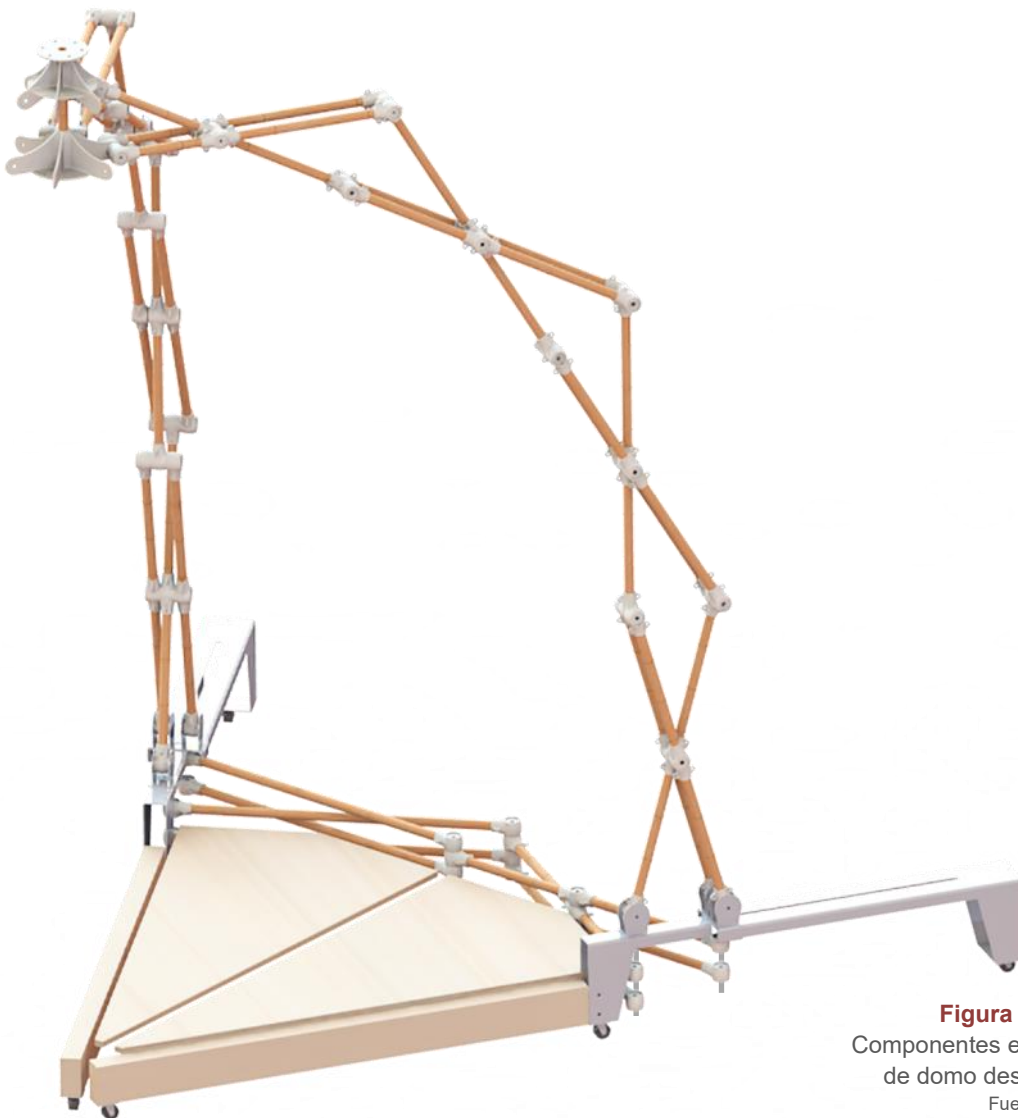


Figura 10.63 Axonometría Componentes estructurales sección de domo desplegable en bambú.
Fuente: Elaboración del autor

10.5.11 Dimensiones

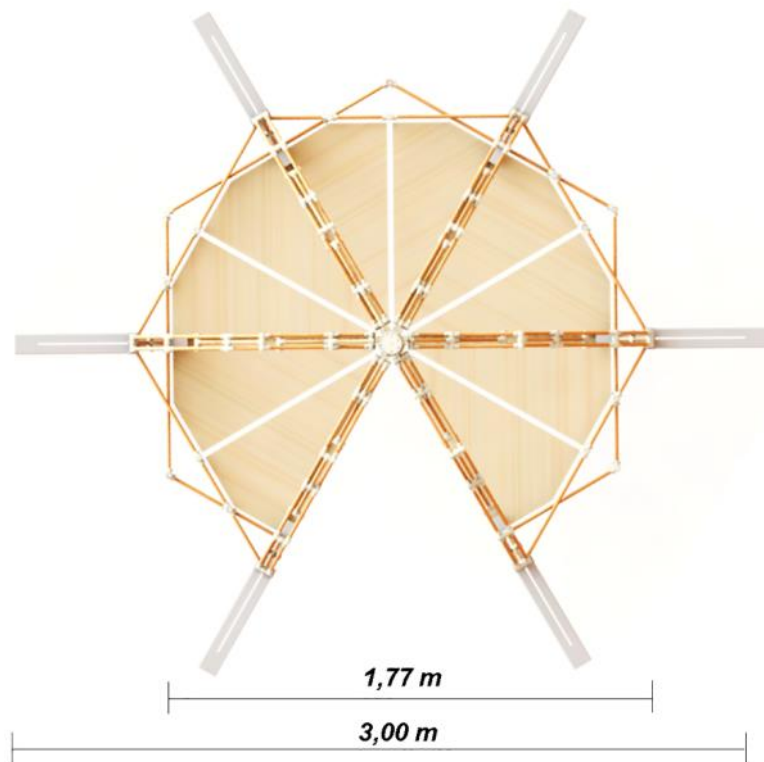
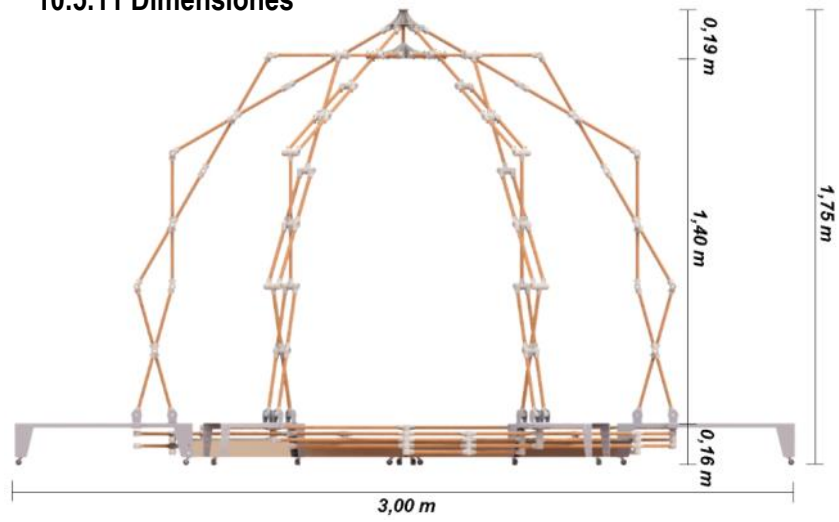
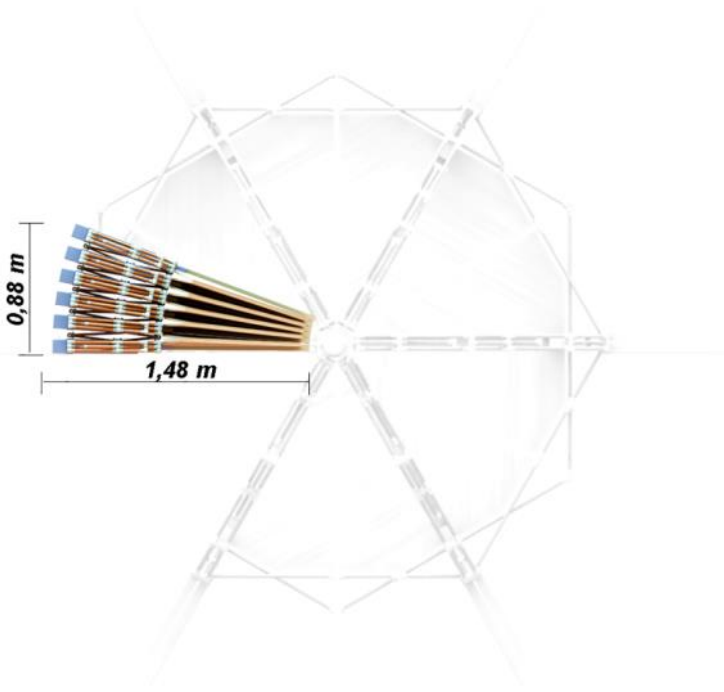
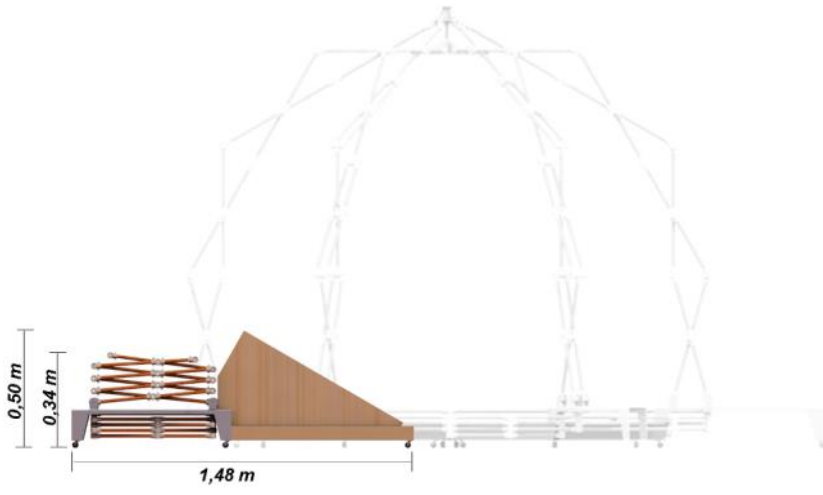


Figura 10.64 Dimensiones domo desplegable en bambú.
Fuente: Elaboración del autor



10.5.12 Proceso de despliegue

La figura 10.65 expone la simulación del proceso de despliegue del domo en bambú incorporando la plataforma de suelo. Se observa que el área necesaria para el despliegue, comparado con el modelo físico expuesto anteriormente (figura 10.51), disminuye considerablemente al incorporar los componentes para la plataforma plegable, una ventaja constructiva, si el espacio para el montaje es limitado.

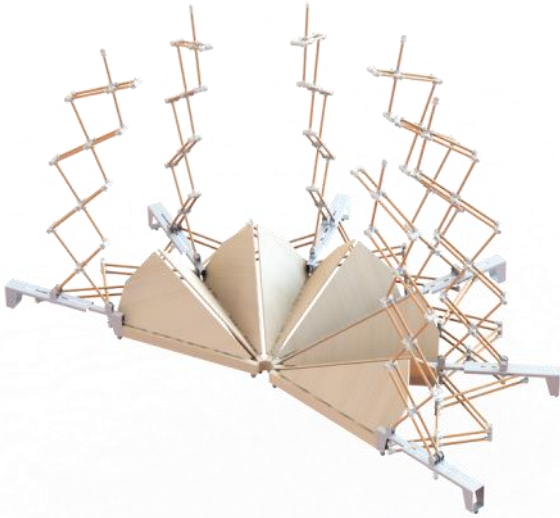
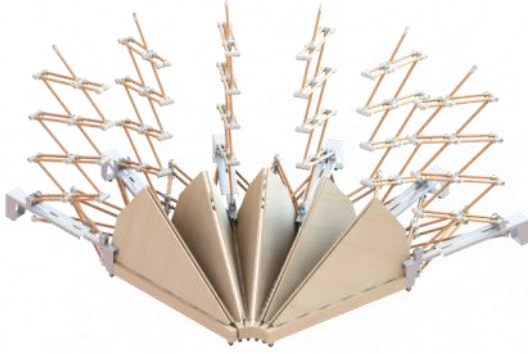
El despliegue describe un recorrido radial, dominado por el movimiento de las vigas, que gracias a su articulación en los extremos define el punto de rotación de estos elementos. Pero obligar a la estructura a desplegarse radialmente, contradice el despliegue natural de la agrupación de la tijeras de suelo, que corresponde a un despliegue con curvatura variable.

De esta forma, se ha implementado la solución técnica de eliminar las articulaciones centrales. Según el análisis realizado en el capítulo 8, es necesario realizar la desarticulación central de la mitad de los módulos de tijeras del suelo, para garantizar el correcto proceso de despliegue con curvatura constante de la totalidad de estructura (Ver apartado 8.3.1).

Lo que conlleva a sacrificar parcialmente el despliegue simultáneo de la estructura. Al eliminar articulaciones centrales en los módulos de tijeras del suelo, se pierde la correlación que hay entre la apertura de tijeras horizontales con tijeras verticales. No obstante el posicionamiento de vigas a su etapa final de despliegue, fuerza al conjunto de tijeras de suelo a obtener su geometría final de despliegue y esto permite que los semiarcos logren un despliegue parcial, que habrá que completar manualmente, para obtener la estructura en su posición ideal para posicionar y fijar el nodo principal.

Este procedimiento no tiene dificultad, al considerarse estructuras livianas, y por la escala de diseño propuesta para esta investigación, la manipulación de los semiarcos es viable y se puede controlar manualmente asegurando que los semiarcos se posicionen correctamente para finalmente configurar la estructura a su geometría final asegurando correctamente el nodo principal en la cúspide del domo.

Figura 10.65 Simulación proceso de despliegue domo desplegable en bambú. Fuente: Elaboración del autor





10.5.13 Fabricación e implementación

La fabricación de la estructura soporte del domo, incorpora tres tipos de materiales principales (bambú, PLA y chapa de acero inox 304), así mismo procesos de manufactura y transformación del material para obtener los componentes finales que conforman la estructura desplegable del domo.

Barras de bambú

Corte a medida (520mm) y suministro por Bambusa. es. Importaciones y proyectos. Especialistas en bambú [103].

Especie: Tonkin Ø15 mm. Espesor de pared de 3 a 4 mm (figura 10.66)

Nombre científico: Pseudosasa Amabilis

Color: Amarillo claro

Conicidad: Max 7 mm por metro lineal

Origen: China

Características: Gran resistencia en diámetros pequeños, fortaleza y baja conicidad en diámetros pequeños [103].

Conexiones módulos de tijeras

El proceso de fabricación de piezas, se logra gracias al apoyo técnico de Ateneu de Fabricació Ciutat Meridiana y el laboratorio de fabricación CAD-CAM de la Universidad de Bath.

La impresión de las piezas se realiza simultáneamente en ambos laboratorios de impresión 3D. Todas las conexiones se imprimen en termoplástico biodegradable (PLA) color blanco.

El tiempo de impresión de las piezas, depende de las características del diseño de cada pieza, espesor, tamaño y complejidad del elemento, así como la capacidad de área de la cama (área sobre la cual se imprimen las piezas) que depende del modelo de la impresora.

Figura 10.66 Barra de bambú del tipo Tonkin Ø15 mm. Espesor de pared de 3 a 4 mm [103]



Para el caso específico, con la impresión simultánea en ambos laboratorios, se contó con dos impresores BCN3D Sigma con una capacidad de imprimir 21 piezas a la vez y cuatro impresoras Ultimaker, con capacidad de imprimir nueve piezas a la vez.

Con una media de impresión de 55 piezas impresas correctamente por día, y dependiendo de la disponibilidad de las impresoras, la impresión de 276 piezas tardó cinco días en realizarse (figuras 10.67).

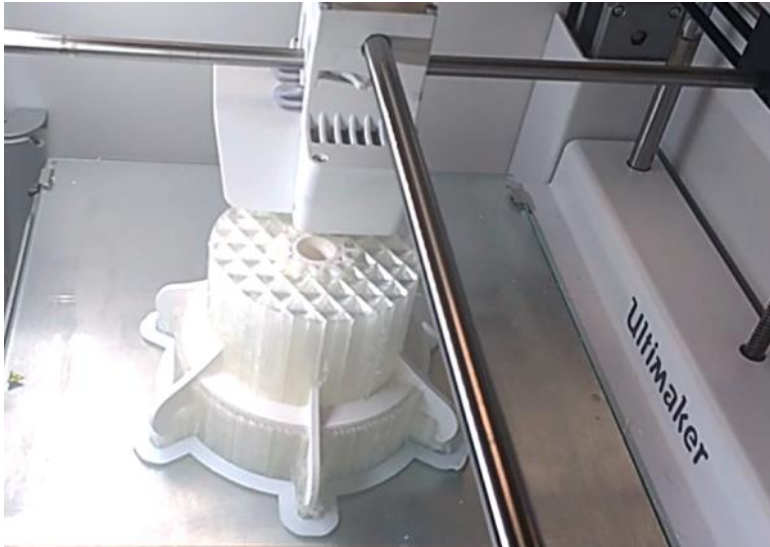
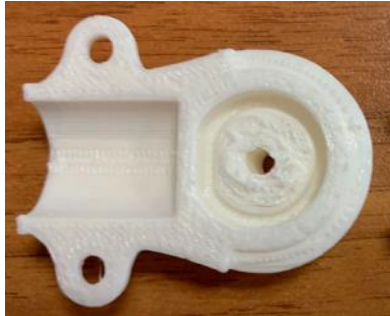
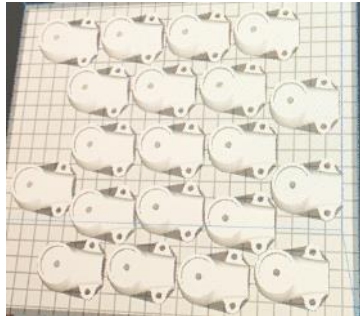
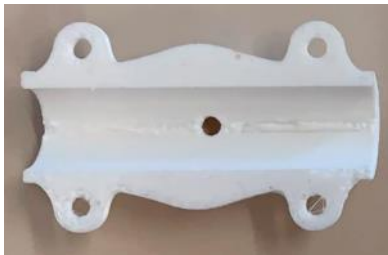
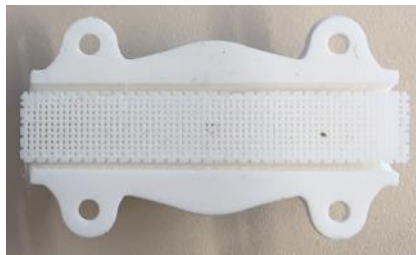
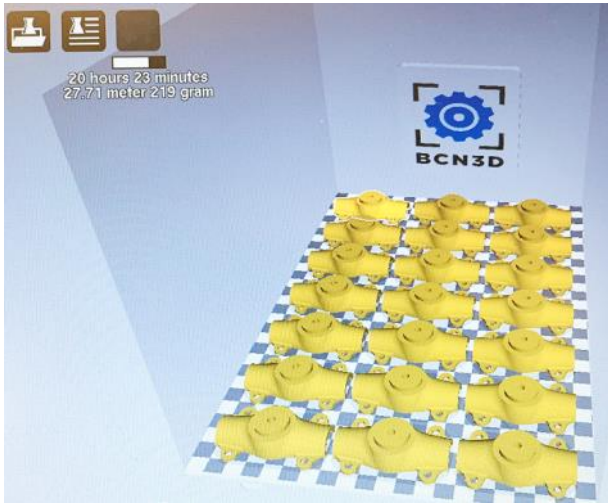
Se ha de considerar un proceso adicional de limpieza de material extra de PLA en las piezas, se ha de eliminar todos los soportes internos generados para obtener la concavidad de las piezas y limar los elementos para obtener un mejor acabado.

Para la fabricación del nodo principal y debido a las características geométricas de la pieza, el proceso de impresión contiene soportes solubles, que ayudan a sostener aquellos elementos que durante la impresión pueden fallar por su peso al estar en voladizo.

Una vez se imprime toda la pieza, esta se introduce en agua y los soportes adicionales se deshacen para obtener la pieza final acabada, no obstante también se requiere de una limpieza posterior para eliminar los restos de PLA y dejar un acabado uniforme.



Figura 10.67 Proceso de impresión 3D. Abrazaderas y nodo principal. Fuente: Elaboración del autor





Soporte-riel

El diseño, fabricación y asesoramiento técnico para la materialización de los soportes del domo desplegable en bambú, se realiza gracias a la colaboración de la Empresa Esteban Costa. Metal manufacturing since 1920 [107].



Para los soportes móvil y fijo de cada semiarco en bambú, se opta por pletinas de acero inoxidable soldadas, con un espesor de dos milímetros, una propuesta técnica, que genera mayor resistencia ante los esfuerzos que se presentan durante las diferentes etapas de despliegue.

El proceso de fabricación para estos componentes incluye el corte láser de las pletinas, con sus agujeros correspondientes para el paso de los pasadores y a continuación se prosigue con el proceso de soldado, garantizando la correcta alineación de las pletinas para recibir las barras de bambú.



Figura 10.68 Fabricación soporte fijo y móvil.
Fuente: Elaboración del autor



Figura 10.69 Fabricación soporte riel.
Fuente: Elaboración del autor

En el caso del soporte móvil, el cual se desplaza sobre el riel, las pletinas son soldadas sobre una chapa doblada previamente, a través de una plegadora especializada para este tipo de dobleces, que logra generar las pestañas proyectadas en diseño y encajar sobre el riel, de tal manera que permite el desplazamiento horizontal, obteniendo el correcto proceso de pliegue y despliegue del semiarco, pero restringiendo el desplazamiento vertical, para mantener el semiarco sujeto al riel y evitar el volcamiento en las etapas finales de despliegue.

Para la fabricación del riel, se implementa nuevamente la plegadora para obtener el perfil en chapa doblada, que define el soporte de los semiarcos. Esta pieza recibe los semiarcos en posición plegada y así mismo permite el desplazamiento del soporte móvil para obtener el despliegue de la estructura. Su diseño acoge en la parte inferior los módulos de tijeras de la estructura del suelo, correlacionados a través de pasadores verticales, que permiten el despliegue simultaneo de los semiarcos y la agrupación de tijeras del suelo.

Ensamble domo

Una vez se encuentran todas las piezas impresas y fabricadas, se procede al ensamble de los componentes (figura 10.70 y 10.71).

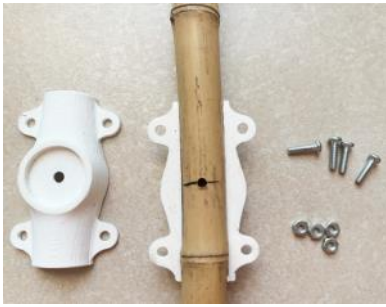
Se inicia por la preparación de las barras de bambú con sus correspondientes abrazaderas, que generan las articulaciones específicas para formar módulos de tijeras, y así mismo la agrupación entre ellos para configurar los semiarcos desplegados (figura 10.70).

El objetivo es lograr que las abrazaderas encajen a presión, para asegurar su posicionamiento y que no se salgan durante las diferentes etapas de despliegue. Para ello es necesario contar con barras de bambú muy uniformes, con la menor conicidad posible y realizar cortes de la longitud requerida, tratando de no coincidir con los anillos propios de las barras de bambú en los extremos.

Aunque si que es favorable, la presencia de los anillos en la articulación central, ya que debido al agujero que se realiza en las barras, estos ayudan a controlar las posible fisuras que se presenten.



Figura 10.70 Ensamble barra de bambú con abrazaderas.
Fuente: Elaboración del autor

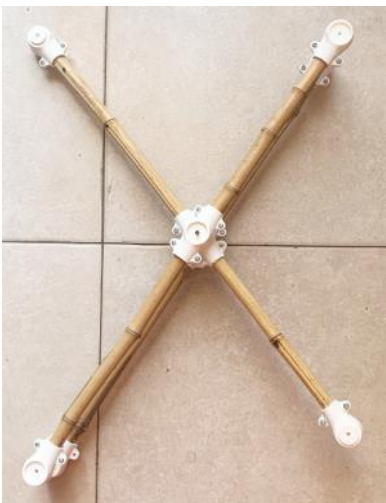


Dadas las características morfológicas del bambú, no en todos los elementos se logra la perfección entre el ensamble de las abrazaderas y la barras, debido a casos de conicidad, de esta manera se opta por engrosar las barras con cinta adhesiva de neopreno, obteniendo la correcta fijación de la abrazadera a presión.



El sistema de cierre de las abrazaderas se realiza con penos y tuercas, las abrazaderas correspondientes a la articulación central contienen cuatro pernos de fijación y las articulaciones posicionadas en los extremos contienen dos pernos de fijación.

Finalmente para este primer proceso de ensamble, es importante, prestar atención en la colocación de las abrazaderas, ya que se ha implementado un sistema machihembrado. A la hora de configurar las tijeras, donde cada módulo de tijera esta conformado por tres barras, siempre la barra central debe incorporar las abrazaderas específicas, tanto en las articulaciones extremas, como en la articulación central, de tal manera que encajen con su barra adyacente con el sistema de machihembrado.



Preparados todos los módulos de tijeras, se procede a su agrupación para configurar los semiarcos. Para obtener un correcto armado de los semiarcos, se aconseja pre-posicionar la tijera inicial con sus respectivos soportes y riel. Se establece entonces que, las barras dobles y que corresponden al tramo largo de la longitud de la barra, se articulan en sus extremos al soporte móvil y la barra individual es articulada al soporte fijo, obteniendo de esta manera la curvatura ideal para el proceso de despliegue.

A partir de aquí, solo resta continuar con la agrupación de los módulos de tijera, cumpliendo la condición de plegabilidad requerida, hasta configurar la totalidad de los semiarcos. Se procede a posicionar los soportes sobre el riel y asegurar el soporte fijo, para así ensamblar los semiarcos y verificar el correcto proceso de despliegue del semiarco sobre el riel (figura 10.72).



Figura 10.71 Ensamble barra de bambú con abrazaderas y configuración de los semiarcos desplegables.

Fuente: Elaboración del autor



Figura 10.72 Ensamble barra semiarco desplegable sobre soporte riel. Posición plegada y desplegada.

Fuente: Elaboración del autor

Para los módulos de tijera de la estructura del suelo, las condiciones de ensamble cambian un poco, es determinante obtener un despliegue con curvatura constante y para ello es necesario que en la agrupación de tijeras del suelo, en cada tijera no consecutiva, se elimine la articulación central del módulo (Ver capítulo 8, apartada 8.3.1) (figura 10.73).

Esta solución, modifica la correlación de tijeras del suelo con los semiarcos, condicionando el despliegue. Es decir no se obtiene un despliegue simultaneo como tal, pero una vez los semiarcos se elevan manualmente, forzarán a las tijeras del suelo a tomar su posición final de despliegue y configurar la geometría del domo establecida.

Las imágenes representativas del proceso de despliegue de la estructura del domo en bambú, exponen el comportamiento real del proceso, donde se observa que en las primeras etapas de despliegue, si que se despliega parcialmente la agrupación de tijeras del suelo, pero los semiarcos se mantiene plegados. Es hasta que se procede manualmente al despliegue de los semiarcos, que la estructura del domo empieza a tomar su forma hasta llegar a la posición final de despliegue (figura 10.74).

También se observa, un cambio en las articulaciones extremas de las tijeras del suelo, debido a una variación del diámetro del pasador que articula los dos componentes (semiarcos y tijeras de suelo), se opta por un diámetro mayor a 8 mm, que genera mayor resistencia ante el proceso de despliegue y por esta razón las articulaciones extremas son remplazadas por armellas cerradas del diámetro necesario, junto con la incorporación de separadores del mismo material de las barras para mantener las barras de bambú paralelas (figura 10.74).

Figura 10.73 Tijeras de suelo.

Desarticulación central en módulos de tijeras intercalados

Fuente: Elaboración del autor



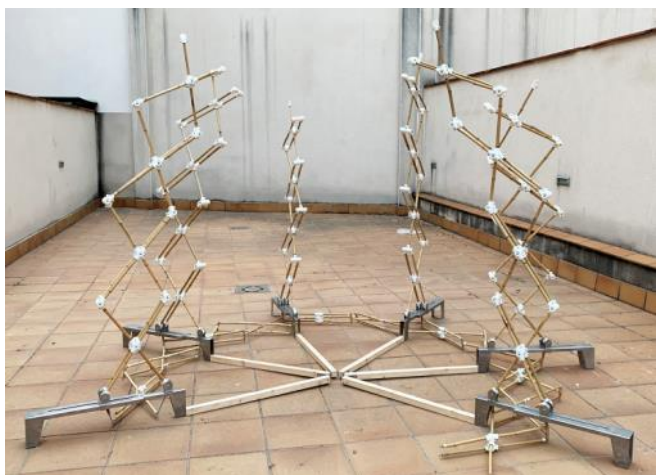
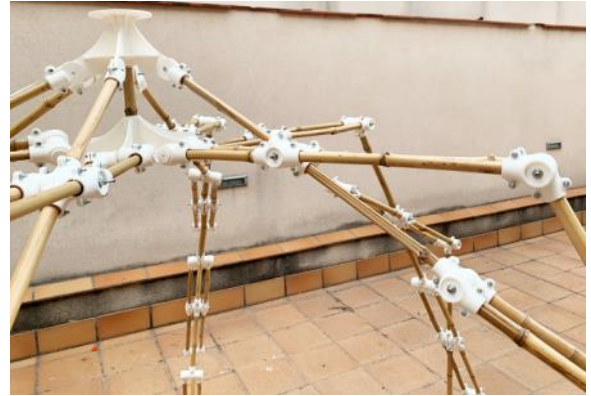
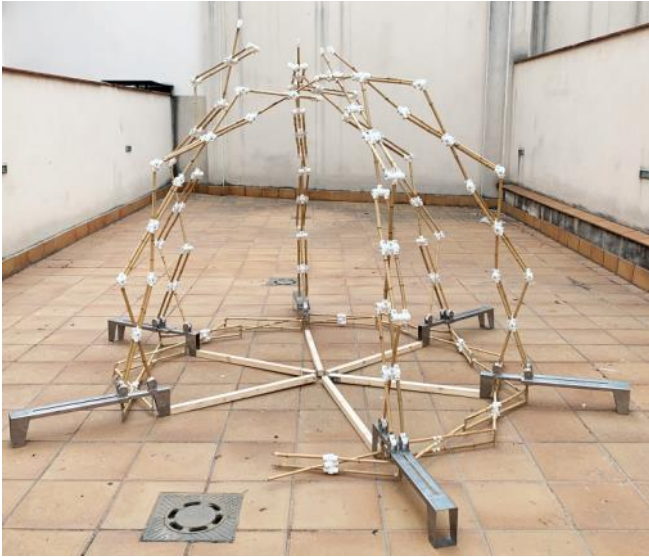


Figura 10.74 Proceso de despliegue prototipo domo en bambú. Fuente: Elaboración del autor



10.5.14 Uso y durabilidad

El prototipo realizado para el domo en bambú, es una aproximación a escala para visualizar el proceso de despliegue y comportamiento de la estructura con las soluciones proyectadas en impresión 3D, para las articulaciones de las barras que conforman los módulos de tijeras. Su utilización se enmarca en la exploración investigativa, sentando las bases para la proyección de estructuras desplegadas a partir de materiales naturales como es el caso de las barras de bambú.

Su construcción no se proyecta para un uso arquitectónico debido a la escala implementada, el objetivo de la fabricación del domo en bambú, es utilizar los materiales, lo más cercano posible a la realidad, permitiendo comprobar a escala, el comportamiento de los mismos en relación a su peso y detalles constructivos desarrollados para obtener el despliegue simultáneo de la estructura.

Referente a su durabilidad, gracias a que todos sus componentes tienen la capacidad de desensamblarse, es posible realizar fácilmente el reemplazo de piezas. En este caso, debido a los esfuerzos soportados por las barras de bambú, durante las etapas más críticas del proceso de despliegue, existe la probabilidad que se presenten fisuras en las barras de bambú, llegado el caso, el proceso de sustituir una barra de bambú, solo consistirá en desatornillar los componentes específicos y proceder al reemplazo.

Se comprueba la efectividad del método geométrico, al obtener el domo resultante con la geometría proyectada. La simultaneidad del despliegue no se obtiene totalmente y es necesario manipular los semiarcos para lograr su izado. De todas formas el proceso de despliegue se realiza sin dificultades y se obtiene la estabilidad de la estructura al incorporar el nodo principal.

En la actualidad el domo en bambú sigue en desarrollo, y sienta un precedente para futuras investigaciones, con el ánimo de continuar la investigación en soluciones idóneas para las conexiones y articulaciones en estructuras desplegadas.



Pabellón Xuê . Mención de honor. Premio latinoamericano Ibramem Amata de Arquitectura en Madera, categoría estudiantes, 2018, promocionado por la Universidad de Sao Paulo dentro del marco del III Congreso Latinoamericano de estructuras de madera y el XVI Encuentro brasileiro de maderas y estructuras de maderas [87]. Fotografía Laura Costa.



11

CAPÍTULO

CONCLUSIONES GENERALES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Español e inglés

Contenido capítulo

11.1 Conclusiones	532
11.2 Futuras líneas de investigación	551
11.3 Conclusions	556
11.4 Future research lines	574

11.1 Conclusiones

Se menciona a continuación las conclusiones generales ordenadas según las partes principales del documento y apartado específico.

PRIMERA PARTE. Contextualización

Capítulo 2. Estado del arte

- De acuerdo con el estudio realizado sobre propuestas teóricas y aplicaciones existentes, en torno al desarrollo de las estructuras desplegadas, se establecen los conceptos básicos para un adecuado planteamiento de esta tipología de estructuras: sencillez, ligereza, modulación y utilización de los recursos mínimos necesarios, para obtener, según la función o uso de la edificación, la transformación del espacio a través del aumento o reducción del volumen.
- La relación estructura desplegable con cerramientos compatibles, debe ser acorde con los conceptos anteriores. La integración de ambos componentes ha de ser armónica, proporcional y funcional, proponiendo un adecuado diseño de conexiones, anclajes y accesorios necesarios para garantizar el correcto proceso de despliegue y pliegue de la estructura, evitando incompatibilidades y garantizando en todo momento la seguridad del conjunto.

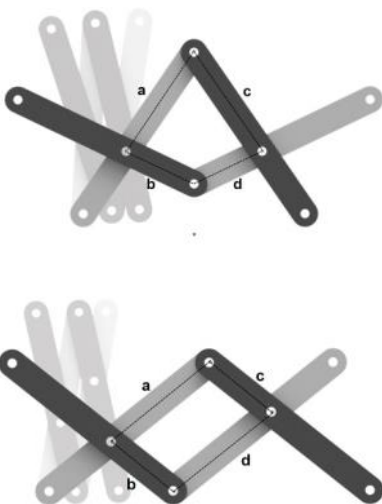


Figura 11.1 Condición de plegado necesaria para la correcta pliegue y despliegue de la agrupación de tijeras rectas
Fuente: Elaboración del autor

Capítulo 3. Sistema tipo tijera y tipos de despliegue

- El análisis y experimentación de estructuras desplegadas basadas en el sistema tipo tijera (STT) y la configuración de superficies desplegadas a través de la agrupación de módulos de tijera, permite concluir las principales condiciones geométricas ideales para los procesos de despliegue, y así obtener una variedad de configuraciones espaciales con el objetivo de reducir la incompatibilidad entre elementos.
- De esta manera, el estudio coincide con los diferentes autores que preceden esta investigación. El principal requisito para obtener un correcto desplegado con más de dos módulos de tijeras agrupados, es cumplir la condición de plegado definida en la ecuación $a + b = c + d$, relacionada con los tramos de barras de un módulo de tijera que se articula con un módulo de tijera adyacente (figura 11.1).

- A partir de esta condición, la investigación aporta a lector tablas descriptivas de fácil interpretación, que proporcionan a través de esquemas geométricos, la configuración y comprensión de este tipo de estructuras para aumentar su aplicabilidad e investigación.

- Se definen cuatro variables para proyectar una superficie desplegable, con la implementación de barras rectas de la misma longitud:

Tipo de superficie (plana, simple curvatura, sinclástica, anticlástica)

Tipo de módulo (cuadrangular, triangular, simple)

Tipo y características del encadenamiento entre barras de tijeras y módulos de tijeras (articulación central o articulación excéntrica) en la dirección del eje (x) o el eje (y).

- La exploración geométrica en la configuración de superficies de doble curvatura, conformadas por módulos de tijeras triangulares y cuadrangulares, expone la presencia de diversas incompatibilidades durante los procesos de despliegue.

- Estas incompatibilidades se generan porque la relación entre las dos directrices de la superficie de doble curvatura, conformada por agrupaciones planas de tijeras, restringe el movimiento natural que describe este tipo de agrupaciones: un recorrido con una curvatura de radio variable, donde se desplaza el centro de la curvatura en cada una de las etapas de despliegue.

- Los modelos físicos y digitales, permiten describir con mayor claridad este comportamiento, concluyendo que el proceso consiste en un despliegue semilineal en las primeras e intermedias etapas de despliegue, generando una expansión de la agrupación de tijeras fuera de diámetro estipulado por la geometría final y posteriormente en la etapas finales de despliegue, se presenta un giro repentino donde la agrupación de tijeras se posiciona para obtener la curvatura deseada.

- Este comportamiento, previamente analizado por diversos autores referentes, exige la implementación de estrategias técnicas complejas para evitar el no desplegamiento de la estructura, ya sea por interferencia entre elementos, posibles rotura de las barras y así mismo el colapso de la misma.

SEGUNDA PARTE. Experimentación

Capítulo 4. Métodos existentes para configurar arcos y superficies desplegadas

- Los métodos referentes analizados, se caracterizan en su mayoría por tener una base geométrica previamente dimensionada basada en redes planas cuadrangulares o triangulares, proyectadas a directrices con curvatura o desarrolladas a partir de elipses concéntricas.
- Son métodos que exigen un rigor meticuloso y un proceso dispendioso que requiere un control milimétrico para ubicación del centro, foco de la curvatura y trazados de las barras, para acertar correctamente con la condición de plegabilidad y configurar módulos de tijeras que se plieguen y desplieguen sin presentar incompatibilidades.
- Se concluye que los métodos geométricos más prácticos, para el trazado de agrupaciones de tijeras que describan un despliegue con curvatura, se basan en la geometría de poliedros y en circunferencias con radios equidistantes que permiten generar módulos de tijeras con un mínimo de incompatibilidades.

Capítulo 5. Método a partir de polígonos regulares para configurar arcos desplegados

- .- Se establece la geometría del domo, como superficie de estudio para el desarrollo y aplicación de arcos planos desplegados definidos como ejes meridionales, proyectados para usos arquitectónicos temporales de mediana escala (pabellones, stand, mercadillos y escenarios).
- Se replantea los procesos de implementación tradicionales de este tipo de estructuras, proponiendo un despliegue desde la base de la estructura: semiarcos que se despliegan desde el suelo y se juntan en la cúspide, siendo esta, la posición final de despliegue y la posición que garantiza la estabilidad total de la estructura.
- Con el objetivo de definir las determinantes geométricas para la búsqueda de la forma de los arcos, la investigación desarrolla un método geométrico utilizando la configuración de polígonos regulares estrellados. La metodología implementada arroja como resultado las ecuaciones trigonométricas necesarias para facilitar la búsqueda de la forma y el dimensionamiento de un arco desplegable requerido.

- Los resultados del método geométrico propuesto para la configuración de arcos desplegados, están determinados por tres parámetros variables definidos en:

La longitud de la barra o diámetro del domo a requerir

Tipo de polígono regular (pentágono, hexágono y heptágono)

Tipo de arco (rebajado, medio punto y herradura)

-Estos parámetros permiten hallar la ubicación exacta de la articulación entre barras sobre el eje longitudinal de las mismas, el número necesario de tijeras y las características de apertura del arco.

- El estudio y aplicación de la metodología propuesta, ha identificado las categorías de polígonos regulares viables estructuralmente, que definen el grado de apertura de las tijeras, para obtener una adecuada capacidad de carga y proporción entre la luz a cubrir y el espesor del arco.

- Se determina la importancia de cumplir el valor del factor $k = e/r$ (relación entre espesor y radio del arco), definido históricamente por estudios y ensayos que preceden esta investigación [44], el cual delimita la aplicación de la metodología geométrica, al uso exclusivo del pentágono, hexágono y heptágono, siendo estas geometrías aquellas que permiten obtener un acertado valor del factor k para los arcos desplegados propuestos.

- Para la expresión de los resultados y aplicabilidad de la metodología, el estudio desarrolla tablas de cálculo interactivas utilizando como herramienta informática el programa Excel, ofreciendo al lector la posibilidad de configurar diversas posibilidades de arcos, a partir de las tres variables fundamentales que dan a conocer los valores necesarios para definir las características geométricas del arco desplegable a desarrollar.

- La validación de la metodología, se lleva a la práctica a través de una aplicación específica de un escenario desplegable, donde se selecciona la geometría base a partir del heptágono, el arco de herradura y un diámetro de ocupación de 5.20 metros. La geometría del arco desplegable resultante permite incorporar el concepto de despliegue simultáneo entre el plano horizontal y vertical en la espacialidad del domo, implementando la misma base geométrica.

Capítulo 6. Arcos despleables

- El análisis de los arcos se realiza con el programa WinEva (v. 8), representados dentro de la plataforma del programa como elementos lineales denominados barras. La investigación define tres posiciones de despliegue del semiarco definidas como posición intermedia, posición final y posición ideal.
- Es fundamental para la correcta obtención de resultados en el programa WinEva (v. 8), introducir de forma ordenada y coherente, los determinantes de diseño, material (tubos de cartón del diámetro de 50 mm, espesor de 5 mm) y relación entre barras específicas al sistema tipo tijera, para calcular de forma acertada las deformaciones elásticas y los esfuerzos producidos en dos dimensiones, en cada caso.
- Los resultados obtenidos en cada una de las posiciones de despliegue han demostrado que las mayores deformaciones suceden en la posición final de despliegue, de esta forma la investigación propone determinar un límite de despliegue previo a esta posición, denominada posición ideal de despliegue, cuya deformación de los semiarcos coincida con la geometría establecida por el método geométrico propuesto.
- La búsqueda de la posición ideal de despliegue, es específica para cada caso de domo desplegable, ya que los desplazamientos resultantes dependerán de las características estructurales y constructivas del semiarco a analizar, de la geometría seleccionada, del número de módulos de tijeras incorporados, del número de barras, longitud y sección, junto a la selección del material a utilizar, el cual determina las características físicas a introducir en el programa.
- Para el caso específico analizado, los semiarcos despleables configurados a partir de cuatro módulos de tijeras con tubos de cartón, la búsqueda de posición ideal de despliegue definida a través del método de ponderación, arroja como resultado que la distancia k (espesor del arco) deberá ser igual a $k + 4.25$ cm. De este modo, se prevé en la práctica durante la construcción del prototipo, tener en cuenta esta medida de apertura para garantizar el correcto proceso de montaje de la estructura.

Capítulo 7. Nodo principal

- Tras el estudio, la exploración de diversas configuraciones de nodos desarrollados en aplicaciones referentes y la realización de nuevas propuestas. Se concluye, que el nodo principal debe garantizar que la estructura del domo, una vez llegue a la etapa final de despliegue, se posicione en un estado de equilibrio obteniendo la estabilidad necesaria y seguridad para su utilización, implementando métodos de anclaje seguros, de fácil ejecución que permitan optimizar los tiempos de montaje y desmontaje de la estructura.
- La propuestas del nodo desarrolladas, se fundamentan en dos técnicas de fabricación, la primera consiste el diseñar el nodo para el caso de estudio, incorporando la impresión 3D. Tras varias exploraciones, el resultado se fundamenta en dos partes de nodo (superior e inferior) con un eje central tipo tubo, que incorpora las pletinas radiadas con los agujeros necesarios para recibir el anclaje del tipo pletina de los semiarcos.
- La segunda técnica de fabricación, implementada en los prototipos construidos, consiste el materializar el nodo a partir de planos doblados y encajados, utilizando como material, paneles de composite formado por dos láminas de cubierta de aluminio y un núcleo relleno de agregado mineral (Alucobond®).
- El resultado constructivo del nodo, es una pieza muy ligera, compuesta por planos enlazados con el método de machihembrado, donde cada plano toma la posición y recibe el anclaje del semiarco correspondiente. Ambos sistemas incorporan el mecanismo tradicional de tornillos, tuercas y arandelas entre pletinas para obtener la articulación entre ambos componentes.

Capítulo 8. Plataforma plegable

- El estudio propone la incorporación de una plataforma desplegable, conformada por una agrupación de tijeras de suelo y paneles del tipo origami para conformar un entarimado plegable. La relevancia de su desarrollo e implementación radica en que se obtiene un despliegue simultáneo entre la plataforma de suelo y los semiarcos desplegables, utilizando la misma configuración de tijeras definidas por el método geométrico propuesto, obteniendo de esta forma una modularidad en todo el conjunto estructural con barras de la misma longitud.
- El resultado de los análisis de las diversas simulaciones del proceso de despliegue de la plataforma y del conjunto estructural, tanto en modelos digitales como en modelos físicos, permite visualizar la correcta correlación durante el despliegue entre los dos componentes (semiarcos desplegables y tijeras del suelo). Además se observa principalmente, la expansión característica que genera este tipo de agrupaciones de tijeras, definida como un despliegue de curvatura variable.
- De esta forma se determina que la solución estructural entre componentes (semiarcos desplegables y tijeras del suelo) es viable constructivamente, si se cuenta con el espacio suficiente para el montaje de la estructura y no se incorporan paneles para configurar una tarima desplegable ya que se pueden generar incompatibilidades.
- Para obtener un domo desplegable que incorpore la plataforma plegable y se adapte al despliegue simultáneo, es necesario incluir un mecanismo que permita el correcto despliegue y al mismo tiempo soporte el entarimado plegable. La investigación propone el sistema soporte viga-riel, un componente estructural compuesto por tres partes fundamentales: soporte riel, soporte móvil y viga.
- La incorporación del entarimado plegable a la estructura, obliga a modificar las características del despliegue original, dando como resultado un proceso de despliegue de curvatura constante, se obtiene entonces, un despliegue del tipo abanico en planta, que facilita el diseño de las soluciones técnicas para obtener un adecuado proceso de pliegue entre los paneles del entarimado, correlacionado con los demás componentes estructurales.

- La geometría del entarimado corresponde a un diseño de patrones triangulares, donde la implementación de mecanismos idóneos como bisagras flexibles, barras extensibles y bisagras del tipo cazoletas permiten la viabilidad constructiva y el adecuado proceso de pliegue entre paneles, obteniendo un pliegue acertado de la estructura total.

-Como resultado de las observaciones de las simulaciones de la plataforma plegable, para restringir el proceso de despliegue a un recorrido con curvatura constante, es necesario implementar soluciones técnicas sobre la agrupación de tijeras del suelo. Se opta entonces, por la desarticulación central en los módulos de tijeras, que como resultado genera un despliegue parcial de los semiarcos que habrá que completar manualmente para posicionar los semiarcos en su estado final de despliegue.

Capítulo 9. Cubierta desplegable

- Se proyecta como secciones modulares de tensoestructuras, que cumplen la función de cerramiento para los domos desplegables proyectados, además de colaborar en la rigidez de la estructura en su estado final de despliegue, la membrana al ser un material ligero y flexible permite adaptarse y compaginar con el proceso de despliegue y pliegue de la estructura.

- La investigación establece tres posibilidades de cubierta determinadas por el posicionamiento de la membrana con respecto a la estructura de los semiarcos, estas son definidas en:

Cubierta interior

Cubierta exterior

Cubierta seccionada.

-Cada una de las posibilidades de cubierta desplegable es analizada con el programa WinTess© [187], en dos posibles entornos de ubicación, dentro de un recinto cerrado y al aire libre. La simulación arroja los resultados para cada caso, enmarcados en tres procesos: la búsqueda de la forma, la configuración de los patrones y el cálculo estructural con un análisis no lineal.

- Los resultados permiten concluir que las tres posibilidades de cubierta, describen un estado de equilibrio acertado frente a las cargas de viento y peso propio.
- Respecto a los resultados del comportamiento de las cubiertas desplegadas, se concluye que los mayores desplazamientos ocurren en la cubierta interior, al aire libre. Se propone reforzar el borde de la boca del escenario para compensar las fuerzas de tracción que allí suceden y permitan reducir los desplazamientos.
- Acerca de la tracción máxima, los valores más representativos ocurren en las cubiertas dentro de un recinto cerrado, el mayor valor ocurre en la cubierta interior y el menor valor en la cubierta seccionada. Es necesario proyectar en ambas localizaciones, la incorporación de cables tipo viento para mejorar el comportamiento de la estructura.
- Según la simulación, se concluye que los esfuerzos de compresión más representativos, suceden en las cubiertas ubicadas al aire libre, sobre las barras rigidizantes, estas corresponden a elementos auxiliares entre semiarcos para rigidizar el conjunto estructural. El mayor valor se presenta en la cubierta exterior y el menor en la cubierta seccionada.
- A través de la comparativa de los esquemas resultantes del ratio, se concluye que la cubierta seccionada, en ambos entornos, es aquella que presenta el mejor comportamiento, con menores desplazamientos y corresponde a la opción más ligera. Esta opción incluye además ventajas como la fabricación de secciones modulares independientes y sistemas de montaje y desmontaje sencillos que ayudan a optimizar el rendimiento de todos los procesos.
- Para obtener un despliegue simultáneo entre ambos componentes (semiarcos y cubierta), se desarrolla una propuesta que consiste en una relinga central del tipo cremallera que divide cada sección de membrana en dos partes. Una vez se obtiene la configuración del domo, la cremallera se cierra y se establece la continuidad entre patrones. La cubierta se convierte en una superficie tensada que aporta estabilidad y rigidez a la estructura con un mínimo de arrugas.

- Los sistemas de anclaje proyectados para la sujeción de la membrana, basados en mecanismos de mosquetones, anillas, placas de fijación y ollaos sobre el textil, demuestran que son soluciones idóneas, de fácil fabricación y disponibilidad en el mercado, capaces de soportar desplazamientos y rotaciones que puedan aparecer durante las etapas de despliegue e instalación de la membrana.

TERCERA PARTE. Resultados y conclusiones

Capítulo 10. Tabla interactiva. Construcción de prototipos

- Los conocimientos obtenidos en la presente investigación, se sintetizan en la elaboración de una tabla interactiva basada en el método geométrico propuesto, que permite al usuario interactuar con las variables geométricas establecidas a través de la herramienta informática de Excel.

- Se identifican las variables que el usuario debe definir para proceder a configurar espacialmente un domo desplegable específico.

Variables geométricas:

Tipo de polígono regular

Tipo de arco en elevación

Tipo de arco en planta

Componentes de cerramiento:

Incluir o no plataforma de suelo

Tipo de cubierta: Sin cubierta, interior, exterior, seccionada

Variables de dimensión:

Longitud de barra o diámetro total.

-La tabla interactiva se divide en tres columnas, siendo la primera columna aquella que contiene las variables a introducir o seleccionar.

La segunda columna expone todo el resultado gráfico de la configuración espacial seleccionada junto a la representación de proceso de despliegue.

Y la tercera columna incluye toda la información numérica resultante de las ecuaciones, estableciendo la longitud de la barra o diámetro requerido, indicando la posición de las articulaciones en la barra y estableciendo las dimensiones resultantes de la altura libre y flecha según el arco seleccionado y polígono seleccionado.

- La aplicación del método geométrico, utilización de la tabla interactiva y comprobación de la viabilidad estructural y constructiva de los domos desplegables proyectados para esta investigación, se realiza a través de la demostración con la construcción de tres prototipos:

Escenario desplegable

Stand Egg

Domo en bambú

- **El escenario desplegable**, respondió adecuadamente al programa estipulado de cuatro procesos de montaje y desmontaje. El comportamiento de los semiarcos desplegables, configurados con tubos de cartón, fue acertado, constituyó un domo en equilibrio, estable y de fácil manipulación manual debido a su ligero peso.

-La particularidad de esta aplicación, es que no incorpora un despliegue simultáneo entre los semiarcos y la plataforma plegable. Aun así se pudo ejecutar y analizar a escala real el proceso de despliegue de la plataforma y a continuación el proceso de despliegue de la agrupación de tijeras que configura cada semiarco.

- En la práctica se observa que en el estado plegado, cada semiarco se convierte en un paquete compacto, modular, ligero que se puede transportar manualmente. En la etapas intermedias, el despliegue se controlan manualmente, evitando el vuelco del mismo y con la seguridad apropiada de la mano de obra para evitar atrapamientos, se realiza un control visual para llegar a la posición ideal despliegue y proceder finalmente a la conexión de nodo para obtener el domo configurado.

- La integración con la plataforma plegable, es acertada configurando un espacio útil de entarimado para el escenario. Aunque no se presentaron incompatibilidades durante el despliegue y pliegue de la plataforma, si que se generaron fisuras en los paneles de aglomerado en los puntos de articulación con la bisagras. Proponiendo como soluciones técnicas a futuro, el cambio de material para los paneles, reforzar el perímetro de cada panel e incluir bisagras flexibles.

- La incorporación de la lycra, como material de cubierta, genera un cerramiento versátil y de fácil manipulación a la hora de realizar los ollaos y costuras necesarias manualmente. Se realizó un premontaje con los semiarcos plegados y se procedió al izado de ambos componentes. La tela se tensa y se fija totalmente una vez el domo está configurado.

- El escenario desplegable ha demostrado la integración en su diseño de conceptos sostenibles, todos los componentes estructurales son de segundo uso y una vez desmontada la estructura, vigas, paneles, tubos y herrajes fueron reutilizados en nuevos proyectos.

- Se comprueba que el posicionamiento de la articulación entre barras de tijeras y longitud de la barra, generado a partir del método geométrico propuesto, crea a escala real la espacialidad conforme a la búsqueda de la forma proyectada.

- **El Stand Egg**, es el prototipo realizado para comprobar la viabilidad constructiva del despliegue simultáneo entre los semiarcos desplegados y la agrupación de tijeras del suelo. Para este prototipo se utiliza barras tubulares de aluminio de sección rectangular como material principal del domo.

- La aplicación del método geométrico propuesto, demuestra la optimización en los procesos de fabricación y ensamblaje para la proyección domos desplegados, ya que se generan componentes modulares y de la misma longitud que facilita el armado de la estructura.

- El Stan Egg, al no incorporar la plataforma plegable, permite visualizar el proceso de despliegue que describen este tipo de agrupaciones de tijeras rectas. La estructura, en sus etapas intermedias de despliegue, presenta una gran expansión del conjunto en planta, aproximadamente el doble del diámetro establecido como configuración final. De esta forma, es indispensable prever el área necesaria para el proceso de pliegue y despliegue de la estructura. para realizar un montaje seguro de la estructura.

- La espacialidad de domo en aluminio incorpora un semiarco por cada articulación de dos módulos de tijeras en planta, dada la geometría seleccionada y la tipología de arco implementado, se generan nueve semiarcos desplegados, que origina un proceso de despliegue dispendioso, el cual requiere de una persona por cada semiarco, para controlarlo manualmente y evitar volcamientos lateral de los semiarcos.
- Esta situación replantea en la investigación, la cantidad de semiarcos necesarios para configurar un domo desplegable, así mismo incentiva a indagar en mejorar las soluciones técnicas de la conexión entre los semiarcos desplegados y la agrupación de tijeras de suelo, y adicionalmente la posibilidad de incorporar elementos de rigidización transversal entre semiarcos, adaptables al proceso de despliegue.
- Por otro lado, y cumpliendo con el objetivo de la investigación, el proceso de pliegue y desmontaje de la estructura se optimiza, obteniendo un proceso muy rápido y práctico que se realiza en pocos minutos, aprovechando el peso propio de semiarcos y la facilidad del pliegue, logrando un paquete compacto que no afecta las características estructurales de los componentes para una próxima instalación de la estructura.
- El desarrollo de nodo principal, proyectado con planos de aluminio encajados y sistema de machihembrado, genera una solución de fácil fabricación y ligera, que se adapta para recibir en distintos ángulos la conexión con los semiarcos. El resultado es eficaz estructuralmente y coincide con el lenguaje arquitectónico del stand proyectado.
- Se concluye que la utilización del aluminio, la sección de la barra propuesta, junto con la geometría establecida y la proporción espacial del stand, genera un conjunto estructural en equilibrio capaz de soportar el peso de una persona, con mayor rigidez que el caso anterior del escenario desplegable.
- La tabla interactiva del Stand Egg, proporciona la visualización de la complejidad de la espacialidad muy cercana a la realidad constructiva, demostrando su efectividad como herramienta para la búsqueda de la forma y dimensionamiento de domos desplegados.

- **El domo en bambú**, es el prototipo realizado a escala 1:2 para visualizar el proceso de despliegue y comportamiento de la estructura con barras de bambú para las agrupaciones de tijeras y exploración de conexiones del tipo abrazaderas que se adaptan a las barras del bambú, fabricadas a través de la tecnología de impresión 3D.

- Los resultados tras la exploración, diseño y fabricación de conexiones para las estructuras desplegables del tipo tijera con barras rectas e implementación de barras bambú de la especie Tonkin (*Pseudosasa Amabilis*) de Ø 15 mm y espesor de pared de 3 a 4 mm como material principal para la configuración de los semiarcos desplegables y agrupación de tijeras de suelo, expone dos alternativas viables:

- La conexión del tipo abrazadera-tubo, es una solución que recibe un tramo de barra por cada extremo de la conexión, para configurar de manera lineal, la barra estándar de cada módulo de tijera. La ventaja de esta conexión, radica en evitar realizar el agujero de la articulación central en la barra de bambú para el paso del pasador, ya que entre menos agujeros se realice, se reduce la posibilidad de fisuras y rotura del material.

- La desventaja de esta solución, se presenta en la fijación del tramo de barra que se introduce dentro de la conexión, ya que es necesario recurrir a colas específicas para obtener una fuerte adherencia entre componentes, lo que limita la posibilidad de reemplazar únicamente las barras de bambú en caso de rotura. Además implica un mayor número de corte de barras, aumentando el volumen de residuos generado durante la fabricación.

- La segunda conexión proyectada del tipo abrazadera, se posiciona como la alternativa más favorable para su aplicación real. Consiste en dos secciones longitudinales que acogen la barra de bambú en los tres puntos de articulación entre módulos de tijera (articulaciones extremas y central). Su fijación se logra gracias a las pletinas y el mecanismo tipo tornillo que enlaza las dos secciones de la conexión, generando la presión necesaria sobre la barra de bambú, para que la conexión quede fija en su posición.

- La experiencia en la construcción del prototipo en bambú, demuestra la importancia en la rigurosidad de la selección del material y corte, buscando las barras más uniformes que presenten la menor conicidad posible, una ventaja añadida en la especie de bambú seleccionada.

- Debido a la configuración estructural del semiarco desplegable, el cual incluye tres barras de bambú por cada módulo de tijera, el sistema de conexión entre barras paralelas incorpora un sistema de machihembrado, que como resultado genera un mecanismo que facilita los procesos de pliegue y despliegue de la estructura, garantizando la correcta relación entre componentes y reduciendo al mínimo la fricción y desarticulación entre ellos.
- La construcción del domo desplegable en bambú, incorpora la estructura de la plataforma plegable, por lo cual determina el tipo de despliegue a una curvatura constante. De esta manera, el modelo construido para este caso, evidencia un despliegue simultáneo parcial, los semiarcos no se posicionan en su etapa final de despliegue, debido a que se ha eliminado la correlación entre las tijeras de los semiarcos y las tijeras del suelo, suprimiendo la articulación central en módulos de tijeras de suelo no consecutivos.
- Esta solución técnica permite el movimiento radial de la estructura de suelo, pero contrarresta el despliegue en vertical, siendo necesario desplegar manualmente el tramo faltante de los semiarcos para configurar la geometría del domo y proceder a conectar los extremos al nodo principal.
- La aplicación de la tabla interactiva, demuestra la versatilidad a la hora de configurar las posibles espacialidades de domos, pudiendo aplicar el material más conveniente según los requerimientos del proyecto.
- El resultado para este caso, describe la geometría de un domo completo que reduce la cantidad de semiarcos a incorporar y que valida la integración de la cubierta y la plataforma desplegable en un despliegue conjunto aunque parcialmente simultáneo.
- La utilización de los diferentes programas para el modelado paramétrico y cálculos de la estructura, fueron fundamentales para comprender el comportamiento de este tipo de estructuras, permitiendo llevar la metodología del proceso de la búsqueda de la forma, a la aplicación real de fabricación de prototipos que cumplieran un estado de equilibrio acertado y fueran viables constructivamente.

- Así mismo, la elaboración de modelos físicos en todas las etapas de la investigación, fueron de vital importancia para entender los procesos de despliegue, visualizar las incompatibilidades entre componentes, explorar nuevas alternativas espaciales y proyectar los detalles de sujeción y articulación adaptables a las características de las estructuras desarrolladas, para concebir de esta forma la optimización de los procesos de fabricación, ensamblaje, montaje y desmontaje de la estructura. (Ver Anexo 3).

- El presente estudio se llevo a cabo para proponer un método de diseño para la configuración de domos despleables, evaluando y demostrando la viabilidad técnica para obtener un despliegue simultáneo entre estructura y cerramientos compatibles con la geometría resultante tras la búsqueda de la forma. El resultado se representa en los tres prototipos realizados, que gracias a la aplicación e interacción con la tabla de búsqueda de la forma, genera un proceso para configurar espacialidades dimensionadas a través de la agrupación del sistema tipo tijera, más rápido, sencillo e intuitivo.

- **Las tres alternativas de los domos construidos**, como demostración del método geométrico propuesto, se adaptaron al uso de materiales diferentes y describieron un comportamiento acertado durante las etapas de despliegue y uso arquitectónico, permitiendo concluir, gracias a la experiencia constructiva que conllevó la fabricación de estos prototipos, que las principales características y ventajas de la aplicaciones desarrolladas se definen en:

- **Modularidad:** El sistema estructural está concebido como la agrupación correlacionada de módulos, subgrupos de componentes donde el proyectista o diseñador tiene la posibilidad de utilizar diversas posibilidades de unidades estructurales y de cerramientos adaptables a las necesidades de uso y aplicación de cada proyecto, permitiendo además la facilidad en el remplazo de piezas y componentes modulares intercambiables en caso de avería o cambio de uso.

- **Homogeneidad:** El método geométrico propuesto en esta investigación para la configuración de domos despletables a partir del sistema tipo tijera con barras rectas, genera en su mayoría elementos de la misma longitud, facilitando los procesos de fabricación y ensamblaje entre componentes y reduciendo los volúmenes de residuos generados.
- **Simplicidad:** Los domos despletables se componen de cuatro elementos estructurales: los semiarcos, el nodo principal, la estructura de suelo plegable y la cubierta despletable. Para su transporte, todo el conjunto se puede desmontar por partes o se puede plegar en un paquete compacto. El proceso de despliegue y pliegue de la estructura, se caracteriza por su sencillez constructiva, no requiere de mano de obra especializada, ni de maquinaria especial, todo el proceso se puede realizar manualmente con herramientas tradicionales (llave, martillo, destornillador y escalera) especificadas en las instrucciones de montaje.
- **Ligereza:** El sistema no involucra una gran cantidad de conectores complejos y un sin número de barras para definir la espacialidad del domo, se opta por la reducción del peso de la estructura, definiendo como estructura solo las líneas meridionales del domo, a través de arcos planos despletables, integrados con alternativas de membranas despletables como cubiertas opcionales para cubrir el recinto generado y plataformas plegables para configurar un entarimado.
- **Estabilidad estructural:** Desde las primeras etapas de diseño, los domos despletables están proyectados con la imagen constructiva y estructural de los arcos y domos tradicionales, siendo conocidas históricamente por su comportamiento eficiente frente a las cargas a las que son sometidas. Retomando los procesos tradicionales en la edificación de arcos, los semiarcos proyectados en esta investigación, se configuran a través de un proceso de izado desde la base, una vez llegan a su posición final de despliegue y se conecten con el nodo principal, se obtienen innovadores domos despletables que logran la estabilidad y rigidez estructural necesaria para su utilización, respondiendo adecuadamente a las cargas adicionales del viento y peso propio.

- **Plegabilidad:** Es la característica fundamental de los domos desarrollados, que permite transformar la estructura de un paquete compacto a una espacialidad arquitectónica para un uso temporal, una ventaja que permite optimizar los tiempos de construcción, cuando se requieren instalar recintos de rápido montaje y desmontaje.

- **Portabilidad y transportable:** Ventajas anteriormente mencionadas, como la modularidad y la plegabilidad, permiten que los domos desplegados sean transportables en conjunto o por componentes modulares, una ventaja que facilita el almacenamiento de la estructura en lugares reducidos, o realizar cambios de emplazamiento a través de vehículos tradicionales de carga.

- **Sostenible:** Al tratarse de barras, como los elementos fundamentales para la configuración de los domos desplegados, los materiales naturales como el cartón, la madera y el bambú son opciones de bajo consumo energético, que se adaptan perfectamente a las características estructurales de los domos y que al final de la vida útil se convierten en residuos orgánicos. Además la simplicidad de los elementos permite siempre la opción de reutilizar materiales, desechados de otros proyectos o edificaciones.

Finalmente, al ser proyectadas como estructuras temporales y fabricadas en taller, este tipo de estructuras no generan un impacto negativo en su implantación, ya que los procesos de montaje y desmontaje no producen ningún desecho de obra de construcción.

- No obstante, existen inconformidades resultantes tras la validación constructiva de la presente investigación, como es la escala proyectada para este tipo de estructuras. La presente investigación se centro en espacios de pequeña y mediana escala (puestos de mercadillo, stand, pabellones o escenarios con áreas entre 20 m² y los 200 m²), una proporción coherente para las dimensiones de los arcos resultantes, que pudieran fabricarse fácilmente y se priorizara por un montaje manual. Pero los antecedentes descritos y aplicaciones analizadas exponen un mínimo de proyectos de gran envergadura, que ponen en evidencia la dificultad de su implementación con mayores escalas.

- Siendo esta premisa, la razón para plantear la posibilidad de implementar la metodología propuesta, proyectando domos desplegables con mayores luces a cubrir, que contaran con la tecnología necesaria y mecanismos idóneos para ejecutar los procesos de despliegue y pliegue de la estructura a través de sistemas motorizados.

- Acerca del sistema de montaje, si no se garantiza que la conexión de los semiarcos con la agrupación de la tijeras de suelo, sea suficientemente rígida, el semiarco presentara una tendencia al vuelco lateral. Por seguridad es necesario que exista un operario por cada semiarco de la estructura que garantice el correcto izado, pero el ideal es requerir el mínimo de mano de obra y que la estructura sea estable en todas sus etapas de despliegue.

- Por último, acerca del posicionamiento de nodo principal en la cúspide del domo específico, se requiere de accesorios adicionales como escaleras portátiles para alcanzar la altura determinada por la etapa final de despliegue, debido a limitación de la tecnología utilizada en el presente estudio, esta opción es la más asequible. Pero dentro de las exploraciones desarrolladas, se proyecta la posibilidad de que los extremos de cada semiarco contenga una sección de nodo, que al juntarse en la cúspide, se accione algún tipo de dispositivo que forme la totalidad del nodo como una pieza única, reduciendo los tiempos de atornillado y fijación del nodo, una solución que requiere un alto grado mecánico y dispositivos de activación sistemáticos de alta tecnología, pero es viable para su proyección.

De esta manera, a partir de la carencias e inconformidades y temas por desarrollar en este estudio, surgen las principales líneas de investigación a desarrollar a futuro.

11.2 Futuras líneas de investigación

El desarrollo del presente estudio, contribuye a incentivar la exploración de nuevas líneas de investigación enfocadas en cuatro campos fundamentales: Conexiones para estructuras desplegadas, análisis de las posiciones intermedias de despliegue, exploración de nuevas espacialidades con el método propuesto y desarrollo de metodologías académicas para dar conocimiento a este tipo de estructuras y promover su aplicabilidad.

- Conexiones para estructuras despegables

Gracias al tipo de estructuras desarrolladas en esta investigación, basadas en la formulación de arcos planos desplegados que limitan y configuran el espacio arquitectónico. Se promueve a través de las espacialidades proyectadas, la exploración técnica de conexiones del tipo nodo principal, implementando una tecnología más avanzada con mejores métodos de fabricación industrial (corte láser, mecanizados, CNC, etc.) que permitan optimizar el diseño y la conexión entre componentes.

Se proyecta como soluciones a adaptar al sistema de semiarcos desplegados en próximas aplicaciones a desarrollar, el sistema de Triodetic, así como el sistema de palanca y articulación de barras al nodo basado en los mecanismos de armado de andamios.

- Análisis de las posiciones intermedias de despliegue.

Para garantizar la seguridad estructural de los domos desplegados, no solo en su estado final de despliegue, se considera necesario realizar a futuro los estudios y análisis del comportamiento de la estructura en tres dimensiones en las etapas intermedias de despliegue con la aplicaciones de los materiales más comunes para la materialización de este tipo de estructuras, con el objetivo de conocer las debilidades en las etapas más críticas y tomar las precauciones estructurales necesarias que garanticen la seguridad del domo durante los procesos de montaje.

Siguiendo como guía las recomendaciones dadas por la normativa EN 13782 [20] para estructuras temporales.

- Exploración de nuevas espacialidades

A través del método geométrico propuesto, se puede extrapolar sus posibilidades en la búsqueda de la forma ampliando el rango de variables geométricas dentro de la tabla interactiva, proporcionando al usuario nuevas alternativas de configuraciones espaciales diferentes a los domos (figura 11.2).

Así como proyectar, la aplicación de los domos desplegados a una escala mayor y con mecanismos apropiados, con el fin que sean alternativas comerciales para la realización de eventos, conciertos o respuesta de infraestructura temporal para situaciones de emergencia que requieran de mayor envergadura .

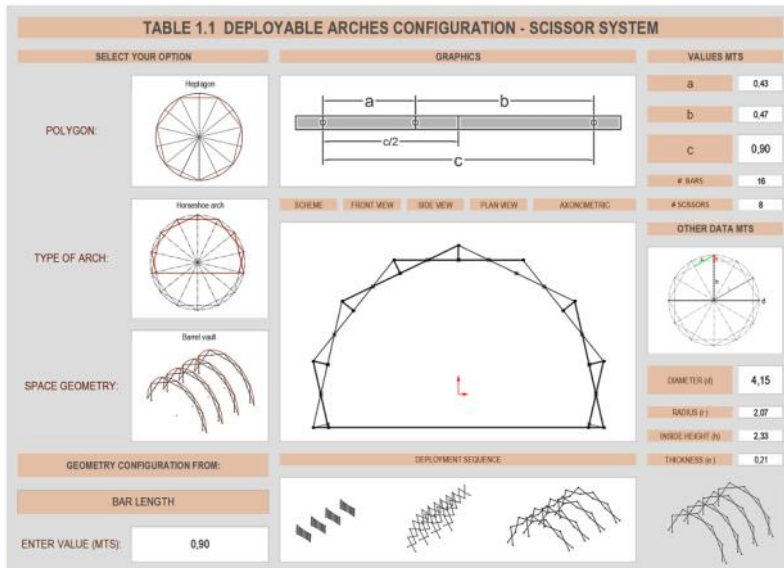


Figura 11.2 Aplicación del método geométrico a partir de polígonos regulares para la configuración de arcos desplegables. Sistema tipo tijera. Configuración de una superficie bóveda de cañón. Pabellón Xué [86]

Fuente: Elaboración del autor

Desarrollo de metodologías académicas

Se propone crear una plataforma virtual interactiva, como una herramienta académica que recopile toda la información gráfica generada en esta investigación, que permita difundir el conocimiento de este tipo de estructuras aportando los conceptos principales para su configuración, agrupaciones y posibilidades de superficies a desarrollar (figura 11.3). La tablas interactivas resultantes pretenden ser mejoradas en un formato de programación gráfica, que sea accesible para estudiantes, diseñadores e investigadores.

Esta iniciativa, es el primer paso para para llevar a cabo un objetivo a futuro, que consiste en la creación de una base académica titulada “*Creating Shells*” como una red de conocimiento en tensoestructuras, geodésicas, estructuras laminares, despleables, tensegrity, recíprocas y plegaduras.

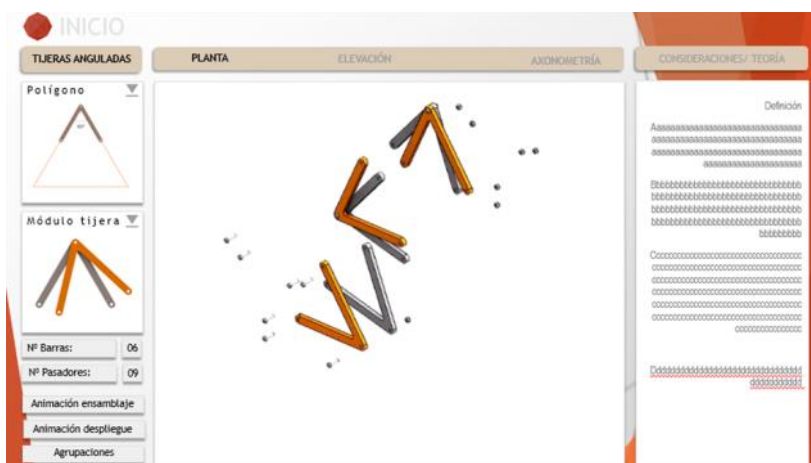
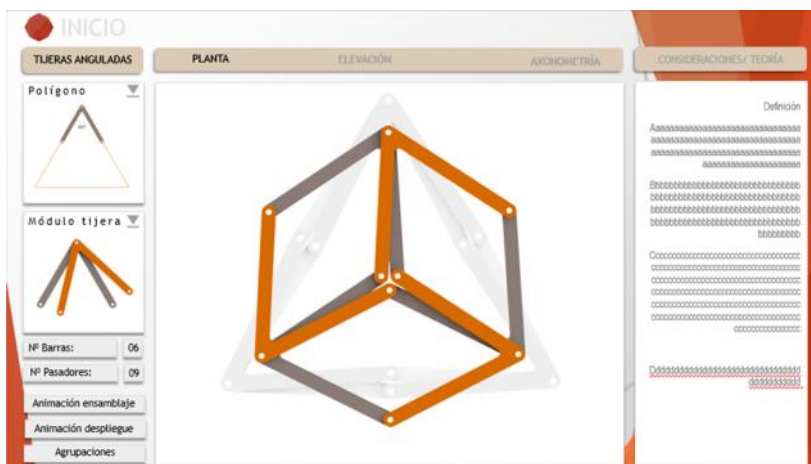


Figura 11.3 Plataforma virtual. *Creating Shells* (en desarrollo). Sección de Estructuras desplegables. Fuente: Elaboración del autor

11.3 Conclusions

FIRST PART. Contextualization

Chapter 2. State of the art

- In accordance with the theoretical proposals and existing applications study, about deployable structures development, the basic concepts for an adequate approach to this type of structures are established: simplicity, lightness, modulation and use of the minimum necessary resources, to obtain, depending building use, the space transformation, increasing or reducing the volume..

- The study framework analyzed, allows to determine that deployable structure with to compatible enclosures relation , must be in accordance with the previous concepts. The integration of both components must be harmonious, proportional and functional, proposing an adequate design of the connections, anchors and accessories necessary to ensure the correct unfolding and folding process of the structure, avoid incompatibilities and ensure the safety of the whole at all times.

Chapter 3. Scissor-type system and deployment types

- The research emphasis, focuses on deployable structures based on the scissor-type system application and the deployable surfaces configuration through the grouping of scissor modules. The study and experimentation of this subject allows to conclude the main ideal geometric conditions for the deployment processes and to obtain a spatial configurations variety with the aim of reducing the incompatibility between elements.

- In this way, the study coincides with the different authors that precede this research. The main requirement to obtain a correct unfolding with more than two scissors modules grouped together, is to fulfill the folding condition defined in the equation: $a + b = c + d$, related to the bar segments of a scissor module, articulated with an adjacent scissor (Figure 11.1).

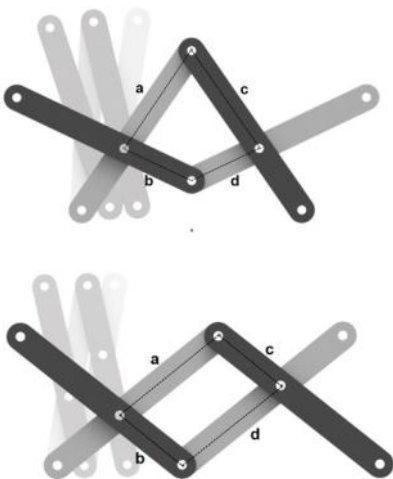


Figura 11.1 Condición de plegado necesaria para la correcto pliegue y despliegue de la agrupación de tijeras rectas
Fuente: Elaboración del autor

- Based on this condition, the research provides to the reader descriptive tables of easy interpretation, which provide through geometric schemes, the configuration and compression of this type of structures to increase their applicability and research . In this way, four variables are defined to project a folding surface, with bars of the same length implementation:

Surface type (flat, simple curvature, synclastic, anticlastic)

Module type (quadrangular, triangular, simple)

Linkage between scissor bars and scissors modules (central joint or eccentric joint) in the directions axis (x) or (y).

- The descriptive tables production, accompanied by the digital parametric models creation and the physical models elaboration at scale, allow visualizing the constructive viability of the explored surfaces. It is so, the geometric exploration in the configuration of surfaces determines the presence of various incompatibilities during the unfolding processes, mainly in the double curvature surfaces development, made up of triangular and quadrangular scissors modules.

- This incompatibility condition is generated because the relationship between the double curvature surface guidelines, made up of flat scissors groupings, restricts the natural movement that describes this groupings type in the intermediate deployment stages: a trajectory with a variable radius curvature, where the curvature center is shifted in each deployment position.

- At the digital and physical model level, a semi-linear deployment is basically observed in the first and intermediate positions, generating an scissors group expansion outside the diameter stipulated by the final geometry and later in the final deployment position, it is presented a unexpected movement where the scissors group is positioned to obtain the desired curvature.

- This behavior, previously analyzed by various referent authors, requires the technical strategies implementation to avoid the non-unfolding of the structure, due to the interference between elements, possible bars break or structural collapse.

SECOND PART. Experimentation

Chapter 4. Existing methods for configuring arches and deployable surfaces

- The reference methods analyzed are characterized by having a previously dimensioned geometric base, based on quadrangular or triangular flat networks, projected to curvature guidelines or developed from concentric ellipses.
- These geometric methods require meticulous rigor and a time-consuming process that requires millimeter control for the center, focus and bars location, to correctly match the folding condition and configure scissors modules that fold and unfold without present incompatibilities.
- It is concluded that the most practical geometric methods to developed a groupings scissors modules that describe a deployment with curvature, are based on the polyhedral geometry and circles with equidistant radii that allow the scissor modules generation with a minimum of incompatibilities.

Chapter 5. Regular polygons method to configure deployable arches

- To obtain double curvature surfaces with the minimum of incompatibilities, the research proposes the flat arch made up of simple scissors, as the principal structural module, generating exploration of new deployable surface alternatives, where the surface is defined by limiting arcs and not by multiple three-dimensional scissors modules.
- In accordance with the proposed objectives, the dome geometry is established, as a study surface for the development and application of deployable flat arches defined as meridional axes, projected for temporary medium-scale architectural uses (pavilions, stands, small markets and stages).
- Moreover, in search of optimizing the assembly and disassembly processes, this study rethinks the traditional implementation processes of this structures type, proposing a deployment from the structure base: semi arches that are deployed from the floor and join in the cusp, determining the final position and the position that guarantees the total structure stability.

- From the definition of flat arches, formed by grouping of straight scissors modules and with the aim of defining the geometric determinants for the search for the shape, the research develops a geometric method using the regular star polygons configuration. The implemented methodology generates the trigonometric equations necessary to facilitate the form finding and the deployable arch dimensioning.
- The results of the geometric method proposed for the configuration of deployable arches, are determined by three variables defined:

The bar length or diameter required

Regular polygon type

Arch type

These variables allow to find the exact the articulation location between bars on their longitudinal axis, the scissors necessary number and the deployed arch characteristics.

- The study and application of the proposed methodology has identified the structurally categories viable in regular polygons, which define the degree of opening of the scissors, to obtain an adequate load capacity and proportion between the span to be covered and the arch thickness.
- The importance of complying the factor $k = e / r$ (relation between arch thickness and radius) is determined, historically defined by studies and tests that precede this investigation [44] and that delimits the geometric methodology application, to the exclusive use of the pentagon, hexagon and heptagon, these geometries being those that allow obtaining an the k factor appropriate for the proposed deployable arches.
- For the results expression and the methodology applicability, the study develops Excel interactive calculation tables, offering the reader the possibility of configuring various arches possibilities, based on the three fundamental variables that reveal the values necessary to define the geometric characteristics to deployable arch.
- The methodology validation is carried out through a specific the deployable stage application, where the initial geometry is selected: the heptagon, the horseshoe arch and an occupation diameter of 5.20 meters. The deployable arch resulting geometry allows incorporating the concept of simultaneous deployment between the horizontal and vertical plane in the dome spatiality, implementing the same geometric base.

- The study proposes a deployment process that correlates the floor scissors grouping, with the deployable semi-arches, in this manner when deploying the floor scissors grouping, these generate the force to deployment the vertical semi-arches, which that will join the top of the dome, determining the final deployment position and defining the dome surface proposed.
- Once the surface is configured, the study identifies the principal structural components for their analysis and constructive viability: deployable semi-arches, principal node, deployable platform and cover with deployable membranes.

Chapter 6. Deployable arches

- The semi arches analysis is carried out with the WinEva software (v. 8) [136], the semi arches are represented within the program platform as linear elements called bars. The research defines three semi-arch deployment positions, defined as intermediate position, final position and ideal position.
- Cardboard tubes with a 50 mm diameter and 5 mm thickness are determined as the main material of the structure and the data is correctly entered into the software, together with the design determinants and the relationship between bars, to calculate in two dimensions the elastic deformations and the stresses produced in each case.
- The results obtained in each of the deployment positions have shown that the greatest deformations occur in the final deployment position, in this manner the research proposes to determine a deployment limit previous to this position, called the ideal deployment position, whose semi arches deformation, coincide with the geometry established by the proposed geometric method.
- ***The search for the ideal deployment position is specific for each case of deployable dome, since the resulting displacements will depend on the structural and constructive semi-arch characteristics to be analyzed, the geometry selected , the scissors modules number incorporated, bars number, section and length , and the material selection to be used, which determines the physical characteristics to be entered in the software.***

- The search for the ideal deployment position is specific for each case of deployable dome, since the resulting displacements will depend on the structural and constructive semi-arch characteristics to be analyzed, the geometry selected, the scissors modules number incorporated, bars number, section and length, and the material selection to be used, which determines the physical characteristics to be entered in the software.
- For the specific case analyzed, the deployable semi arches configured from four modules of scissors with cardboard tubes, the search for the ideal deployment position, defined through the weighting method, throws the next result: the distance k (arch thickness), It should be equal to $k + 4.25$ cm. In this manner, it is envisaged in practice during the prototype construction, to take into account this opening measure to guarantee the correct structure assembly process.

Chapter 7. Principal node

- The research continues with the study and exploration the principal node referents configurations, defined as the fundamental piece located at the dome cusp, where the deployed semi-arches upper ends are articulated. It is concluded that the principal node must guarantee that structure, once it is in the final deployment position, is positioned in a equilibrium state, obtaining the necessary stability and safety for its use, implementing safe anchoring methods, easy to execute that allow to optimize the structure assembly and disassembly times.
- The principal node study and development is obtained thanks to the incorporation of 3D printing technology in the research, which allows the manufacture of different node alternative prototypes. As a result, experimentation through the scale models manufacture allows to visualize the structural and constructive viability of each proposed node, selecting the best option compatible with the structure characteristics and anchoring system.
- The node proposal is based on two manufacturing techniques, the first consists of designing the node for the case study, incorporating 3D printing, after several explorations, the result is based on two node parts (upper and lower) with a tube-type central axis, which incorporates the radiated platens with the necessary holes to receive each semi arches with the platen type anchoring.

- The second manufacturing technique, implemented in the prototypes built, consists of materializing the node from folded and tongue and groove planes, using as a material, composite panels formed by two aluminum cover sheets and a nucleus filled with mineral aggregate (Alucobond®). The result is a very light piece, made up of planes linked with the tongue and groove method, where each plane takes the position to receive the anchoring corresponding on the semi arches. Both systems incorporate the traditional mechanism of screws, nuts and washers between platens to obtain the articulation between components.

Chapter 8. Folding platform

- As the next component analyzed in the research, the study proposes the folding platform incorporation, made up of a floor scissors grouping and origami-type panel folding systems to form a folding stage. The development and implementation relevance lies in that you get a simultaneous deployment is obtained between the floor platform and the deployable semi arches, using the same scissors configurations, defined by the geometric method proposed, thus obtaining a modularity in the entire structural set with bars of the same length.

- The analysis result of the various simulations about the platform deployment process and the structural assembly, like in digital models and in physical models, allows visualizing the correct correlation during deployment between the two components (deployable semi arches and floor scissors). Also, the characteristic expansion generated by this scissors group type is observed, defined as a deployment of variable curvature.

- It is determined that the structural solution between components (deployable semi-arches and floor scissors) is constructively viable, if there is enough space for the structure assembly and no panels are included to configure a folding platform since incompatibilities can be generated .

- To obtain a dome that incorporates the deployable platform and adapts to simultaneous deployment, it is necessary to include a mechanism that allows the correct deployment and at the same time supports the folding platform. The research proposes the beam-rail support system, a structural component composed of three fundamental parts, rail support, mobile support and beam.

- To obtain a dome that incorporates the deployable platform and adapts to simultaneous deployment, it is necessary to include a mechanism that allows the correct deployment and at the same time supports the folding platform. The research proposes the beam-rail support system, a structural component composed of three fundamental parts: rail support, mobile support and beam.

- The platform panels geometry corresponds to a design of triangular patterns, which includes the implementation of suitable mechanisms such as flexible hinges, extendable bars and cup-type hinges allow constructive feasibility and the appropriate folding process between panels, obtaining a total structure folding.

-As a result of the folding platform simulations observations, to restrict the unfolding process to a constant curvature trajectory , it is necessary to implement technical solutions on floor scissors grouping. It is opted for the central disarticulation in the scissor modules, which as a result generates a the semi-arches partial unfolding that will have to be completed manually to position the semi arches in their final deployment position.

Chapter 9. Deployable cover

- The next component implemented corresponds to the deployable cover, which is projected as tensile structures in modular sections, these fulfill the function of closure for the projected deployable domes, in addition to collaborating in the structure rigidity in its final deployment position. The membrane is a light and flexible material that allows it to adapt and combine with the structure process unfolding and folding.

- The research establishes three cover possibilities determined by the positioning of the membrane with respect to the structure and the semi arches, these are defined in:

Inside cover

Outer cover

Sectioned cover

Each of them analyzed with the WinTess software [187], generate as a result the form finding process, the patterns configuration and structural calculation with a non-linear analysis.

- The comparative results of the tensile structure analysis in two possible location environments, in a closed space and outdoor, allows to conclude that the three possibilities describe a successful equilibrium state against wind loads and own weight, but It is the sectioned cover that presents the best behavior, with the least displacements and corresponds to the lightest option. This option also includes advantages such as the independent modular sections manufacture and simple assembly and disassembly systems that help optimize the efficiency of all processes.

- The correct relationship between the structure unfolding process with the deployable cover incorporation, to obtain a simultaneous unfolding between both components, implies developing a technical solution in the membrane sections. The proposal consists of a loading belt central the zipper type that divides each membrane section into two parts, to facilitate the semi arches folding and unfolding without interference, avoiding unnecessary tension forces or thrusts that can cause the structure collapse during the intermediates deployment positions.

Once the dome configuration is obtained, the zipper is closed and continuity between membrane patterns is established. The cover becomes a tensioned surface that provides stability and rigidity to the structure with a minimum of wrinkles.

- The anchoring systems designed to the deployable membrane, based on carabiners mechanisms , rings, fixing plates and eyelets on the textile, show that these are ideal solutions, easily manufactured and available on the industrial market, capable of withstanding displacement and rotations that may appear during the structure deployment and membrane installation.

THIRD PART: Results and conclusions

Chapter 10. Interactive table. Prototype construction

- The knowledge obtained in this research is synthesized in the interactive table elaboration based on the proposed geometric method, which allows the user to interact with the established geometric variables, to generate a form finding process of different spatialities form deployable domes.
- The variables that the user must define to proceed to spatially configure a specific deployable dome are identified:

Geometric variables:

Regular polygon type

Arch elevation type

Arch in plan type

Enclosure components:

Include or not floor platform

Deployable cover type: Do not include cover, interior, exterior, sectioned

Dimension variables:

Bar length or total diameter.

-The interactive table is divided into three columns, the first column contains the variables to enter or select. The results obtained are represented in the following two columns. The second column exposes all the result graphical of the selected spatial configuration and the deployable process representation. And the third column includes all the numerical information resulting from the equations, to size the dome to be configured, establishing the bar length or required diameter, indicating the articulations points on the bar and establishing the dimensions resulting from the free height and arrow according to selected arch and polygon.

- The geometric method application, the interactive calculation table use, the structural and constructive verification and deployable domes viability projected for this research, is carried out through demonstration with the three prototypes construction, represented in temporary architectural spaces of small and medium scale, that demonstrate the method effectiveness and allow to be viewed the structure performance on a real scale, during the different deployment positions, assembly, use and structure disassembly.

- **The deployable stage application**, projected as a temporary structure for a specific event, responded adequately to the stipulated program of four assembly and disassembly processes. The deployable semi-arches behavior, configured with cardboard tubes, was successful, it constituted a balanced dome, stable and easy to manipulate by hand due to its light weight.

- The application particularity is that it does not incorporate a simultaneous deployment between the semi arches and the folding platform. Even so, the platform deployable process and next the deployable process the scissors grouping that configure each semi arch could be executed and analyzed on a real scale.

- In practice it is observed that in the folded state, each semi-arch becomes a compact, modular, lightweight package that can be transported manually. In the intermediate positions, the deployable process is controlled manually, preventing it from tipping over and with the appropriate workforce safety to avoid risk of trapping hand or finger , a visual control is carried out to reach the ideal deployable position and finally proceed until the principal node connection to get the dome configured.

- The integration with the folding platform configures a functional floor space for the stage and it is successful. Although there were no incompatibilities during the platform unfolding and folding , cracks were generated in the wood chipboard panel at the points of articulation with the hinges. It is proposed as future technical solutions, the change of material for the panels, reinforcing the perimeter of each panel and including flexible hinges.

- Due to the platform structural components, the deployable and transport process requires more workforce, but the entire assembly can be transported in a pickup truck.
 - The lycra incorporation, as a covering material, generates a versatile and easy-to-handle closure to making the necessary eyelets and seams manually. A pre-assembly was carried out with the semi arches folded and both components were raised. The fabric is stretched and fully fixed once the dome is configured.
 - The deployable stage has demonstrated the integration of sustainable concepts in its design, all the structural components are second-use and once the structure was disassembled, beams, panels, tubes and fittings were reused in new projects.
 - It is verified that the articulations positioning on the scissor bars and the length of the bar, generated from the proposed geometric method, creates the spatiality on a real scale in relation to the form finding projected.
- **The Stand Egg** is the prototype made to test the constructive viability about the simultaneous deployable process between the deployable semi arches and the floor scissors grouping. For this prototype, aluminum tubular bars of rectangular section are used as the dome principal material.
- The geometric method application demonstrates the optimization in the manufacturing and assembly processes for the projection of deployable domes, since modular components of the same length are generated that facilitate the structure assembly.
 - The Stan Egg, does not incorporate the folding platform and allows to visualize the deployment process that describes straight scissors grouping with eccentric articulation. The base structure, in its intermediate deployment positions, presents a great expansion, approximately twice the diameter established as the final configuration. In this way, it is essential to provide the necessary area for the structure folding and unfolding process getting a safe mounting.

- The aluminum dome spatiality incorporates a semi arch for each joint of two scissors modules in the structural base, given the selected geometry and the arch type implemented, nine deployable semi arches are generated, which originates a difficult deployment process, which requires a person for each semi arch, to control it manually and avoid semi arches lateral overturning.
- This situation rethinks in the research, reducing the semi arches quantity necessary to configure a deployable dome, likewise encourages to investigate in improving the technical connection solutions between the deployable semi-arches and the floor scissors grouping and additionally the possibility of incorporating elements transverse stiffening between semi arches, adaptable to the unfolding process.
- Secondly, and complying with the research objective, the folding and dismantling structural process is optimized, obtaining a very fast and practical process that is carried out in a few minutes, taking advantage the own weight semi arches and the folding ease, achieving a compact package that does not affect the components structural characteristics for a next installation.
- The principal node development, manufactured with aluminum planes and tongue and groove system, generates a easy solution that is easy to manufacture and light, which is adapted to receive the connection with the semi arches at different angles. The result is structurally effective and matches the stand architectural language.
- It is concluded that the aluminum use, the bar section proposed , together with the established geometry and the stand spatial proportion, generates a structural set in equilibrium capable of supporting a person's weight, with greater rigidity than prototype previous case.
- The interactive table for the stand prototype, provides the complexity and the spatiality visualization very close to the constructive reality, demonstrating its effectiveness as a tool for the deployable domes dimensioning and form finding.

- The bamboo dome is the prototype made at 1: 2 scale to visualize the unfolding process and the structure behavior with bamboo bars in the scissors groupings and clamp connections exploration that adapt to the bamboo bars, manufactured through 3D printing technology.
- The results after the exploration, connections design and manufacture for the deployable structures with bars straight scissor type and bamboo bars implementation (Tonkin species: *Pseudosasa Amabilis* - Ø 15 mm - 3 to 4 mm wall thickness). As the main material for the deployable semi arches and floor scissors grouping configuration, it presents two viable alternatives:
 - The clamp-tube connection type, is a solution that receives a section of bar at each end, to configure in a linear way, a standard bar of each scissor module. The connection advantage lies in avoiding making the central articulation hole, on the bamboo bar for the screw pin pass through, since the fewer holes made, the possibility the material cracks and breakage is reduced.
 - The clamp-tube connection type disadvantage, is presented at the joint point of the bar that is inserted inside the connection, it is necessary to use specific glues to obtain a strong adhesion between components, which limits the possibility of replacing only the bamboo bars in case breakage. It also implies a greater number of bars cut, increasing the volume of waste generated during manufacturing.
 - The second projected clamp-type connection is a more favorable alternative for your actual application. It consists of two longitudinal sections that receive the bamboo bar at the three articulation points between scissor modules (extreme and central articulations). Its fixation is achieved thanks to the screw-type, washers and nuts mechanism that connects the two connection sections, generating the necessary pressure on the bamboo bar, so the connection is fixed.
 - The bamboo prototype construction experience, demonstrates the importance of the rigorous material selection and cut, looking for the most uniform bars that have the least possible conicity, an added advantage that occurs in the selected bamboo species.

- Due to the deployable semi arch structural configuration, which includes three bamboo bars for each scissor module, the connection system between parallel bars incorporates a tongue and groove system, which as a result generates a mechanism that facilitates the structure folding and unfolding processes, guaranteeing the correct relationship between components and minimizing friction and disarticulation between them.
- The deployable bamboo dome construction incorporates the folding platform structure, which determines the deployment type to be developed corresponding to a constant curvature.
- In this way, the model built for this case shows a partial simultaneous deployment, the semi-arches are not positioned in their final deployment position, because the correlation between the semi arches scissors and the floor scissors has been eliminated, suppressing the central joint in non-consecutive floor scissor modules.
- This technical solution allows the folding platform radial movement, but counteracts the vertical deployment, being necessary to manually unfold the semi arches missing section to configure the dome geometry and proceed to connect the semi arches ends with the principal node.
- Once again, the interactive table application demonstrates the versatility when configuring the possible domes, being able to apply the most suitable material according to the project requirements. The result for this case, describes complete dome geometry that reduces the number of semi-arches to be incorporated and validates the cover and the deployable platform integration in a set deployment, although partially simultaneous.
- The use of different programs for parametric modeling and structure calculations were essential to understand the behavior of this structures type, allowing the methodology to form finding process to be taken to prototypes real manufacturing, these met a successful state of equilibrium and were constructively suitable..

- Likewise, the physical models elaboration in all investigation stages, were of vital importance to understand the deployment processes, visualize the incompatibilities between components, explore new spatial alternatives and project the fastening and articulation details adaptable to the structures deployable characteristics and to conceive the structure manufacturing , assembly and disassembly optimization. (See Annex 3).
- The present study was carried out to propose a design method for the deployable domes configuration and demonstrating the technical viability to obtain a simultaneous deployment between structure and enclosures compatible with the geometry resulting after the form finding process.
- The result is represented in the three prototypes built, which thanks to the application and exploration with interactive table, generates a process to configure dimensioned spatialities through the scissor-system grouping , faster, simpler and more intuitive.
- The three deployable domes built , as the proposed geometric method demonstration, were adapted to the use of different materials and described a successful behavior during the deployment positions and architectural use , allowing to conclude, the main characteristics and advantages:
 - **Modularity:** The structural system is conceived as the correlated modules grouping , components subgroups where the designer has the possibility of using various structural units possibilities and adaptable covers to the use needs in each project, also allowing the ease replacement of interchangeable modular parts and components in case of breakdown or change of use.
 - **Homogeneity:** The geometric method proposed in this research for the deployable domes configuration from the scissor-type system with straight bars, mostly generates elements with the same length, facilitating the manufacturing and assembly processes between components and reducing waste volumes generated.
 - **Simplicity:** The deployable domes have four structural elements: the semi arches, the principal node, the deployable platform and the deployable fabric cover. For transport, the whole assembly can be disassembled in parts or folded into a compact package.

The unfolding and folding structure process is characterized by its constructive simplicity, it does not require specialized labor or special machinery, the entire process can be carried out manually with traditional tools (wrench, hammer, screwdriver and ladder) specified in the assembly instructions.

- **Lightweight construction:** The system does not involve a large number of complex connectors and numerous bars to define the dome spatiality, it is chosen to reduce structure weight, defining as a structure only the dome meridian lines, through deployable flat arches, integrated with deployable membranes alternatives as optional covers to cover the generated enclosure and deployable platforms to configure a stage.

- **Structural stability:** From the first design stages, the deployable domes are projected with the constructive and structural concept of traditional arches and domes, being historically known for their efficient behavior against the loads to which they are subjected.

Based on the traditional processes in the arches construction, the semi arches projected in this research are configured through a lifting process from the base, once they reach their final deployment position and connect with the principal node, the result are innovative deployable domes that achieve the stability and structural rigidity necessary for their use, responding adequately to the wind additional loads and their own weight.

- **Foldability:** It is the fundamental characteristic, which allows to transform the structure from a compact package to an architectural spatiality for temporary use, an advantage that optimizing construction times, when quick assembly and disassembly buildings are required to be installed.

Portability: Advantages mentioned above, such as modularity and foldability, allow the deployable domes to be transportable as a whole or by modular components, an advantage that facilitates the structure storage in reduced places, or to make changes of location through traditional cargo vehicles.

- Sustainable: The scissor system bars are the fundamental elements for the deployable domes configuration and can be defined with natural materials such as cardboard, wood and bamboo that are low energy consumption options, which are perfectly adapted to the structural characteristics domes and which at the end of their useful life become organic waste. In addition, the elements simplicity allows the option of reusing materials, discarded from other projects or buildings.

Finally, the deployable domes are projected as temporary structures and are made in the factory, this type of structures do not generate a negative impact on their environment, because the assembly and disassembly processes do not produce any construction site waste.

- However, in the research there are nonconformities resulting after constructive validation, such as the scale projected for this structures type. The research proposes small and medium-scale spaces (market stalls, stands, pavilions or stages with areas between 20 m² and 200 m²), a coherent proportion for the arches dimensions resulting , which could be easily manufactured and by a manual assembly. But the antecedents described and the analyzed applications expose a minimum of large-scale projects, which highlight the difficulty of their implementation.

- This premise being the reason for raising the possibility of implementing the proposed methodology, projecting deployable domes with larger span to be covered, which will have the necessary technology and suitable mechanisms to execute the unfolding and folding structure processes through motorized systems.

- About the mounting system, if it is not guaranteed the semi-arches connection with the floor scissors grouping is sufficiently rigid, the semi arch will have a tendency to lateral overturn. For safety reasons, there must be an operator for each semi arch to guarantee correct lifting, but the ideal is to require a manpower minimum with the stable structure in all its deployment positions.

- Finally, about the principal node positioning on the specific dome cusp , additional accessories such as portable ladders are required to reach the height determined by the final deployment position, due to the limitation of the technology used in the present study, this option, it is the most affordable.

- Within the explorations developed, the possibility is projected that each semi arch ends have a node section, that when it is positioned on the cusp, some device type is activated that forms the node as a single piece, reducing the times screwing and fixing. This solution requires a high mechanical degree and systematic activation devices of high technology, but is viable for its projection.

In this way, from the shortcomings and nonconformities and issues to be developed in this study, exposes the research principal lines to be developed in the future

11.4 Future research lines

The study development contributes to encourage the new lines research exploration, focused on four fundamental topics: Deployable structures connections, deployment intermediate positions analysis, new spatialities exploration with the proposed geometric method and academic methodologies development to generate a knowledge network about this structures type and promote their applicability.

Deployable structures connections

Thanks structures developed in this research, based on the deployable flat arches formulation that limit and configure the architectural space. It is promoted through the projected spatialities, the node connections exploration, implementing a more advanced technology with better industrial manufacturing methods (laser cutting, machining, CNC, etc.) that allow optimizing the design and the connection between components.

It is projected as solutions to be adapted to the deployable semi-arches system in future applications to be developed, the Triodetic system, as well as the lever and bar articulation system to the node based on the scaffolding assembly mechanisms.

Deployment intermediate positions analysis

To guarantee the deployable domes structural safety, not only in their deployment final position, it is considered necessary in the future to carry out studies and behavior analysis in three dimensions in the deployment intermediate positions, using the most suitable materials and common for the deployable structures materialization, with the objective of knowing the weaknesses in the most critical positions and taking the necessary structural precautions that guarantee the dome security during the assembly processes. Following as a guide the recommendations given by the EN 13782 [20] norm for temporary structures.

New spatialities exploration

Through the geometric method proposed, its possibilities in the form finding can be extrapolated by expanding the geometric variables range within the interactive table, providing the user with new spatial configurations, other alternatives different to dome geometry (figure 11.2).

As well as projecting, the deployable domes application on a larger scale and with appropriate mechanisms, with the aim of generating commercial alternatives for holding events, concerts or temporary infrastructure response for emergency situations.

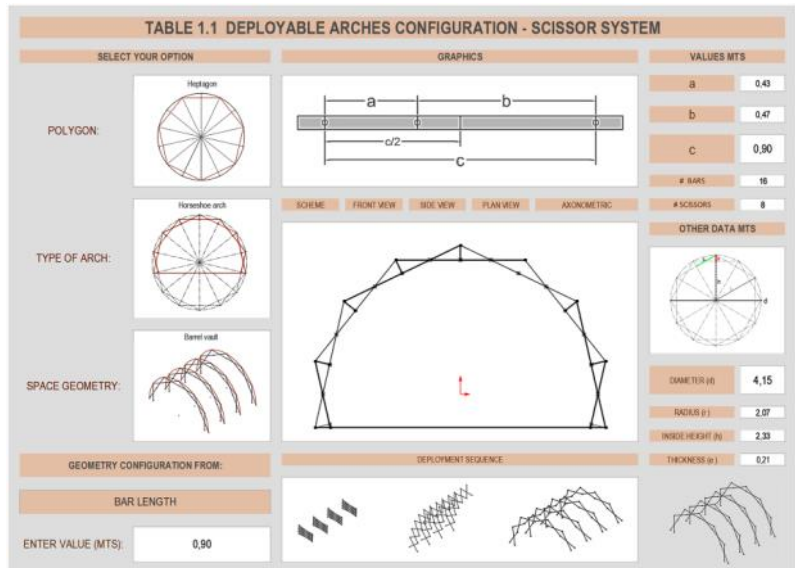


Figure 11.2 Geometric method application from regular polygons for the deployable arches configuration . Scissor type system. Barrel vault surface configuration. Xuê Pavilion Construction [86]
Source: Author's elaboration

Academic methodologies development

It is proposed to create an interactive virtual platform, as an academic tool that collects all the graphic information generated in this research, which allows the knowledge dissemination about deployable structures, providing the main concepts for their configuration, groupings and surfaces possibilities to be developed (figure 11.3). The resulting interactive tables are intended to be improved in a graphical programming format that is accessible to students, designers, and researchers.

This initiative is the first step to carry out a future objective, which consists in the academic base creation called "Creating Grid Shells" as a knowledge network about tensile, geodesic, laminar, tensegrity, reciprocal and deployable structures.

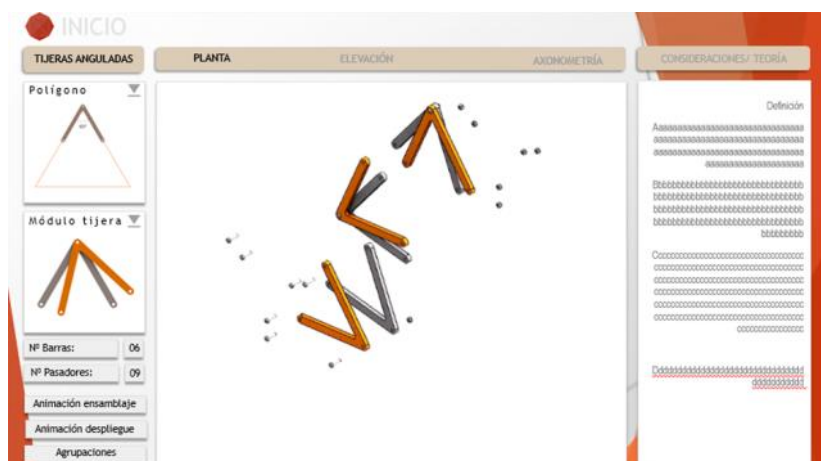
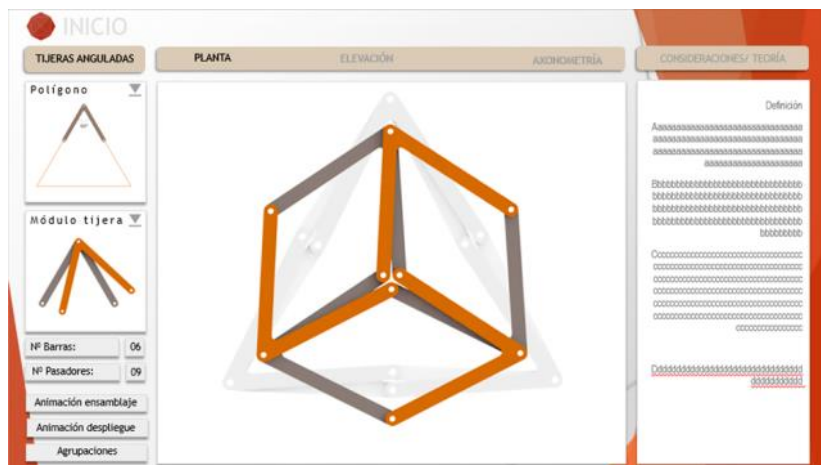


Figure 11.3 Virtual platform. *Creating Grid Shells* (in development). Deployable Structures section. Source: Author's elaboration

Bibliografía

Libros, tesis, artículos y patentes.

- [1] Alegria, L., Thrall, A., y De Temmerman, N. (2014). *Deployable scissor arch for transitional shelter*. *Automation in Construction* (43), 123–131.
- [2] Associació de Consultors d'Estructures. (2014). *Quaderns d'Estructures*. (Número 49). Barcelona. Recuperado de https://aceweb.cat/wp-content/uploads/quaderns/Quaderns_estructures_49.pdf . [Fecha de consulta 02 Nov 2016].
- [3] Babaei, M. & Sanaeia , E. (2009). *Geometric and Structural Design of Foldable Structures*. *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [4] Bain, I. (1981). *The Miura-Ori map*. Reino Unido. *British Origami Society*. Recuperado de <https://www.britishorigami.info/academic/mathematics/the-miura-ori-map/> [Fecha de consulta 04 Abr 2016].
- [5] Bank, L.C. Gerhardt, T.D. (2015). *Paperboard Tubes in Structural and Construction Engineering*. *Nonconventional and Vernacular Construction Materials-Characterisation. Properties and Applications Edition: 1. Chapter: 16*. Publisher: Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering: Number 58. Editors: K.A. Harries, B. Sharma. pp 16. [PDF]. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/298064463_Paperboard_tubes_in_structural_and_construction_engineering [Fecha de consulta 17 Feb 2017].
- [6] Begiristain, J. (2015). *XXX, Sistemas estructurales despleables para infraestructuras de intervención urbana autoconstruidas (tesis doctoral)*. Universidad del País Vasco, Bizkaia, España.
- [7] Block, P., DeJong, M., y Ochsendorf, J. (2006). *As hangs the flexible line: Equilibrium of masonry arches*. *Nexus Network Journal* 8 (2), pp. 13-24.
- [8] Bouten, S. (2015). *Transformable Structures and their Architectural Application*. (Tesis maestría). Universidad de Gent. Bélgica.

- [9] Brancarta, S., De Laeta, L., y De Temmerman, N. (2016). *Deployable textile hybrid structures: design and modelling of kinetic membrane-restrained bending-active structures*. Proceedings International Symposium on "Novel Structural Skins: Improving sustainability and efficiency through new structural textile materials and designs. Procedia Engineering 155, pp. 195 – 204.
- [10] Brian, F., y Marjike, M. (2009). *Arquitectura Textil. Guía europea de diseño de las estructuras superficiales tensada*. TensiNet. Madrid: Munilla-Lería.
- [11] Britt, A. & Lalvani, H. (2000). Symmetry as a Basis for Morphological Analysis and Generation of NASA-Type Cubic Deployables. Proceedings IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structures: Theory and Applications, volume (80 of the series Solid Mechanics and Its Applications), 45-54.
- [12] Broner, P. E. (1954). U.S. Patent No. 2,697,845 A. Detroit, Mich.
- [13] Candela, F., Pérez, E., Calatrava, S., Escrig, F (Ed.), y Pérez J. (1993). *Arquitectura Transformable. Textos de arquitectura*. Sevilla: Publicación de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla.
- [14] Chandra, S., Koronaki, A., Spiteri, R., Amin, R., Kowli, S y Weinstock, M. (2015). *Computing Curved-Folded Tessellations through Straight-Folding Approximation*. © Society for Modeling & Simulation International (SCS). . SimAUD. Alexandria, VA, USA.
- [15] Chilton, J. (2007). *Space grid structures*. Taylor & Francis.
- [16] Co-PI, V., Thün, G., y McGee, W. (2011-2013). Material system prototype (acoustics). Resonant Chamber. University of Michigan, Ann Arbor, MI: rvtr. Recuperado de <http://www.rvtr.com/projects/resonant-chamber> [Fecha de consulta 08 Mar 2018].
- [17] Dale, W. (1964). *Collapsible girder*. Patente n° US3152347 A.
- [18] Degen, G. (2014). Made for minds. Berlin. Emergency shelters should be temporary, but they need long-lasting engineering. Recuperado de <https://www.dw.com/en/emergency-shelters-should-be-temporary-but-they-need-long-lasting-engineering/a-17801662> [Fecha de consulta 21 May 2018].
- [19] De Temmerman, N. (2007). Design and analysis of deployable bar structures for mobile architectural applications (tesis doctoral). Vrije Universiteit Brussel.

- [20] UNE-EN 13782. (2007). Estructuras temporales: carpas: seguridad. Asociación Española de Normalización y Certificación. AENOR.
- [21] Demchenko, Y. (2011). *Sistemas de construcción de puentes arcos* (tesis maestría). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid, España.
- [22] Escrig, F., Pérez, J., y Sánchez, J. (1996). La Cubierta Desplegable de La Piscina San Pablo de Sevilla. *Hormigón y Acero. 1º Trimestre*, 85 – 114.
- [23] Escrig, F., Pérez, J., y Sánchez, J. (1996). Las cubiertas desplegadas de malla cuadrangular. Universidad de la Coruña, España.
- [24] Escrig, F., y Sánchez J. (2006). New designs and geometries of deployable scissor structures. Proceedings of the International Conference On Adaptable Building Structures. Eindhoven, The Netherlands.
- [25] Escrig, F. (Ed.) (2012). *Modular, ligero y transformable. Un paseo por la arquitectura ligera móvil*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- [26] Escrig, F., y Sánchez J. (eds,) (2013). New proposal for transformable architecture, engineering and design. In honor of Emilio Pérez Piñero. Proceedings of the First Conference Transformables. School of Architecture Seville, Spain
- [27] Fenci, GE., y Currie, N. (2017). Deployable structures classification: A review. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium.
- [28] Friedman, M., y Schäffner, W. (Eds.) (2016). *On Folding: Towards a New Field of Interdisciplinary* .
- [29] Fuller, R. Buckminster (1954). *Building construction*. Patente nº US2682235A
- [30] Gantes, C. (1991). *A design methodology for deployable structures* (tesis doctoral). Departamento de ingeniería Civil. MIT. Instituto de Tecnológico de Massachusetts, Cambridge, Estados Unidos.
- [31] Gantes, C., Konitopoulou, E. (2004). Geometric design of arbitrarily curved bi-stable deployable arches with discrete joint size. *International Journal of Solids and Structures* 41, 20, pg. 5517-5540.

- [32] García Ch, D., Llorens, L., y Poppinghaus, H. (2001). El pabellón de Venezuela en la EXPO 2000 de Hannover. *Informes de la Construcción* 53 (473), mayo/junio 2001, pp. 11-26.
- [33] Giselbrecht + Partners. [giselbrechtzt]. (2008, Junio 8). Dynamic facade "Kiefer technic showroom" [Archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=rAn4ldWjw2w>
- [34] Hammerschlag, R.H., Kommers, J.N., Visser, S., Bettonvil, F.C.M., Van Schie, A.G.M., Van Leverink, S.J., Sliepen, G., J'agers, A.P.L., Schmidt, W., y Volkmer, R. (2012). *Open-foldable domes with high-tension textile membranes –The GREGOR dome*. Delft University of Technology and Poly Nederland.
- [35] Hart, G. (2011) MOMATH, National Museum of Mathematics. Math Monday: Flexible Stick Structures. Recuperado de <https://momath.org/home/math-monday-flexible-stick-structures/> [Fecha de consulta 25 Jun 2018].
- [36] Hernández, C. (1999). Desarrollo de estructuras transformables: Estran 1. *Tecnología y Construcción, volumen (15-1)*, 7-36.
- [37] Hernández, C. (1987). Deployable structures (tesis maestría). MIT. Instituto de Tecnológico de Massachusetts, Cambridge, Estados Unidos.
- [38] Hernández, C., y Escrig, F. (1994). El pabellón de Venezuela en la EXPO'92. Una estructura desplegable en duraluminio. *Informes de la Construcción* 45 (429), pp. 61-73.
- [39] Hoberman, C. (2012). Company profile and selected works: 1990 - 2012. *Expanding Sphere*. Korea Aerospace Research Institute. Recuperado de <https://www.yumpu.com/en/document/read/14027322/download-portfolio-pdf-hoberman> [Fecha de consulta 29 Ago 2016].
- [40] Hoberman, C. (2002). *Loop assemblies having a central link*. Patente n° US20020112413 A1.
- [41] Hoberman Transformable design. (Sin fecha). *Statement of Qualifications*. Recuperado de <https://fdocuments.in/document/statement-of-qualifications-transformable-of-qualifications-4-hoberman-associates.html> [Fecha de consulta 03 Nov 2015].
- [42] Houtman, R., y Werkman, H. (2009). Capítulo V. Detalles y conexiones. *Arquitectura textil. Guía Europea de Diseño de las Estructuras Superficiales Tensadas*. TensiNet 2004, pp. 126.

- [43] Huerta Fernández, S. (2019). *El arco límite: breve historia de un problema estructural*. En: "Actas del Undécimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Soria 9-12 de octubre de 2019". Textos sobre Teoría e Historia de las Construcciones, 1 . Instituto Juan de Herrera, Diputación de Soria, Madrid, pp. 579-592. ISBN 978-84-9728-577-3. pp 580 y 590. Recuperado http://oa.upm.es/57649/1/Huerta_2019_arco%20%C3%ADmite_breve_historia.pdf [Fecha de consulta 06 Dic 2019].
- [44] Huerta Fernández, S. (2004). Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica. Textos sobre teoría e historia de las construcciones . Instituto Juan de Herrera, Madrid. ISBN 84 9728 129 2. pp. 95. Recuperado http://oa.upm.es/1136/1/Huerta_2004_Arcos_bovedas_y_cupulas.pdf [Fecha de consulta 12 Dic 2019].
- [45] Kawaguchi, M. (1994). Application of pantadome system to long-span roof structures, IABSE reports, Vol. 71, pp. 91–100.
- [46] Karanouha, A., y Kerberb, E. (2015). Innovations in dynamic architecture. The Al-Bahr Towers Design and delivery of complex facades. Journal of Facade Design and Engineering 3, 185–221. doi: 10.3233/FDE-150040
- [47] Kokawa, T. (1995), A Trial of Expandable Arch, in Spatial structures: heritage, present and future, Milan, pp. 501–510.
- [48] Kokawa, T. (1996), Scissors Arch with Zigzag-Cable Through Pulley-Joint, Proceedings of conceptual design of structure, Stuttgart Volume II, pp. 868-875.
- [49] Kokawa, T. (1997/08). Cable Scissors Arch--Marionettic Structure, Structural Morphology Towards the New Millennium, IASS International Colloquium, University of Nottingham, pp. 107-114.
- [50] Landau, E. (2015). Solar Power, Origami-Style. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, EU: NASA. Recuperado de <https://www.nasa.gov/jpl/news/origami-style-solar-power-20140814> [Fecha de consulta 05 Jun 2015].
- [51] Lee, D. S-H., Popovic Larsen, O., y Kim, S-D. (2013). *Study of the connection joint for scissor-type deployable structure for the possible application in emergency evacuation shelter*. Proceedings of the First Conference Transformables. In the Honor of Emilio Perez Piñero, 105-108.

[52] Lee, D. S-H., Popovic Larsen, O., y Kim, S-D. (2014). *Design of deployable structure for dome type emergency shelter*. Proceedings of the IASS-SLTE 2014 Symposium: shells, membranes and spatial structures: footprints. [223] Brasilia: IASS-SLTE.

[53] Liew, J.Y.R., Tran, T.C.(2005). *Novel Deployable Strut-tensioned Membrane Structures*. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures.

[54] Marino, F. (1960). *Portable loading canopy*. Patente n° US3064667 A.

[55] Mikulin, T. (1968). *Structural member*. Patente n° US3375624 A.

[56] Mollaert, M. (1996). Retractable membrane roofs. Transactions on the Built Environment vol 21. WIT Press.

[57] Mollaert, M., De Temmerman, N., De Laet, L., Guldentops, L., y Vanthienen, T. (2010). *Analysis of the deployment of a frame and a foldable membrane: the integrated model of a Contex-T demonstrator*. Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, Shanghai.

[58] Moore, A. (1964). *Preassembled structural framework*. Patente n° US3325958 A.

[59] Moreno, F. (2007). Arcos y Bóvedas. Barcelona, España: CEAC.

[60] NTP 634 (2013). *Plataformas elevadoras móviles de personal*. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales. España.

[61] Otto, F., Nerdinger., Winfried., y Technische Universität München. Architekturmuseum (2005). *Frei Otto: complete works: lightweight construction, natural design*. Birkhäuser, Basel ; Boston.

[62] Otto, F. (Ed.) 1972, IL 5 – Wandelbare Dächer / Convertible Roofs, Mitteilungen des Instituts für Leichte Flächentragwerke (IL), Universität Stuttgart.

[63] Origami. (s.f). En Wikipedia. Recuperado el 26 de Julio de 2016 de <https://es.wikipedia.org/wiki/Origami> [Fecha de consulta 22 Nov 2015].

- [64] Patiño, A. (2014). *Spatial grouping of symmetrycal straight scissors*. SMiA. Structural Morphology in Architecture. [Página web]. Recuperado de: <http://www.smia-experimental.com>
- [65] P. Valcárcel, J., y Escrig, F. (1989). Un primer planteamiento de estructuras despleables: El código I de Madrid de Leonardo Da Vinci. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla, pp. 14.
- [66] P. Valcárcel, J., Escrig, F., Martin, E., y Vázquez, J.A. (1995). *Visualization of expandable structures with self-folding roofing plates*. Transactions on Information and Communications Technologies vol 12, WIT Press.
- [67] Pérez, E. (1961). *Three dimensional reticular structure*. Patente n° US3185164 A.
- [68] Pérez, E. (1976). *System of articulated planes*. Patente n° US3975872 A
- [69] Ponce, A., y Sánchez, J. (2013). *Formal definition of the spatial deployable of rectangular module x-frames structures over frustoconical surfaces*. Proceedings of the First Conference Transformables .In the Honor of Emilio Perez Piñero, 59-64
- [70] P. Valcárcel, J., y Escrig, F. (1992). La Obra Arquitectónica de Emilio Pérez Piñero. Boletín Académico. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla. Recuperado de: http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/5237/ETSA_16-1.pdf?sequence=1 [Fecha de consulta 17 Ene 2017].
- [71] Puertas del Rio, L. (1989). *Estructuras espaciales desmontables y despleables. Estudio de la Obras del arquitecto Emilio Pérez Piñero* (tesis doctoral). Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, España.
- [72] Roovers, K., Alegria, L., y De Temmerman, N. (2013). *From Surface to Scissor Structure. Proceedings of the First Conference Transformables. In the Honor of Emilio Perez Piñero*, 275-280.
- [73] Sánchez, J. (1996). *Estructuras despleables de aspas para mallas poliédricas curvas* (Tesis doctoral). Universidad de Sevilla, España.
- [74] Sánchez-Cuenca, L., (1996). Geometric Models for Expandable Structures, in: Escrig, F., Brebbia, C.A., Second International Conference on Mobile and Rapidly Assembled Structures, Computational Mechanics Publications, Southampton, 93–102 .

[75] Sánchez Sánchez, N. (2011). Geometría de los arcos. Guía para la construcción y trazado de los arcos. Murcia, España: Región de Murcia. Consejería de Educación, Formación y Empleo.

[76] Sastre, R. (1996). *Expandable arches*. Second International Conference on Mobile and Rapidly Assembled Structures (MARAS 96). Seville, Spain. Recuperado de <https://tecnologia.upc.edu/profes/sastre/pubs/maras96/maras96.htm> [Fecha de consulta 14 Mar 2018].

[77] Sastre, R. (1995-2019). WinEva8 Contenido. Ayuda. WinEva | iEva | LinuxEva. Sección de Tecnología del Departamento de Construcciones Arquitectónicas. Barcelona, España. Recuperado de <https://wineva.upc.edu/esp/Ayuda.php> [Fecha de consulta 20 Nov 2018].

[78] Stevenson, CM. (2011). *Morphological principles: current kinetic architectural structures*. Proceedings of International Adaptive Architecture Conference. The Building Centre, London, pp. 1–12

[79] Tachi, T. (2011). *Rigid-Foldable Thick Origami*. Origami 5. Fifth International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education, 253 - 263.

[80] Tachi, T., Masubuchi, M., y Masaaki I. (2012). *Rigid Origami Structures with Vacuumatics: Geometric Considerations*. Proceedings of IASS Symposium on Folded Plates and Prismatic Structures. Seoul, Korea.

[81] Taddei, M., Zanon, E., y Laurenza, D. (2006). *Atlas ilustrado de las máquinas de Leonardo: secretos e invenciones en los Códices da Vinci*. Madrid. Susaeta Ediciones, S.A

[82] Tachi, T., Masubuchi, M., y Masaaki I. (2012). *Rigid Origami Structures with Vacuumatics: Geometric Considerations*. Proceedings of IASS Symposium on Folded Plates and Prismatic Structures. Seoul, Korea.

[83] Taddei, M., Zanon, E., y Laurenza, D. (2006). *Atlas ilustrado de las máquinas de Leonardo: secretos e invenciones en los Códices da Vinci*. Madrid. Susaeta Ediciones, S.A

[84] Taylor., J, y You., Z. (2007). *Innovative Design for a Rapidly Deployable Shelter. Draft report*. Department of Engineering Science, University of Oxford.

[85] Torres N., Cortes-Páez E., Sastre R., Gimferrer., Intrieri F., y González I. (2019). *Deployable Bamboo Dome*. Proceedings of IASS Symposium: Form and Force Expo Pavillions. Barcelona.

[85] Torres N., Sastre R., y Gimferrer (2018). *Domos desplegadas : Método geométrico a partir de polígonos regulares*. A: 1a Jornada de Doctorado del Programa de Tecnología de la Arquitectura, de la Edificación y del Urbanismo (TAEU). "Jornada de Doctorado del programa de Tecnología de la arquitectura, de la Edificación y del Urbanismo: Libro de Actas 2018". Barcelona: Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona, p. 16-20. Recuperado de <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/127785> [Fecha de consulta 03 Oct 2019].

[86] Torres, N., De Matos, H., Sastre, R., y Gimferrer, X. (2018). Xuê. Dining hall pavilion. Deployable flat arches as from the heptagon geometry. *Proceedings of the IASS Symposium 2018. Creativity in Structural Design*. MIT, Boston, USA. Recuperado https://www.researchgate.net/publication/331330002_Xue_Dining_hall_pavilion_Deployable_flat_arches_as_from_the_heptagon_geometry [Fecha de consulta 12 Feb 2019].

[87] Torres, N y De Matos, H. (2018). Cuadernos de Arquitectura e Urbanismo. *Estructuras Desplegable: Sistema tipo tijera*. v. 24 n. 35. Pontificia Universidade Católica de Minas Gerais. Instituto de Ciências Sociais. Departamento de Arquitetura e Urbanismo - MG. Brasil DOI: <https://doi.org/10.5752/P.2316-1752.2017v24n35p16>. Recuperado de <http://periodicos.pucminas.br/index.php/Arquiteturaeurbanismo/article/view/P.2316-1752.2017v24n35p16> [Fecha de consulta 20 Feb 2019].

[88] Torres, N. (2009). *TDES. Teatro Desplegable. Propuesta de un escenario con estructuras dinámicas* (tesis maestría). Universidad Nacional, Bogotá, Colombia.

[89] Torres, N. (2012). Propuesta de tensoestructura para cubrir un escenario desplegable. V Simposio Latinoamericano de Tensoestructuras TENS-SCL. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/268978154_PROPUESTA_DE_TENSOESTRUCTURA_PARA_CUBRIR_UN_ESCENARIO_DESPLEGABLE [Fecha de consulta 09 Dic 2017].

[90] Torres, N. (2013). *Desarrollo de un escenario desplegable basado en la aplicación de estructuras tipo tijera, sistema de plegadura y membranas*. Proceedings of the First Conference Transformables .In the Honor of Emilio Perez Piñero, 125-130.

- [91] Torres, N. (2015). Workshop Morfología Estructural en la Arquitectura. Escuela de Arquitectura, Arte y Diseño. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Campus Monterrey, México, 32-37. Recuperado de https://issuu.com/smia-experimental/docs/workshop_eaad__campus_monterrey_m_ [Fecha de consulta 17 May 2018].
- [92] Torres, N., y Peña, D. M. (2017). Deployable Arches Based on Regular Polygon Geometry. *Archi Doct* 4(2), 89-105. Recuperado de http://www.enhsa.net/archidoct/Issues/vol4_iss2/ArchiDoct_vol4_iss2%2006%20Deployable%20Arches%20Based%20on%20Regular%20Polygon%20Geometry%20Torres.pdf [Fecha de consulta 13 Jun 2018].
- [93] Tran, T.C., Liew, J.Y.R., (2007). *Butterfly Structure for Spatial enclosures*. Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures.
- [94] Tuma., J. (2010). *Pantograph Concept*. [Página web]. Recuperado de <http://www.studioflorian.com/projekty/145-jan-tuma-pantograph-concept> [Fecha de consulta 03 Jul 2016].
- [95] Van Mele, T., De Temmerman, N., De Laet, L., y Mollaert, M. (2010). *Scissor-hinged retractable membrane structures*. International Journal of Structural Engineering 1 (3/4), 374-396.
- [96] Villate, M. (2008). Estructuras no convencionales en la arquitectura. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá.
- [97] Zeigler, T. (1977). *Collapsible self-supporting structures*. Patente n° US4026313 A.
- [98] Zhu, Z., & Jin, W. (2018). *Sustainable bamboo development*. Wallingford, Oxfordshire, UK. 43-45.

Referencias electrónicas:**Páginas web, videos, materiales, productos y software**

[99] ABZAC. (Sin fecha). Gama Tubos sector papelerero. *Tubos y mandriles. Para el sector papelerero*. [Ficha técnica material]. Recuperado de <http://www.abzac.com/images/pdf/PJ%20espanol/Tubos%20sector%20papelerero.pdf> [Fecha de consulta 10 Oct 2012].

[100] AFCM., Ateneus de Fabricacio (2014). Ajuntament de Barcelona. [Página web]. Recuperado de <https://ajuntament.barcelona.cat/ateneusdefabricacio/es/ateneu-de-fabricacio-ciutat-meridiana/> [Fecha de consulta 01 Jun 2015].

[101] ATN Platforms. (2012, marzo-abril). Putting the smooth into the Rough. *Cranes & Access*. [Revista digital]. Recuperado de https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/vertikal.net/ca-2012-2-p26-38_07b88192.pdf [Fecha de consulta 14 Sept 2014].

[102] APYASA. Electrical Insulations, (2019). Tubos cartón. [Página web]. Recuperado de <https://apyasa.com/aplicaciones/transformadores-potencia/> [Fecha de consulta 12 Ene 2020].

[103] Bambusa Estudio., (2018) Importaciones y proyectos. Especialistas en bambú. [Página web]. Recuperado de <https://bambusa.es/> [Fecha de consulta 18 Jun 2019].

[104] BNE., Biblioteca Nacional de España., Biblioteca Digital Hispánica (2015). Leonardo Interactivo. Códice Madrid I. Madrid, España. Recuperado de <http://leonardo.bne.es/index.html> [Fecha de consulta 03 Sept 2016].

[105] BNE., Biblioteca Nacional de España, (2012, Octubre 31). Dispositivo múltipodo desplegable. Códice Madrid I (Mss/8937, fol. 25 recto) [Archivo de video]. Recuperado de https://www.youtube.com/watch?v=sWokD9-c_H8 [Fecha de consulta 03 Sept 2016].

[106] Can lift, (2009-2016). Scissor Lift & Boom Lift Sales, Rentals, & Service. About UpRight Lifts. [Página web]. Recuperado de <https://www.canliftequipment.ca/inventory/upright/> [Fecha de consulta 14 Sept 2014].

[107] Costa., E. (2020). Empresa Esteban Costa. Metal manufacturing since 1920. [Página web]. Recuperado de <https://estebancosta.com/> [Fecha de consulta 05 May 2021].

[108] DRASH. (Sin fecha). *Catalog. Rugged. Reliable. Versatile. Shelter solutions for multi-mission challenge.* Recuperado de https://www.militarysystems-tech.com/sites/militarysystems/files/supplier_docs//DRASH-Catalog.pdf [Fecha de consulta 03 Mar 2013].

[109] Embricqs, R., (2010). Projects. Amsterdam, Netherlands: Vanembricqs. Combinig, Functionality & Art. [Página web]. Recuperado de <https://www.robertvanembricqs.com/projects> [Fecha de consulta 07 Mar 2013].

[110] Fundación Emilio Pérez Piñero (Sin fecha). La Fundación. . [Página web]. Recuperado de <http://www.perezpinero.org/> [Fecha de consulta 15 Abr 2015].

[111] García G., R. (2010). ZipZip. Sistema estructural que permite realizar edificaciones desplegables [Página web]. Recuperado de <https://cargocollective.com/zipzip> [Fecha de consulta 20 Abr 2015].

[112] Hoberman, C. (1990). *Hoberman Associates - Transformable Design.* [Página web] Recuperado de <https://www.hoberman.com/> [Fecha de consulta 20 Jul 2012].

[113] Hurt., J, M. (2018). 3 Frequency 3/8 Dome Calculator. Zip Tie Domes. [Página web]. Recuperado de <https://www.ziptiedomes.com/geodesic-dome-calculators/3v-38-geodesic-dome-calculator.htm> [Fecha de consulta 24 Oct 2019].

[114] Kalantar, N. (2018). TranSTUDIO 2018. Adaptive Design, Thought and Fabrication. [Página web]. Recuperado de <https://transtudio2018.wordpress.com/category/project-ii/> [Fecha de consulta 02 Feb 2020].

[115] Kalantar, N. [Negar Kalantar]. (Julio 2018). Deployable Pavilion_transtudio 2018_Instructor: Negar Kalantar _Texas A&M_Department of Architecture . [Archivo de video]. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=6a3yvBDPXmE&index=22&list=PL9FueSK3bufJ6UPBC2VFXp0gyXJmz>

[116] Kiefer technic. (s.f). Mehr als nur Fassade - Showroom Kiefer technic. Austria: *Ernst Giselbrecht + Partner*. Recuperado de http://giselbrecht.at/projekte/gewerbe_industriebauten/kiefer/index.html# [Fecha de consulta 28 Mar 2013].

[117] Köck, B. (2012). Faltpavillon. Construcción de madera Köck. [Página web]. Recuperado de <https://www.holzbau-koeck.de/faltpavillon/> [Fecha de consulta 12 Jun 2015].

[118] Kokawa, T. (2009). Kokawa Lab. Cable Scissors Arch. [Página web]. Recuperado de <http://t-kokawa.com/04/indexe.html> [Fecha de consulta 18 Mar 2013].

[119] Konligo. (2018). Product. *Fast and Easy Deployment*. [Página web]. Recuperado de <http://www.konligo.com/index.php/product> [Fecha de consulta 20 Feb 2019].

[120] Mitek. (2001). Product Catalog - MiTek Residential Construction Industry [Página web]. Recuperado de https://www.mitek-us.com/wp-content/uploads/files/pdf/catalog/2020/04-Caps%20and%20Bases/Caps%20and%20Bases_Post%20Bases.pdf [Fecha de consulta 16 Dic 2015].

[121] Mengerlinghouse, M. (2018). MERO, Structures Inc. [Página web]. Recuperado de <https://www.mero-structures.com/> [Fecha de consulta 03 Dic 2020].

[122] Miller, M., Demaine, E., Lang, R. (Sin fecha). Paper Folding / Origami (1960 & Later). Ron Resch official website [Página web]. Recuperado de <http://www.ronresch.org/ronresch/gallery/paper-folding-origami/> [Fecha de consulta 21 May 2013].

[123] MTS. Morethanshelters. (Agosto, 2012). Fotos de biografía. [Facebook]. Recuperado de <https://www.facebook.com/morethanshelters/> [Fecha de consulta 07 Jul 2014].

[124] M2C Innovation Ltd. (2011-2017). Qube Tents. Inglaterra. *Qubetents*. [Página web]. Recuperado de <https://qubetents.com/qube-tent-gallery/> [Fecha de consulta 09 May 2014].

[125] Oxford-Fabric. (Octubre, 2020). Polyester 500D Oxford Fabric waterproofpu coating. [Página web]. Recuperado de <https://www.oxford-fabric.com/es/polyester-500d-oxford-fabric-waterproof-pu-coating/> [Fecha de consulta 24 Nov 2020].

[126] Polígonos. Portal de recursos educativos y libros digitales. (2018). [Archivo PDF]. Barcelona. Editorial Casals S.A. Pág. 40 - 45. Recuperado de <https://www.ecasals.net/es/index.php?ps=0b2b5bd5bf2ae8a3a0af3e4b2d3ca746c359a7ab4af75fa22d413eaf23d25c5c416a73c8246e33> [Fecha de consulta 18 Ene 2018].

[127] Sobreaves. (Sin fecha). Las plumas y el plumaje de las aves. *Sobreaves.com* [Página web]. Recuperado de http://sobreaves.com/?page_id=434 [Fecha de consulta 22 Dic 2012].

[128] Velarium. (s.f.) Gran Diccionario de la Lengua Española. (2016). Recuperado de <http://es.thefreedictionary.com/velarium> [Fecha de consulta 28 Oct 2012].

[129] Yuya vs design. (Sin fecha). *Save the design refugee XXX_*. [Página web]. Recuperado de <http://www.designrefugee.org/> [Fecha de consulta 06 Abr 2017].

[130] Resch, R. (Sin fecha). Paper Folding / Origami (1960 & Later). Ron Resch official website. Recuperado de <http://www.ronresch.org/ronresch/gallery/paper-folding-origami/> [Fecha de consulta 10 Nov 2015].

Programas de simulación utilizados (software)

[131] Grasshopper®. Algorithmic Modeling for Rhino. Versión 2018.
<http://www.grasshopper3d.com/>

[132] Microsoft Excel® 2013. Software de hojas de calculo, herramienta avanzada de análisis y visualización de datos.
<https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/excel>

[133] Rhinoceros® version 5. <https://www.rhino3d.com/es/>

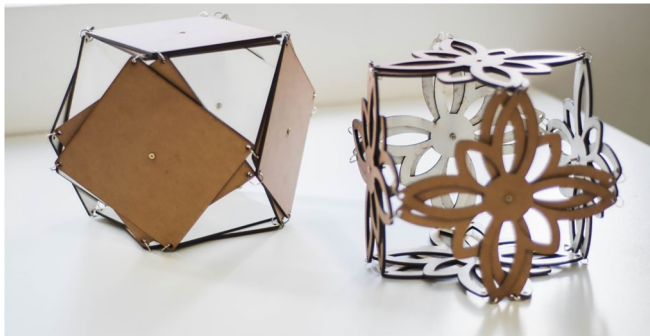
[134] SketchUp®. 3D modeling for everyone. Versión 2018.

[135] SolidWorks®. Software de diseño CAD en 3D - Dassault Systèmes®. Versión 2018.

[136] WiEva8©. Ramon Sastre i Sastre, 1989-2018. Versión 8. E.T.S. Arquitectura del Vallès, Sant Cugat del Vallès. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona. España. <https://wineva.upc.edu/esp/download.php>

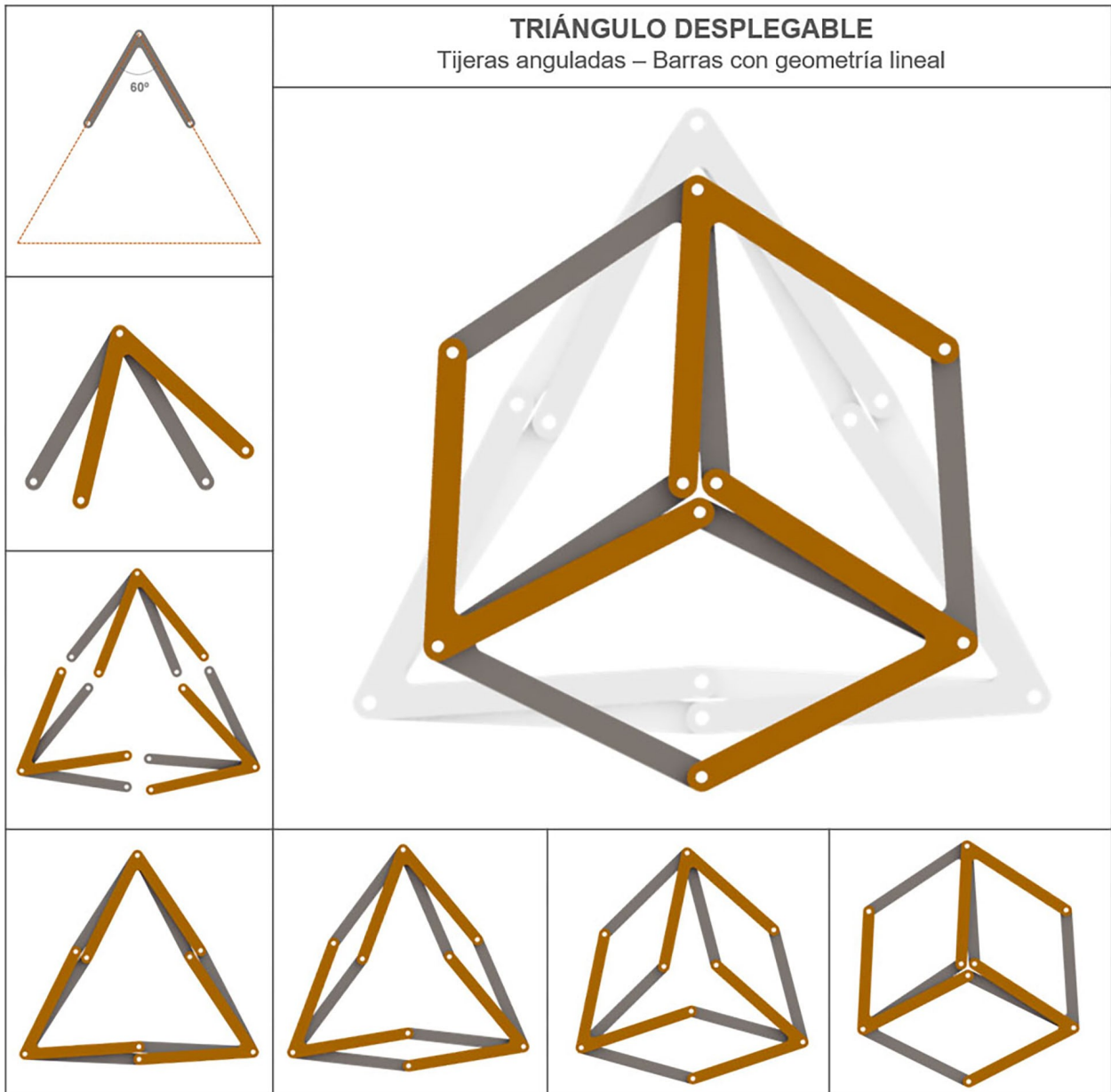
[137] WinTess©. Software. Sastre R., y Gimferrer X. 1993 -2021 Versión 3.169.26. Software de análisis no lineal para estructuras de membrana. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) . ETS. Arquitectura del Vallès. Barcelona. España. <https://www.wintess.com/es/>

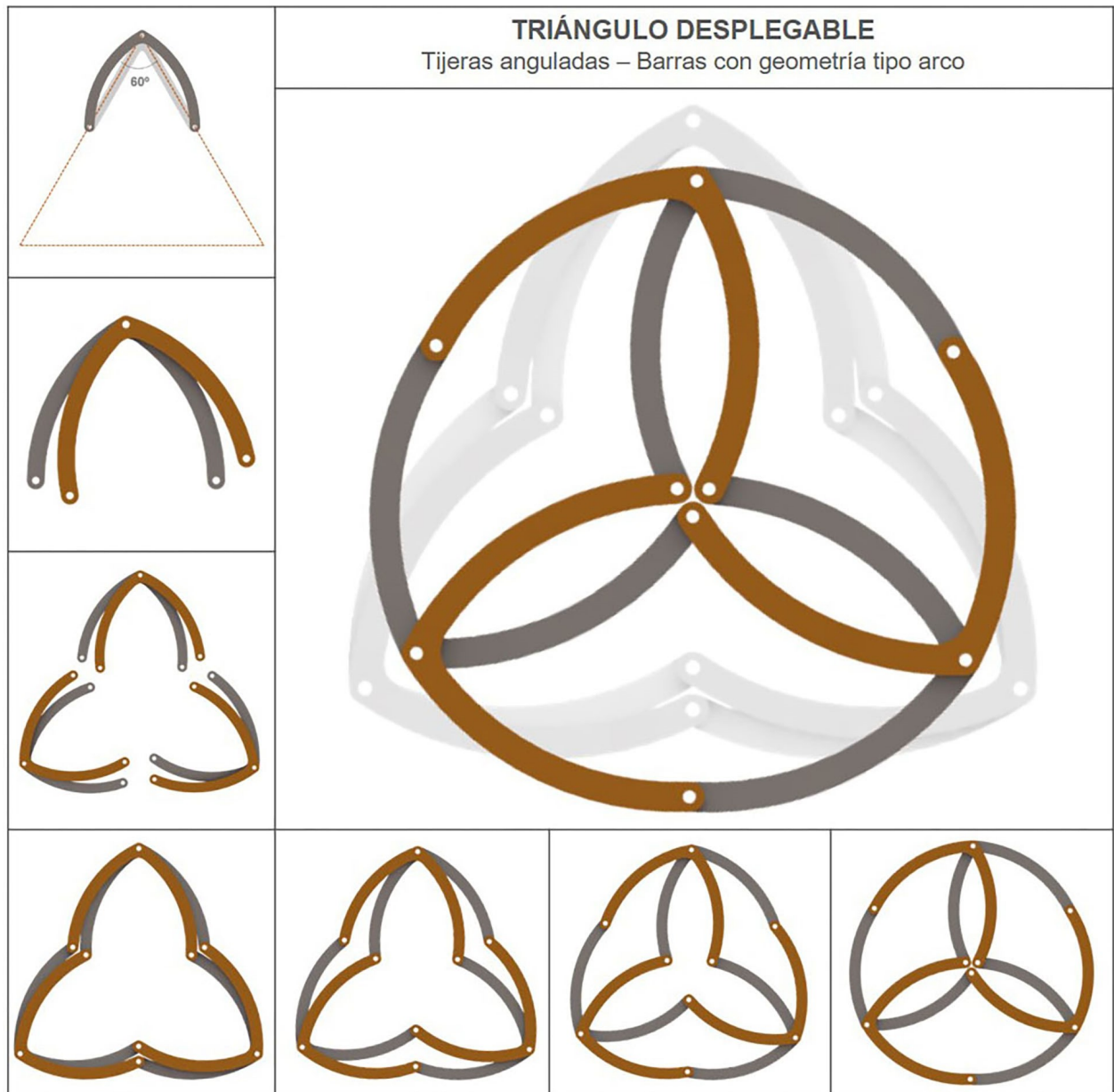
ANEXO 1

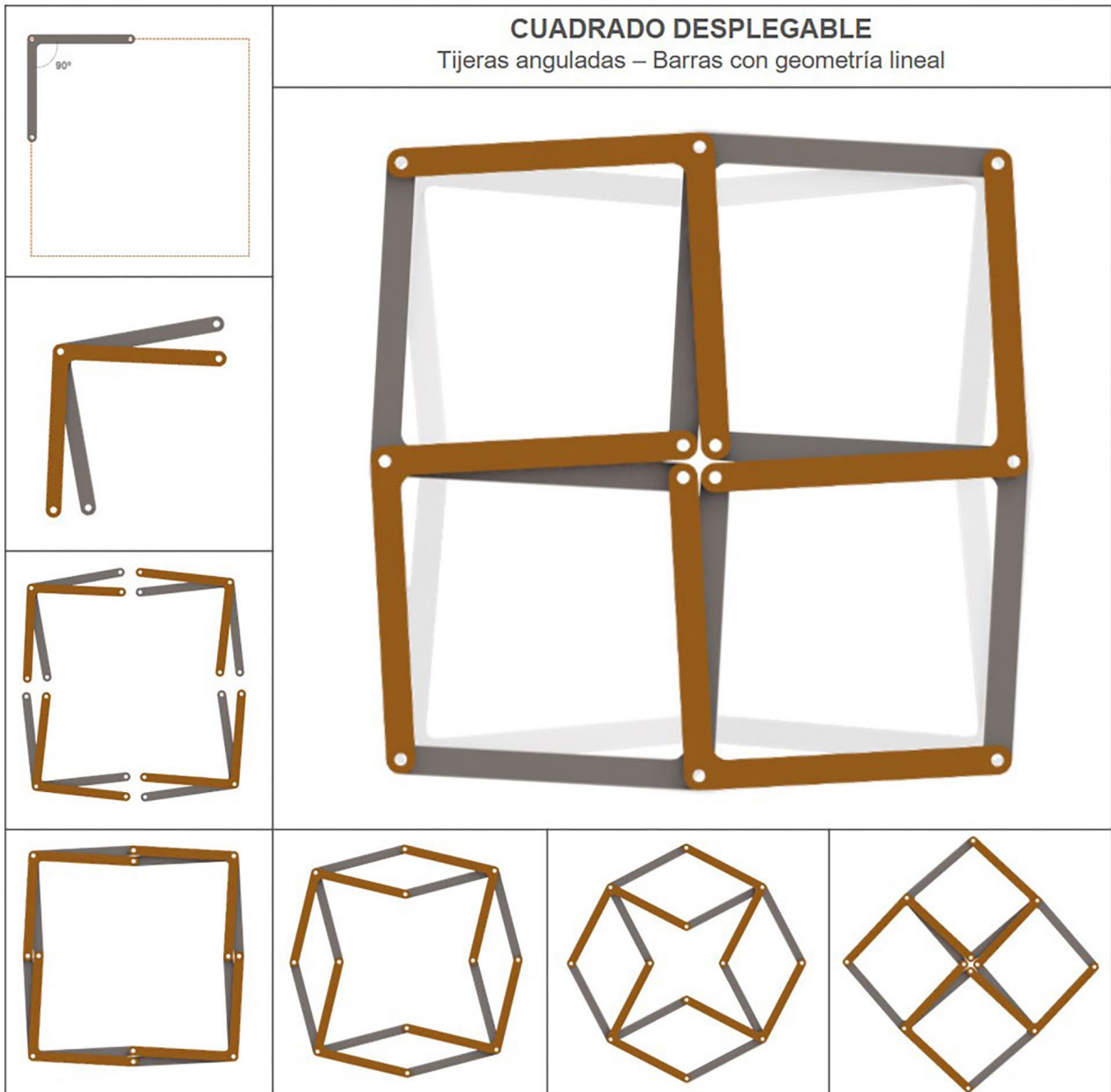


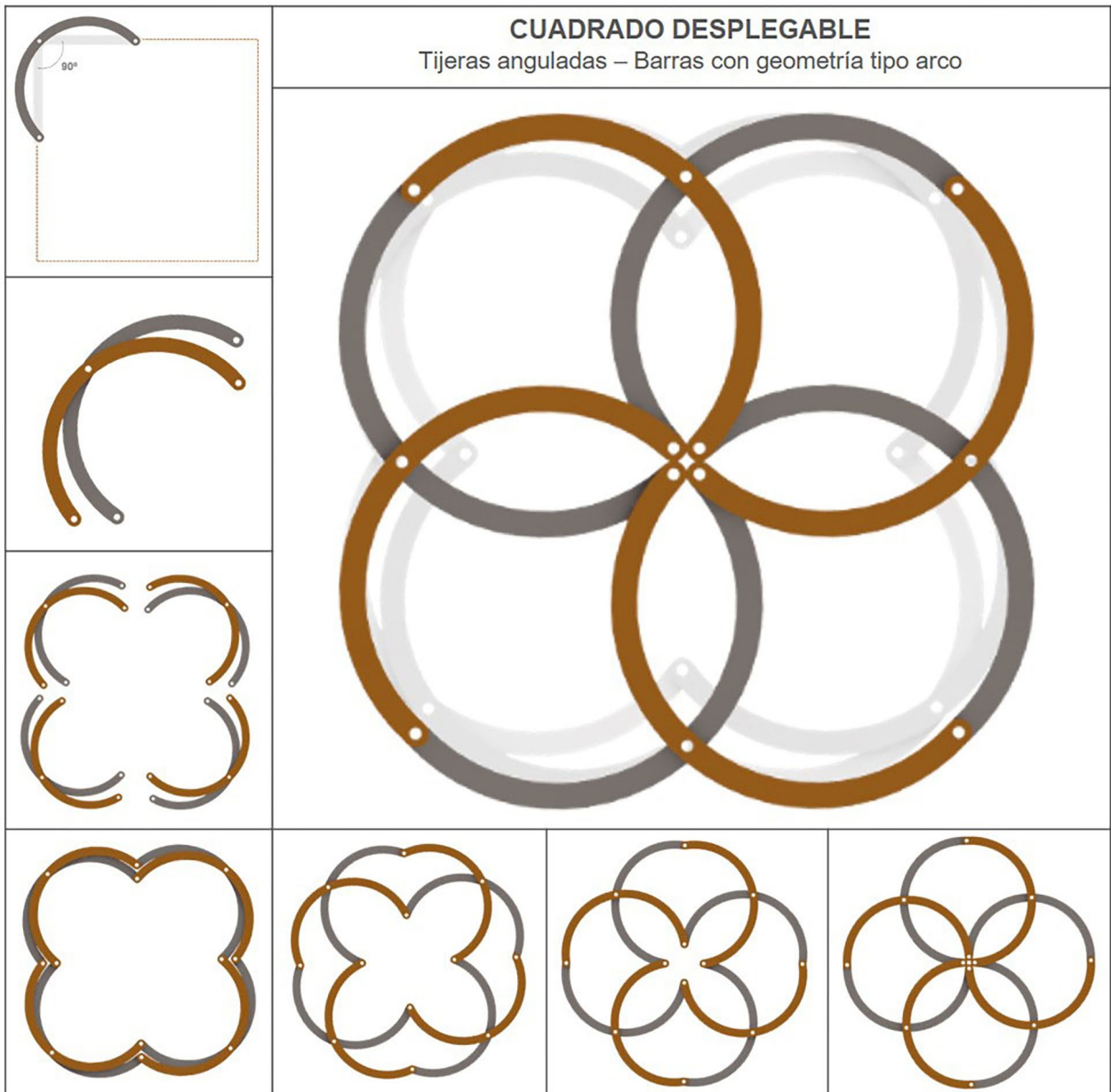
Tablas descriptivas. Agrupaciones de tijeras anguladas [87]

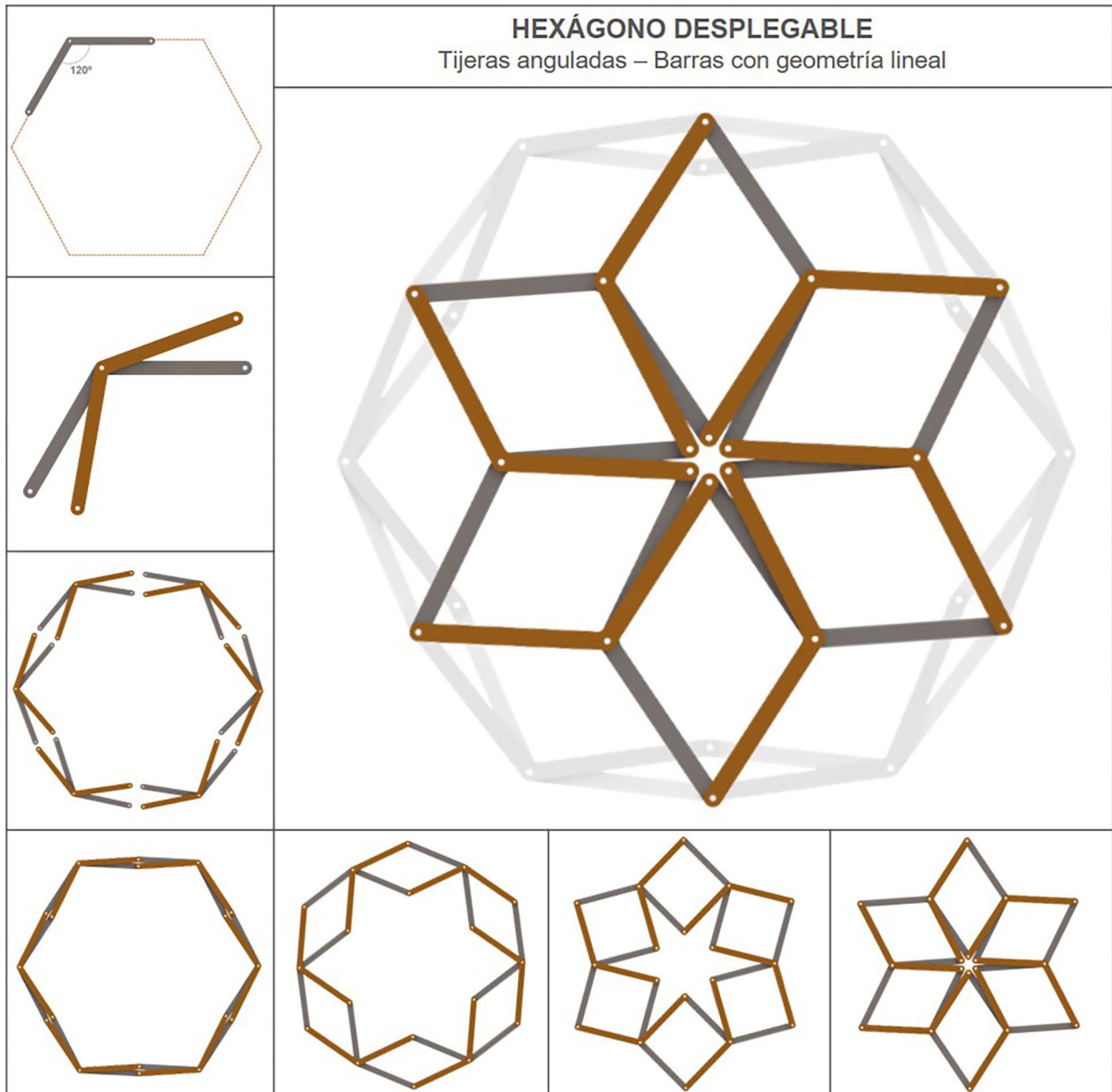
Polígonos desplegados





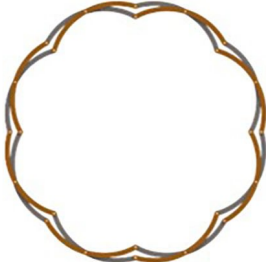
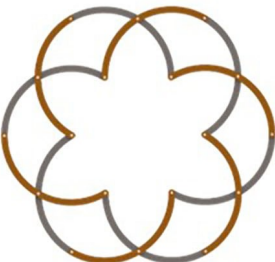
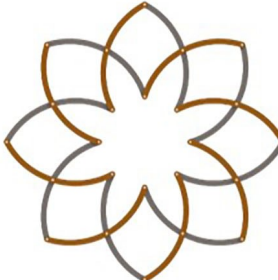
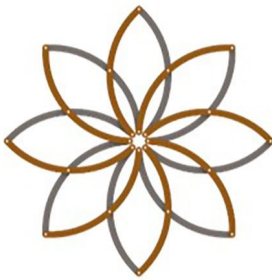


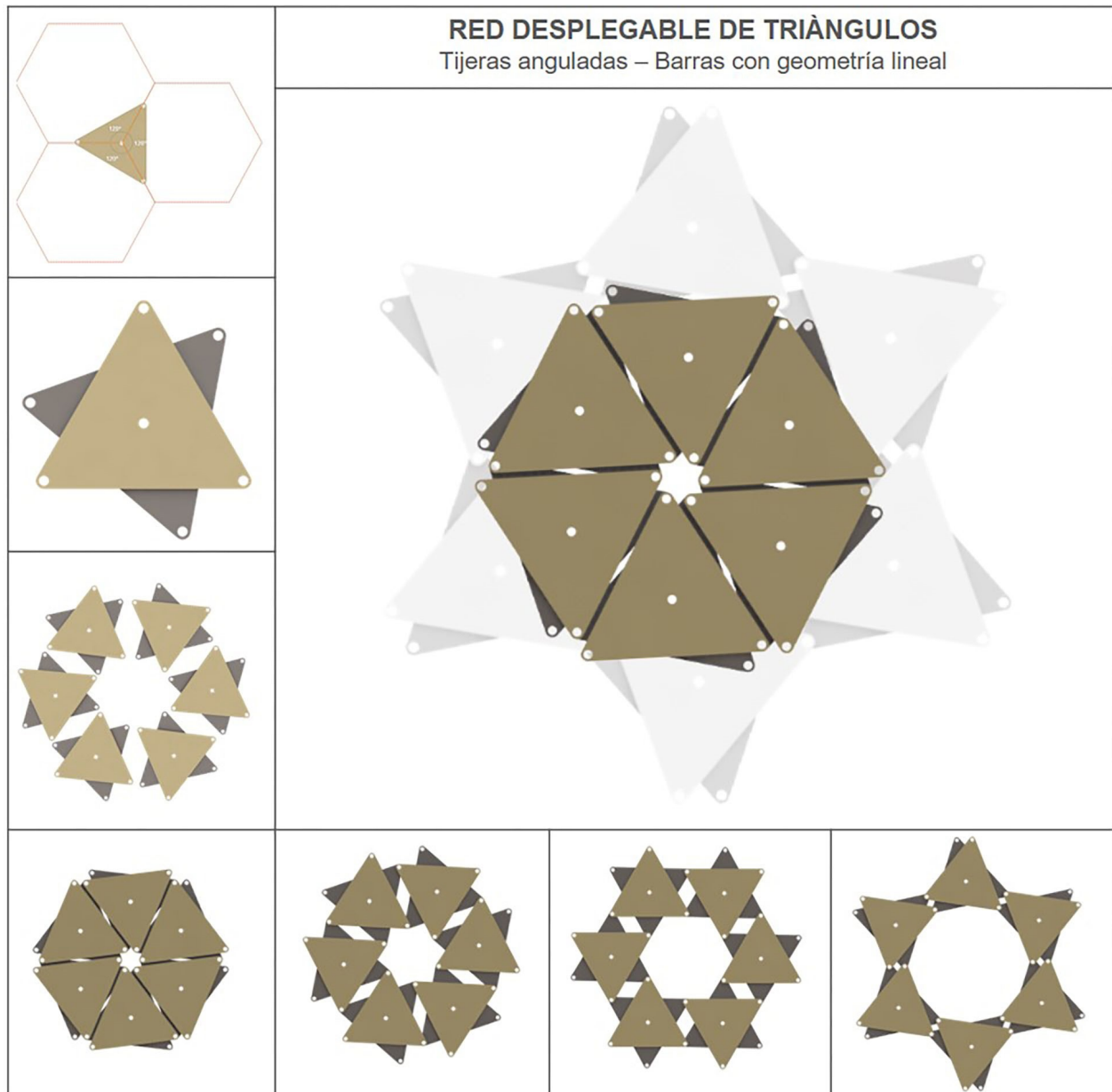


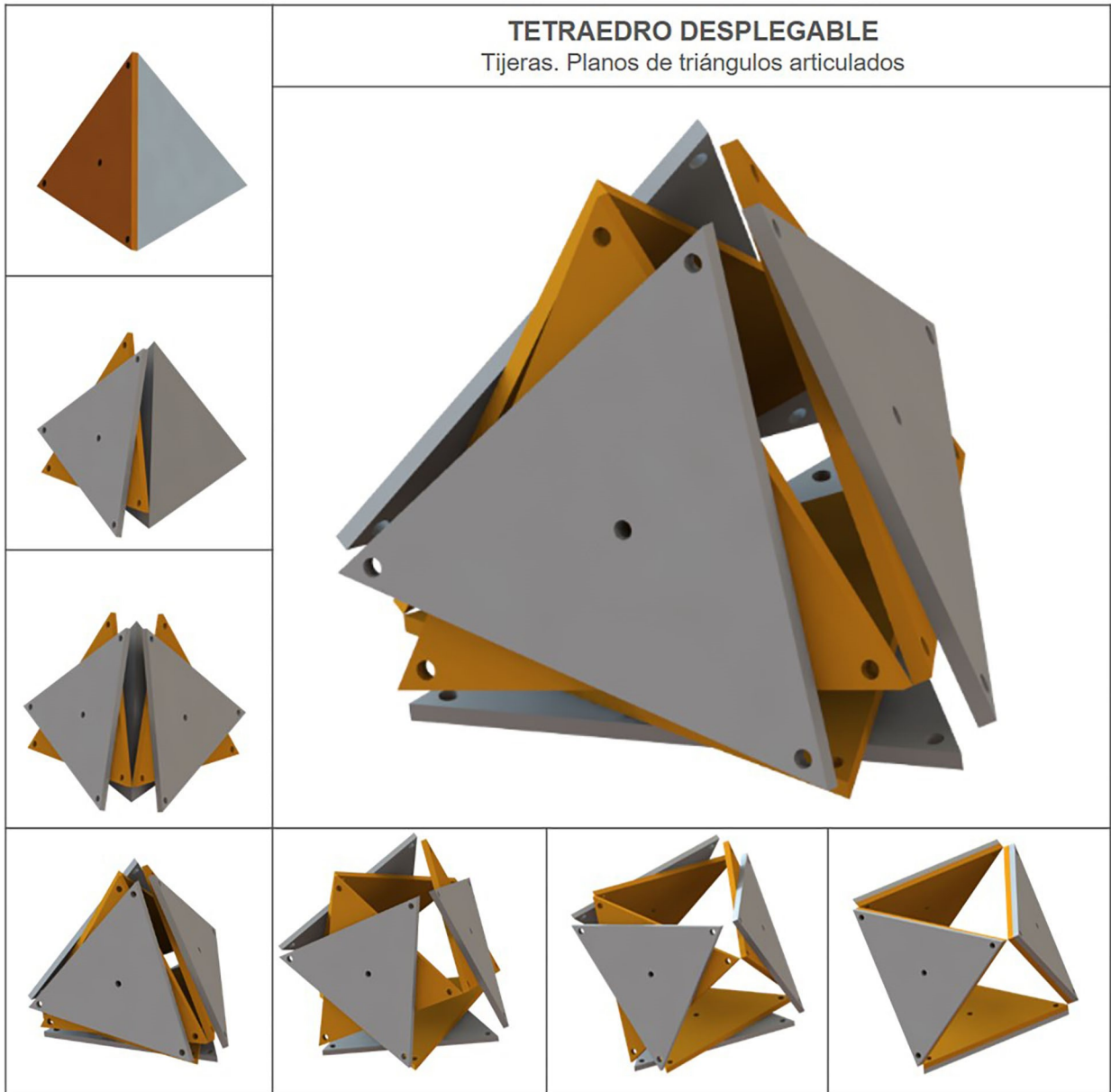




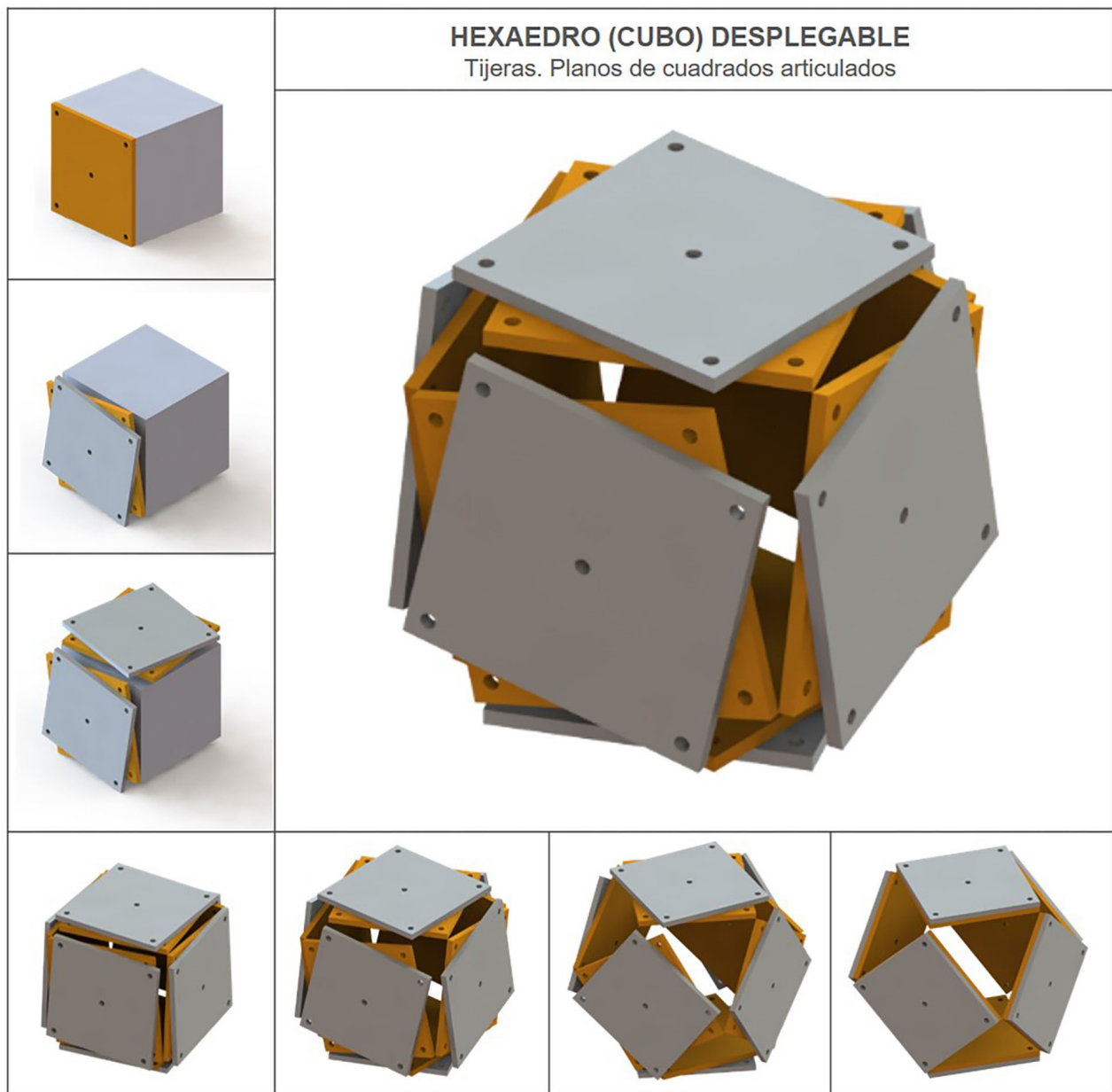


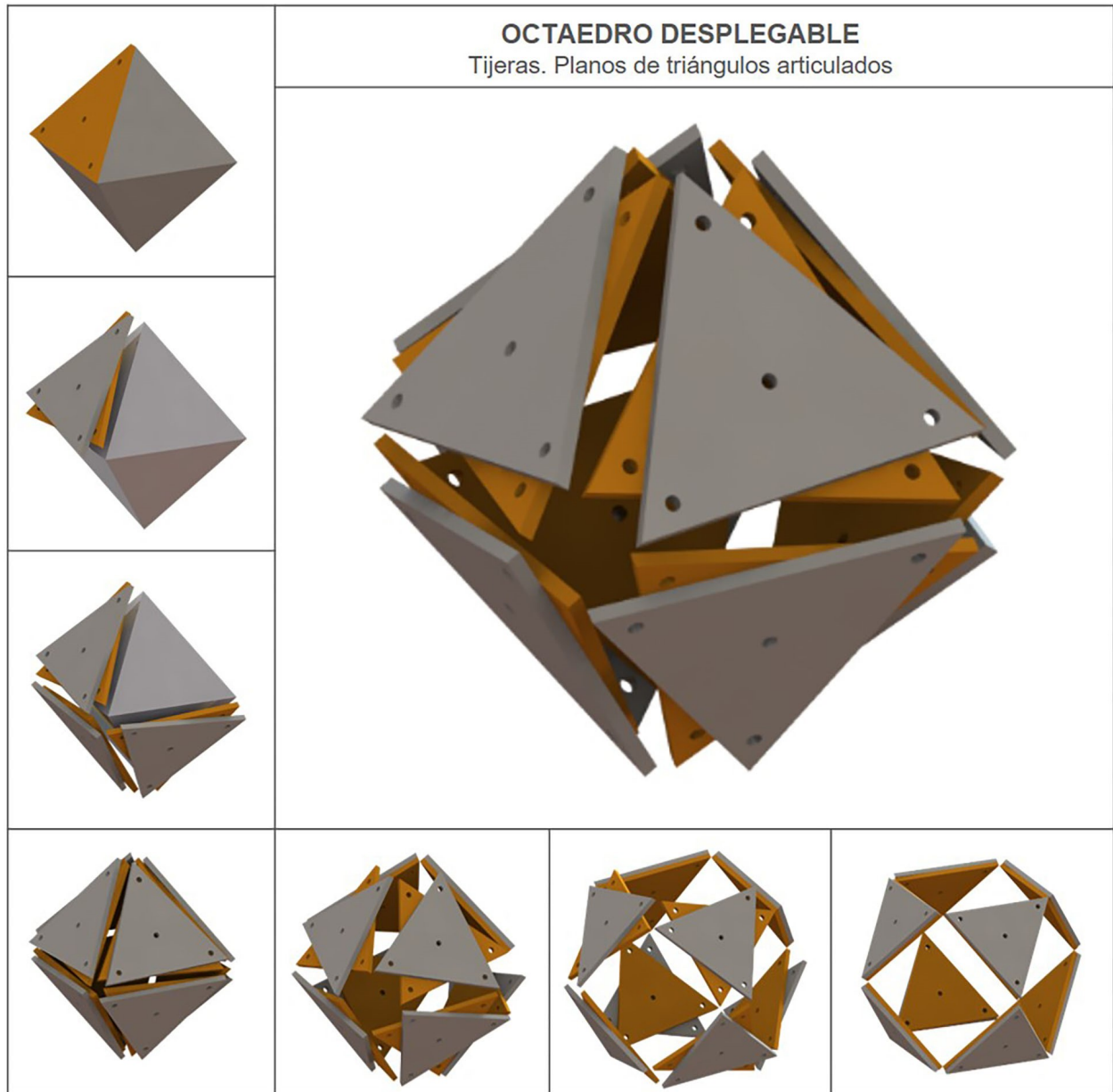
	<p>OCTÁGONO DESPLEGABLE Tijeras anguladas – Barras con geometría tipo arco</p>		
			
			
			

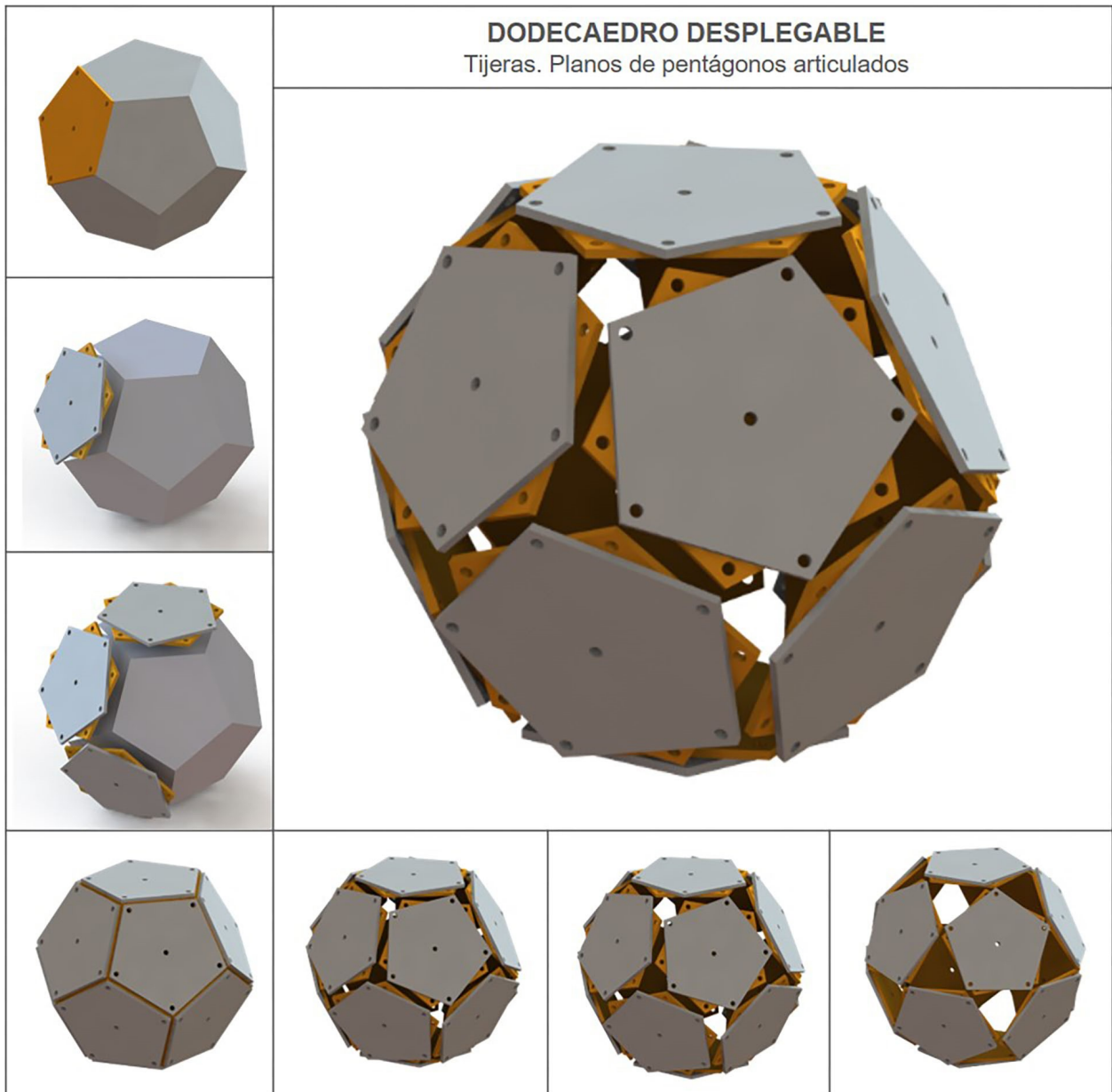




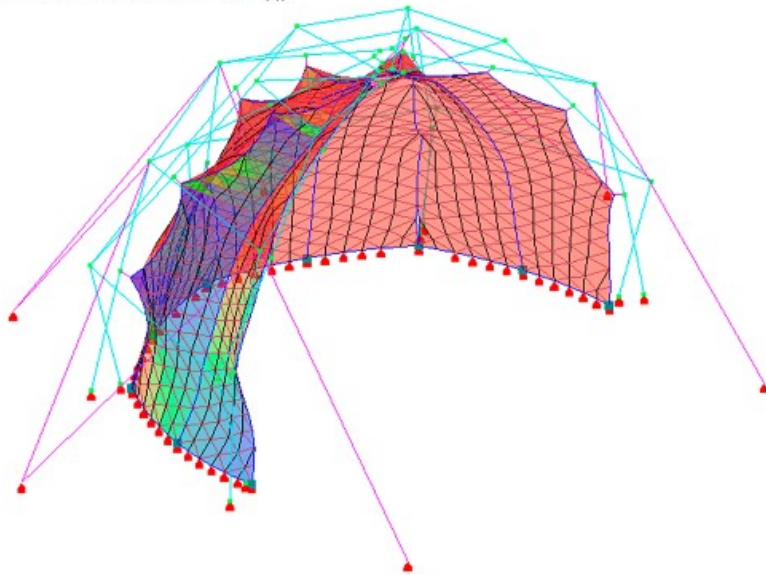
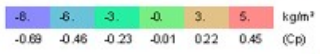
Poliedros desplegados







Carga de viento. Velocidad real 50. km/h (kg)



ANEXO 2

ANEXO 2

Resultados Cubierta Interior - Recinto cerrado

Viento X = 0 km/h Viento Y = 0 km/h Viento total = 0.0 km/h (Velocidad real)

Tipo de edificio = Cerrado, caras planas

Nieve = 0 kg/m² Superficie cubierta = 8.01 m² aprox.; Cn = 1.00

Presión interna = 0 kg/m²

Pretensado de la membrana = 0/0 %

Peso de los cables = 31.3 kg

Peso de los tubos = 77.3 kg

Peso de la membrana = 3.5 kg (19.85 m²)

RESULTADOS EN LOS NUDOS FIJOS

(t)

Nudo	Rx	Ry	Rz	R(total)
1	0.008	-0.000	0.035	0.036
4	0.000	-0.000	-0.010	0.010
6	-0.000	-0.000	0.000	0.000
7	-0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.000	0.000
9	-0.000	-0.001	-0.001	0.001
11	-0.000	0.000	0.000	0.000
15	0.000	0.000	0.000	0.000
19	-0.000	0.000	-0.000	0.000
28	-0.000	-0.000	0.000	0.000
40	0.004	-0.001	0.003	0.005
43	-0.000	0.000	-0.000	0.000
52	-0.000	-0.000	-0.000	0.000
64	-0.000	0.000	-0.001	0.001
76	-0.004	-0.001	0.022	0.022
79	-0.000	-0.000	-0.000	0.000
97	-0.001	-0.000	-0.000	0.001
100	0.000	0.001	-0.001	0.001
131	0.000	0.000	0.000	0.000
155	0.000	0.000	0.000	0.000
176	0.000	0.000	0.000	0.000
194	0.001	0.001	-0.000	0.001
218	-0.000	-0.000	0.000	0.000
240	0.001	0.001	-0.000	0.001
263	-0.001	-0.000	0.000	0.001
307	0.000	0.000	-0.000	0.000
359	0.001	0.000	-0.000	0.001

385	0.002	-0.003	-0.007	0.008
388	-0.004	0.003	0.029	0.029
410	0.002	0.002	-0.002	0.003
439	0.000	-0.000	0.000	0.000
465	0.001	0.000	-0.000	0.001
491	-0.000	0.000	0.000	0.000
514	0.001	-0.000	-0.000	0.001
535	-0.000	0.000	0.000	0.000
558	0.000	0.000	0.000	0.000
580	0.000	-0.000	0.000	0.000
604	0.000	-0.000	-0.000	0.000
622	-0.000	0.000	0.000	0.000
643	-0.000	0.001	-0.001	0.001
698	-0.001	0.001	0.000	0.001
701	0.003	-0.002	-0.001	0.004
721	-0.000	0.002	0.011	0.011
734	0.001	-0.001	-0.000	0.002
746	0.000	-0.000	0.000	0.000
755	0.000	-0.000	0.000	0.000
757	-0.004	-0.003	0.012	0.013
770	0.000	-0.000	0.000	0.000
779	0.000	-0.000	-0.000	0.001
783	-0.000	0.000	0.000	0.000
787	0.000	-0.000	-0.000	0.001
789	0.001	-0.002	-0.002	0.003
790	-0.000	0.000	0.000	0.000
791	0.000	0.000	0.000	0.000
792	0.000	-0.000	-0.000	0.001
793	-0.002	-0.002	-0.022	0.022
796	-0.008	0.006	0.046	0.047

TOT. 0.000 -0.001 0.110

Deformación máxima = 150 mm en el nudo 774

DATOS BARRAS RÍGIDAS

Barra	Axial t	Torsor tm	M.max t	C.max kg/cm ²	Tensión	Ratio	Código	Pandeo
						?		
538	-0.004	0.000	0.000	0.001	-2.1	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
539	-0.007	0.000	0.000	0.003	-6.6	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
543	-0.002	0.000	0.001	0.000	-12.0	0.25	Ø50·5_TuboCarton	0.94
544	0.001	0.000	0.002	0.000	16.2	0.33	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
545	-0.001	0.000	0.002	0.001	-23.1	0.48	Ø50·5_TuboCarton	0.86
546	-0.001	0.000	0.001	0.001	-7.6	0.16	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
547	-0.001	0.000	0.001	0.000	-11.5	0.24	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
548	-0.001	0.000	0.002	0.000	-19.0	0.39	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83

549	-0.005	0.000	0.000	0.001	-5.9	0.12	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
550	0.003	0.000	0.001	0.001	12.9	0.27	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
551	-0.006	0.000	0.002	0.001	-18.0	0.37	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
552	0.001	0.001	0.001	0.001	6.8	0.14	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
553	0.006	0.001	0.001	0.001	13.9	0.29	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
554	-0.011	0.000	0.001	0.001	-10.9	0.22	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
555	-0.013	0.000	0.002	0.000	-22.9	0.47	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
556	0.005	0.001	0.003	0.000	24.3	0.50	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
557	-0.014	0.000	0.002	0.003	-20.9	0.43	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
558	0.005	0.000	0.002	0.004	24.7	0.51	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1076	-0.005	0.000	0.000	0.001	-1.8	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1077	-0.007	0.000	0.000	0.000	-6.0	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1078	-0.010	0.000	0.001	0.001	-10.3	0.21	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1079	0.004	0.000	0.002	0.002	17.3	0.36	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1080	0.002	0.001	0.002	0.004	17.1	0.35	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1081	-0.008	0.000	0.002	0.005	-18.6	0.38	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1082	0.002	0.001	0.002	0.002	20.5	0.42	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1083	-0.008	0.000	0.002	0.005	-22.1	0.46	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1084	0.002	0.001	0.002	0.005	28.9	0.60	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1085	-0.008	0.000	0.001	0.003	-14.6	0.30	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1086	0.003	0.000	0.002	0.001	19.5	0.40	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1087	-0.007	0.000	0.001	0.001	-8.6	0.18	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1088	-0.001	0.000	0.001	0.001	-7.7	0.16	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1089	-0.003	0.000	0.002	0.001	-19.1	0.39	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1090	-0.001	0.000	0.001	0.001	-16.0	0.33	Ø50·5_TuboCarton	0.86
1091	-0.003	0.000	0.001	0.001	-7.1	0.15	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1092	-0.005	0.000	0.002	0.000	-23.5	0.48	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
1093	0.002	0.000	0.001	0.000	11.4	0.24	Ø50·5_TuboCarton	1.00
1094	-0.001	0.000	0.001	0.000	-11.7	0.24	Ø50·5_TuboCarton	0.94
1095	-0.001	0.000	0.002	0.000	-18.3	0.38	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
1096	-0.000	0.000	0.001	0.000	-20.7	0.43	Ø50·5_TuboCarton	0.86
1097	-0.002	0.000	0.000	0.000	-3.8	0.08	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1098	-0.002	0.000	0.001	0.000	-13.5	0.28	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1099	-0.001	0.000	0.001	0.000	-12.3	0.25	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1100	-0.005	0.000	0.001	0.001	-7.7	0.16	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1101	0.002	0.000	0.001	0.002	7.7	0.16	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1102	-0.006	0.000	0.002	0.002	-17.4	0.36	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1103	0.001	0.001	0.001	0.002	14.0	0.29	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1104	0.006	0.001	0.002	0.001	17.2	0.35	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1105	-0.011	0.000	0.001	0.003	-15.3	0.32	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1106	-0.012	0.000	0.001	0.002	-14.7	0.30	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1107	0.005	0.001	0.002	0.001	16.1	0.33	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1108	-0.006	0.000	0.001	0.002	-9.0	0.19	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1109	-0.001	0.000	0.001	0.002	-13.8	0.29	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1618	-0.002	0.000	0.000	0.002	-2.5	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1619	-0.004	0.000	0.000	0.004	-6.6	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2137	-0.004	0.000	0.000	0.003	-2.9	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2138	-0.005	0.000	0.000	0.002	-6.4	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00

2139	0.002	0.000	0.001	0.002	8.8	0.18	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2140	-0.009	0.000	0.001	0.001	-13.0	0.27	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2141	0.002	0.000	0.001	0.001	10.1	0.21	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2142	-0.008	0.000	0.000	0.001	-4.1	0.08	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2143	0.002	0.000	0.001	0.001	12.2	0.25	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2144	-0.007	0.000	0.002	0.002	-22.5	0.46	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2145	0.002	0.001	0.003	0.005	31.1	0.64	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2146	-0.007	0.000	0.001	0.004	-15.0	0.31	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2147	0.003	0.000	0.002	0.002	24.1	0.50	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2148	-0.007	0.000	0.001	0.002	-9.8	0.20	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2149	-0.001	0.000	0.001	0.002	-10.1	0.21	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2150	-0.003	0.000	0.002	0.002	-20.1	0.42	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2151	-0.000	0.000	0.001	0.003	-21.5	0.44	Ø50·5_TuboCarton	0.86
2152	-0.004	0.000	0.001	0.003	-11.4	0.24	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2153	-0.004	0.000	0.002	0.000	-22.8	0.47	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
2154	0.001	0.000	0.001	0.000	12.6	0.26	Ø50·5_TuboCarton	1.00
2155	0.001	0.000	0.001	0.000	11.6	0.24	Ø50·5_TuboCarton	1.00
2156	-0.003	0.000	0.002	0.000	-19.1	0.39	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
2157	0.000	0.000	0.001	0.002	22.6	0.47	Ø50·5_TuboCarton	1.00
2158	-0.003	0.000	0.001	0.002	-6.7	0.14	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2159	-0.003	0.000	0.002	0.001	-15.9	0.33	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2160	-0.001	0.000	0.001	0.001	-9.6	0.20	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2161	-0.008	0.000	0.001	0.001	-6.7	0.14	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2162	0.004	0.000	0.000	0.001	3.1	0.06	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2163	-0.009	0.000	0.002	0.001	-16.4	0.34	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2164	0.003	0.002	0.001	0.002	14.7	0.30	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2165	0.004	0.001	0.001	0.002	13.4	0.28	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2166	-0.010	0.000	0.002	0.000	-18.8	0.39	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2167	-0.012	0.000	0.002	0.001	-19.3	0.40	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2168	0.002	0.001	0.001	0.000	13.2	0.27	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2169	-0.017	0.000	0.001	0.003	-15.3	0.32	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2170	0.007	0.000	0.002	0.004	19.9	0.41	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2171	-0.007	0.000	0.000	0.000	-4.2	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	0.93
2172	0.000	0.000	0.000	0.000	2.3	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2173	-0.002	0.000	0.001	0.002	-385.5	0.73	Ø20·2_Cartón	0.04
2174	-0.000	0.000	0.000	0.000	-47.3	0.09	Ø20·2_Cartón	0.11
2175	-0.002	0.000	0.001	0.001	-330.1	0.63	Ø20·2_Cartón	0.04
2176	-0.001	0.000	0.000	0.000	-78.4	0.15	Ø20·2_Cartón	0.11
2177	-0.001	0.000	0.000	0.001	-86.8	0.16	Ø20·2_Cartón	0.11
2178	-0.001	0.000	0.001	0.001	-298.7	0.57	Ø20·2_Cartón	0.04
2179	-0.000	0.000	0.001	0.001	-266.4	0.51	Ø20·2_Cartón	0.04
2180	-0.001	0.000	0.000	0.001	-78.8	0.15	Ø20·2_Cartón	0.11
2181	-0.001	0.000	0.001	0.001	-331.4	0.63	Ø20·2_Cartón	0.02
2182	-0.003	0.000	0.001	0.001	-422.8	0.80	Ø20·2_Cartón	0.02
2183	-0.004	0.000	0.001	0.001	-495.0	0.94	Ø20·2_Cartón	0.02
2184	-0.003	0.000	0.001	0.001	-510.1	0.97	Ø20·2_Cartón	0.02

TRACCIÓN MAXIMA EN LA MEMBRANA

Barra	Nudos	t/metro	kg/5cm	Ratio
-------	-------	---------	--------	-------

1264	140-175	0.039	1.9	0.12
------	---------	-------	-----	------

TRACCIÓN EN LOS POLI-CABLES

Cable	t	Ratio	Barras	Longitud (m)	Código
-------	---	-------	--------	--------------	--------

1	0.001	0.00	3-6	0.514	WEB30x3POLYE
2	0.003	0.00	7-27	3.226	WEB30x3POLYE
3	0.002	0.00	28-33	0.965	WEB30x3POLYE
4	0.000	0.00	34-39	0.965	WEB30x3POLYE
5	0.003	0.00	40-67	4.126	WEB30x3POLYE
6	0.001	0.00	445-469	3.596	WEB30x3POLYE
9	0.001	0.00	561-588	4.126	WEB30x3POLYE
10	0.000	0.00	589-594	0.965	WEB30x3POLYE
11	0.001	0.00	595-600	0.965	WEB30x3POLYE
12	0.000	0.00	601-603	0.473	WEB30x3POLYE
13	0.001	0.00	604-606	0.386	WEB30x3POLYE
14	0.002	0.00	984-1008	3.603	WEB30x3POLYE
15	0.001	0.00	1112-1115	0.514	WEB30x3POLYE
16	0.003	0.00	1116-1136	3.227	WEB30x3POLYE
17	0.000	0.00	1137-1142	0.965	WEB30x3POLYE
18	0.001	0.00	1143-1148	0.965	WEB30x3POLYE
19	0.001	0.00	1526-1550	3.593	WEB30x3POLYE
22	0.001	0.00	1622-1649	4.126	WEB30x3POLYE
23	0.000	0.00	1650-1655	0.965	WEB30x3POLYE
24	0.000	0.00	1656-1661	0.965	WEB30x3POLYE
25	0.001	0.00	1662-1664	0.473	WEB30x3POLYE
26	0.001	0.00	1665-1667	0.386	WEB30x3POLYE
27	0.002	0.00	2045-2069	3.596	WEB30x3POLYE

TRACCIÓN EN LOS CABLES SIMPLES

Bar	t	Ratio	Código
-----	---	-------	--------

1	0.002	0.00	WEB30x3POLYE
2	0.002	0.00	WEB30x3POLYE
533	0.004	0.02	6x19-(3mm)Galv
534	0.004	0.02	6x19-(3mm)Galv
535	0.003	0.01	6x19-(3mm)Galv
536	0.002	0.01	6x19-(3mm)Galv
537	0.002	0.01	6x19-(3mm)Galv
540	0.007	0.04	6x19-(3mm)Galv
541	0.004	0.02	6x19-(3mm)Galv
542	0.003	0.02	6x19-(3mm)Galv

559	0.001	0.00	WEB30x3POLYE
560	0.001	0.00	WEB30x3POLYE
1072	0.001	0.00	6x19-(3mm)Galv
1073	0.003	0.02	6x19-(3mm)Galv
1074	0.002	0.01	6x19-(3mm)Galv
1075	0.001	0.01	6x19-(3mm)Galv
1110	0.002	0.00	WEB30x3POLYE
1111	0.002	0.00	WEB30x3POLYE
1614	0.008	0.05	6x19-(3mm)Galv
1615	0.003	0.02	6x19-(3mm)Galv
1616	0.003	0.02	6x19-(3mm)Galv
1617	0.002	0.01	6x19-(3mm)Galv
1620	0.001	0.00	WEB30x3POLYE
1621	0.001	0.00	WEB30x3POLYE
2133	0.005	0.03	6x19-(3mm)Galv
2134	0.002	0.01	6x19-(3mm)Galv
2135	0.002	0.01	6x19-(3mm)Galv
2136	0.001	0.01	6x19-(3mm)Galv

Resultados Cubierta Interior - Al aire libre

Viento X = 35 km/h Viento Y = 35 km/h Viento total = 49.5 km/h (Velocidad real)

Tipo de edificio = Cerrado, caras planas

Nieve = 0 kg/m² Superficie cubierta = 7.67 m² aprox.; Cn = 1.00

Presión interna = 0 kg/m²

Pretensado de la membrana = 0/0 %

Peso de los cables = 36.9 kg

Peso de los tubos = 77.3 kg

Peso de la membrana = 3.5 kg (19.85 m²)

RESULTADOS EN LOS NUDOS FIJOS

(t)

Nudo	Rx	Ry	Rz	R(total)
1	0.001	-0.007	0.026	0.027
4	0.002	0.001	0.001	0.002
7	-0.003	0.005	-0.010	0.011
9	0.001	0.000	-0.000	0.001
10	-0.000	-0.000	0.000	0.000
16	-0.002	0.001	-0.002	0.003
21	-0.000	0.000	-0.002	0.002
22	-0.000	-0.000	0.000	0.000
38	-0.001	0.000	-0.000	0.001
47	-0.001	-0.000	-0.000	0.001
48	-0.000	-0.000	0.000	0.000
62	0.001	0.001	-0.001	0.001
63	-0.000	-0.000	0.000	0.000
79	0.000	-0.000	0.000	0.000
80	-0.000	-0.000	0.000	0.000
103	-0.002	-0.001	-0.001	0.002
104	0.000	-0.000	-0.000	0.001
124	0.000	-0.000	0.000	0.000
125	-0.000	-0.000	0.000	0.000
149	0.007	-0.005	0.025	0.026
151	-0.005	-0.005	0.031	0.031
155	-0.003	-0.001	-0.002	0.004
156	-0.000	0.001	-0.001	0.001
188	0.000	-0.000	0.000	0.000
203	0.000	0.004	0.018	0.018
205	0.002	-0.001	-0.001	0.002
229	-0.009	-0.004	-0.007	0.012
230	0.005	-0.003	-0.003	0.006
235	0.000	0.001	-0.001	0.001

236	-0.002	0.008	-0.005	0.010
286	0.000	-0.000	0.000	0.000
337	-0.000	-0.000	-0.000	0.000
338	0.000	0.002	-0.002	0.003
380	-0.000	-0.000	0.000	0.000
381	-0.000	-0.000	0.000	0.000
425	-0.001	-0.001	-0.001	0.001
426	-0.000	0.001	-0.001	0.002
452	-0.000	0.000	0.000	0.000
453	-0.000	-0.000	0.000	0.000
500	-0.004	-0.003	-0.006	0.008
501	-0.000	0.001	-0.000	0.001
548	-0.001	0.000	-0.001	0.001
549	-0.000	-0.000	0.000	0.000
589	-0.002	-0.001	-0.002	0.003
590	-0.000	-0.000	0.000	0.000
642	-0.000	0.000	-0.000	0.000
643	-0.000	-0.000	0.000	0.000
702	-0.001	-0.002	-0.001	0.003
703	0.001	-0.003	-0.002	0.003
742	-0.000	-0.000	0.000	0.000
743	-0.000	0.000	0.000	0.000
786	-0.003	-0.006	-0.004	0.008
787	0.001	-0.012	-0.009	0.015
788	0.001	-0.004	-0.010	0.011
790	-0.000	-0.002	-0.002	0.003
794	0.008	0.010	0.044	0.046
796	-0.011	0.001	0.045	0.047
798	-0.000	-0.003	-0.003	0.005
799	0.001	-0.012	-0.014	0.019
800	0.000	0.000	0.001	0.001
801	0.000	0.000	0.001	0.001
802	0.000	0.000	0.001	0.001
803	-0.008	-0.002	-0.009	0.012

 TOT. -0.029 -0.042 0.089

Deformación máxima = 259 mm en el nudo 721

 DATOS BARRAS RÍGIDAS

Barra	Axial t	Torsor tm	M.max t	C.max kg/cm ²	Tensión	Ratio	Código	Pandeo
538	-0.010	0.000	0.000	0.002	-6.4	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
539	-0.005	0.000	0.000	0.005	-6.8	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
543	-0.013	0.000	0.003	0.001	-37.5	0.77	Ø50·5_TuboCarton	0.94
544	0.003	0.000	0.001	0.000	7.3	0.15	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00

545	0.006	0.000	0.001	0.000	13.6	0.28	Ø50-5_TuboCarton	1.00
546	-0.018	0.000	0.001	0.000	-10.8	0.22	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
547	-0.019	0.000	0.001	0.001	-12.3	0.25	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
548	0.002	0.000	0.001	0.001	13.7	0.28	Ø50-10_Tubos_CartDob	1.00
549	-0.019	0.000	0.001	0.001	-8.0	0.17	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
550	0.001	0.000	0.002	0.001	19.3	0.40	Ø50-10_Tubos_CartDob	1.00
551	-0.020	0.000	0.001	0.002	-10.5	0.22	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
552	0.001	0.002	0.002	0.003	25.0	0.52	Ø50-10_Tubos_CartDob	1.00
553	0.005	0.001	0.001	0.002	9.3	0.19	Ø50-10_Tubos_CartDob	1.00
554	-0.024	0.000	0.003	0.001	-28.6	0.59	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
555	-0.027	0.000	0.001	0.001	-13.4	0.28	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
556	0.002	0.001	0.001	0.001	9.6	0.20	Ø50-10_Tubos_CartDob	1.00
557	-0.001	0.000	0.001	0.002	-9.5	0.20	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
558	-0.027	0.000	0.001	0.003	-14.2	0.29	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.83
1076	-0.006	0.000	0.000	0.006	-6.6	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1077	-0.004	0.000	0.000	0.003	-6.4	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1078	-0.046	0.000	0.001	0.003	-18.5	0.38	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.83
1079	0.002	0.000	0.001	0.003	13.3	0.27	Ø50-10_Tubos_CartDob	1.00
1080	0.001	0.000	0.001	0.000	11.2	0.23	Ø50-10_Tubos_CartDob	1.00
1081	-0.042	0.000	0.001	0.002	-13.1	0.27	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
1082	0.001	0.000	0.001	0.000	10.1	0.21	Ø50-10_Tubos_CartDob	1.00
1083	-0.040	0.000	0.002	0.003	-28.7	0.59	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
1084	-0.011	0.001	0.003	0.007	-37.4	0.77	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.83
1085	-0.028	0.000	0.002	0.006	-24.7	0.51	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
1086	0.004	0.000	0.002	0.002	22.8	0.47	Ø50-10_Tubos_CartDob	1.00
1087	-0.027	0.000	0.001	0.002	-10.5	0.22	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
1088	-0.004	0.000	0.000	0.000	-2.4	0.05	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.83
1089	-0.016	0.000	0.002	0.001	-23.4	0.48	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
1090	-0.001	0.000	0.002	0.004	-29.3	0.61	Ø50-5_TuboCarton	0.86
1091	-0.015	0.000	0.002	0.004	-17.2	0.36	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
1092	-0.019	0.000	0.003	0.000	-26.8	0.55	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.91
1093	0.005	0.000	0.002	0.001	24.1	0.50	Ø50-5_TuboCarton	1.00
1094	-0.004	0.000	0.002	0.000	-32.5	0.67	Ø50-5_TuboCarton	0.94
1095	-0.009	0.000	0.001	0.000	-13.6	0.28	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.91
1096	0.006	0.000	0.000	0.001	7.6	0.16	Ø50-5_TuboCarton	1.00
1097	-0.021	0.000	0.001	0.001	-8.5	0.18	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
1098	-0.023	0.000	0.002	0.000	-18.4	0.38	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
1099	0.001	0.000	0.001	0.000	14.5	0.30	Ø50-10_Tubos_CartDob	1.00
1100	-0.026	0.000	0.001	0.002	-10.6	0.22	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
1101	0.003	0.000	0.003	0.001	26.6	0.55	Ø50-10_Tubos_CartDob	1.00
1102	-0.027	0.000	0.001	0.003	-14.9	0.31	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
1103	0.004	0.002	0.003	0.005	31.7	0.65	Ø50-10_Tubos_CartDob	1.00
1104	0.001	0.001	0.001	0.002	9.6	0.20	Ø50-10_Tubos_CartDob	1.00
1105	-0.024	0.000	0.003	0.002	-31.9	0.66	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
1106	-0.027	0.000	0.001	0.002	-13.3	0.28	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.87
1107	-0.001	0.000	0.001	0.001	-14.2	0.29	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.83
1108	0.000	0.000	0.001	0.002	12.8	0.26	Ø50-10_Tubos_CartDob	1.00
1109	-0.031	0.000	0.001	0.003	-16.5	0.34	Ø50-10_Tubos_CartDob	0.83

1618	-0.009	0.000	0.000	0.001	-4.8	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1619	-0.005	0.000	0.000	0.004	-6.8	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2137	-0.004	0.000	0.000	0.006	-5.0	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2138	-0.003	0.000	0.000	0.001	-5.5	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2139	-0.046	0.000	0.002	0.004	-20.6	0.42	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2140	0.011	0.000	0.002	0.005	20.1	0.41	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2141	0.004	0.001	0.003	0.007	31.0	0.64	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2142	-0.037	0.000	0.003	0.009	-36.2	0.75	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2143	0.005	0.001	0.002	0.002	20.2	0.42	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2144	-0.036	0.000	0.002	0.005	-25.3	0.52	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2145	-0.004	0.000	0.001	0.001	-13.0	0.27	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2146	-0.024	0.000	0.003	0.003	-28.5	0.59	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2147	0.003	0.000	0.002	0.005	21.9	0.45	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2148	-0.022	0.000	0.002	0.006	-29.0	0.60	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2149	-0.005	0.001	0.000	0.001	-4.5	0.09	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2150	-0.013	0.000	0.002	0.001	-20.2	0.42	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2151	-0.004	0.000	0.001	0.003	-26.7	0.55	Ø50·5_TuboCarton	0.86
2152	-0.013	0.000	0.001	0.003	-12.9	0.27	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2153	-0.022	0.000	0.003	0.002	-29.8	0.62	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
2154	0.007	0.000	0.001	0.003	22.3	0.46	Ø50·5_TuboCarton	1.00
2155	-0.003	0.000	0.002	0.000	-29.2	0.60	Ø50·5_TuboCarton	0.94
2156	-0.004	0.000	0.001	0.000	-14.6	0.30	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
2157	0.004	0.000	0.000	0.001	4.9	0.10	Ø50·5_TuboCarton	1.00
2158	-0.013	0.000	0.001	0.001	-8.2	0.17	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2159	-0.015	0.000	0.002	0.003	-21.0	0.43	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2160	-0.000	0.000	0.001	0.003	-12.9	0.27	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2161	-0.024	0.000	0.002	0.001	-17.3	0.36	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2162	0.008	0.000	0.001	0.001	11.7	0.24	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2163	-0.026	0.000	0.002	0.001	-22.7	0.47	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2164	-0.007	0.001	0.002	0.002	-20.3	0.42	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2165	0.007	0.001	0.000	0.000	1.7	0.04	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2166	-0.039	0.000	0.004	0.004	-42.7	0.88	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2167	-0.043	0.000	0.003	0.002	-35.2	0.73	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2168	0.003	0.001	0.001	0.002	10.3	0.21	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2169	-0.018	0.000	0.001	0.003	-13.0	0.27	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2170	-0.026	0.000	0.002	0.004	-20.4	0.42	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2171	-0.020	0.000	0.000	0.001	-6.0	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	0.93
2172	0.013	0.000	0.000	0.000	5.5	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2173	-0.002	0.000	0.001	0.001	-251.2	0.48	Ø20·2_Cartón	0.04
2174	-0.003	0.000	0.001	0.002	-227.3	0.43	Ø20·2_Cartón	0.11
2175	0.006	0.000	0.001	0.001	317.2	0.60	Ø20·2_Cartón	1.00
2176	-0.004	0.000	0.000	0.001	-106.7	0.20	Ø20·2_Cartón	0.11
2177	-0.003	0.000	0.000	0.000	-108.1	0.21	Ø20·2_Cartón	0.11
2178	0.007	0.000	0.001	0.001	312.7	0.59	Ø20·2_Cartón	1.00
2179	0.008	0.000	0.002	0.002	401.1	0.76	Ø20·2_Cartón	1.00
2180	-0.003	0.000	0.000	0.000	-88.3	0.17	Ø20·2_Cartón	0.11
2181	-0.007	0.000	0.002	0.002	-691.8	1.31	Ø20·2_Cartón	0.02
2182	-0.006	0.000	0.001	0.001	-550.7	1.04	Ø20·2_Cartón	0.02

2183	-0.004	0.000	0.001	0.001	-455.5	0.86	Ø20-2_Cartón	0.02
2184	-0.001	0.000	0.001	0.001	-333.9	0.63	Ø20-2_Cartón	0.02

 TRACCIÓN MAXIMA EN LA MEMBRANA

Barra	Nudos	t/metro	kg/5cm	Ratio
607	751-787	0.128	6.4	0.40

 TRACCIÓN EN LOS POLI-CABLES

Cable	t	Ratio	Barras	Longitud (m)	Código
1	0.002	0.00	3-6	0.514	WEB30x3POLYE
2	0.004	0.00	7-27	3.227	WEB30x3POLYE
3	0.002	0.00	28-33	0.965	WEB30x3POLYE
4	0.000	0.00	34-39	0.965	WEB30x3POLYE
5	0.006	0.00	40-67	4.125	WEB30x3POLYE
6	0.008	0.00	445-469	3.599	WEB30x3POLYE
9	0.002	0.00	561-588	4.126	WEB30x3POLYE
10	0.000	0.00	589-594	0.965	WEB30x3POLYE
11	0.002	0.00	595-600	0.965	WEB30x3POLYE
12	0.002	0.00	601-603	0.473	WEB30x3POLYE
13	0.000	0.00	604-606	0.386	WEB30x3POLYE
14	0.011	0.00	984-1008	3.601	WEB30x3POLYE
15	0.001	0.00	1112-1115	0.514	WEB30x3POLYE
16	0.008	0.00	1116-1136	3.227	WEB30x3POLYE
17	0.000	0.00	1137-1142	0.965	WEB30x3POLYE
18	0.001	0.00	1143-1148	0.965	WEB30x3POLYE
19	0.008	0.00	1526-1550	3.603	WEB30x3POLYE
22	0.002	0.00	1622-1649	4.126	WEB30x3POLYE
23	0.000	0.00	1650-1655	0.965	WEB30x3POLYE
24	0.000	0.00	1656-1661	0.965	WEB30x3POLYE
25	0.000	0.00	1662-1664	0.473	WEB30x3POLYE
26	0.000	0.00	1665-1667	0.386	WEB30x3POLYE
27	0.006	0.00	2045-2069	3.603	WEB30x3POLYE

 TRACCIÓN EN LOS CABLES SIMPLES

Bar	t	Ratio	Código
1	0.009	0.00	WEB30x3POLYE
2	0.009	0.00	WEB30x3POLYE
533	0.010	0.05	6x19-(3mm)Galv
534	0.002	0.01	6x19-(3mm)Galv
535	0.004	0.02	6x19-(3mm)Galv
536	0.007	0.04	6x19-(3mm)Galv

537	0.006	0.03	6x19-(3mm)Galv
540	0.009	0.05	6x19-(3mm)Galv
541	0.002	0.01	6x19-(3mm)Galv
542	0.003	0.02	6x19-(3mm)Galv
559	0.003	0.00	WEB30x3POLYE
560	0.003	0.00	WEB30x3POLYE
1072	0.010	0.06	6x19-(3mm)Galv
1073	0.002	0.01	6x19-(3mm)Galv
1074	0.005	0.03	6x19-(3mm)Galv
1075	0.007	0.04	6x19-(3mm)Galv
1110	0.007	0.00	WEB30x3POLYE
1111	0.007	0.00	WEB30x3POLYE
1614	0.014	0.08	6x19-(3mm)Galv
1615	0.006	0.04	6x19-(3mm)Galv
1616	0.004	0.02	6x19-(3mm)Galv
1617	0.006	0.04	6x19-(3mm)Galv
1620	0.002	0.00	WEB30x3POLYE
1621	0.002	0.00	WEB30x3POLYE
2133	0.002	0.01	6x19-(3mm)Galv
2134	0.011	0.06	6x19-(3mm)Galv
2135	0.003	0.02	6x19-(3mm)Galv
2136	0.003	0.02	6x19-(3mm)Galv
2185	0.005	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2186	0.019	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2187	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2188	0.013	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2189	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2190	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2191	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2192	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2193	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2194	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE

Resultados Cubierta Exterior - Recinto Cerrado

Viento X = 0 km/h Viento Y = 0 km/h Viento total = 0.0 km/h (Velocidad real)

Tipo de edificio = Cerrado, caras planas

Nieve = 0 kg/m² Superficie cubierta = 12.95 m² aprox.; Cn = 1.00

Presión interna = 0 kg/m²

Pretensado de la membrana = 0/0 %

Peso de los cables = 53.3 kg

Peso de los tubos = 81.4 kg

Peso de la membrana = 5.2 kg (29.10 m²)

RESULTADOS EN LOS NUDOS FIJOS

	(t)			
Nudo	Rx	Ry	Rz	R(total)
1	0.000	-0.000	0.000	0.000
2	0.000	0.000	0.000	0.000
3	0.000	0.000	0.000	0.000
4	-0.000	-0.000	0.000	0.000
5	0.001	-0.001	-0.001	0.001
6	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.000	0.000
12	0.000	-0.000	-0.000	0.000
22	0.000	-0.000	-0.000	0.001
33	-0.010	0.000	0.057	0.058
47	0.000	0.000	0.000	0.000
65	0.000	-0.000	0.000	0.000
78	-0.002	0.002	-0.028	0.028
84	0.000	-0.000	0.000	0.000
114	0.000	0.000	0.000	0.000
128	-0.005	-0.004	0.027	0.028
137	0.000	0.000	0.000	0.000
153	-0.000	0.000	0.000	0.000
160	0.000	0.001	0.004	0.004
174	0.000	0.000	0.000	0.000
197	-0.000	0.000	-0.000	0.001
222	0.000	0.000	0.000	0.000
243	0.002	0.001	-0.004	0.004
269	0.000	0.000	-0.000	0.000
295	0.002	0.000	-0.001	0.002
321	-0.000	0.000	0.000	0.000
348	0.000	0.000	-0.000	0.000
378	0.000	0.000	0.000	0.000
409	-0.000	0.002	0.020	0.020
413	0.000	-0.003	0.007	0.008

434	-0.000	0.000	-0.000	0.000
450	-0.000	0.000	0.000	0.000
480	-0.000	0.000	-0.000	0.000
507	0.000	0.000	0.000	0.000
533	-0.002	0.000	-0.001	0.002
559	-0.000	0.000	-0.000	0.000
585	-0.001	0.002	-0.004	0.004
606	-0.000	0.000	0.000	0.000
631	0.001	0.001	-0.000	0.001
654	0.000	0.000	0.000	0.000
666	-0.000	0.001	0.004	0.004
675	0.000	0.000	0.000	0.000
691	-0.000	-0.000	0.000	0.000
698	0.005	-0.004	0.028	0.028
713	-0.000	0.000	0.000	0.000
744	-0.000	-0.000	0.000	0.000
749	0.002	0.002	-0.027	0.028
763	-0.000	-0.000	0.000	0.000
781	-0.000	0.000	0.000	0.000
794	0.010	0.000	0.056	0.057
806	-0.001	-0.001	-0.001	0.001
815	-0.001	-0.000	-0.002	0.002
818	-0.000	0.000	0.000	0.000
822	-0.000	0.000	-0.000	0.000
823	-0.001	-0.001	-0.001	0.002
824	-0.000	-0.000	0.000	0.000
825	-0.000	-0.000	0.000	0.000
826	-0.000	0.000	0.000	0.000
827	-0.000	-0.000	0.000	0.000

 TOT. -0.001 -0.001 0.137

Deformación máxima = 95 mm en el nudo 38

 DATOS BARRAS RÍGIDAS

Barra	Axial t	Torsor tm	M.max t	C.max kg/cm ²	Tensión	Ratio	Código	Pandeo
						?		
514	0.009	0.000	0.001	0.000	11.7	0.24	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
515	-0.006	0.000	0.002	0.000	-15.8	0.33	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
516	0.009	0.000	0.001	0.000	18.0	0.37	Ø50·5_TuboCarton	1.00
517	-0.009	0.000	0.002	0.000	-33.8	0.70	Ø50·5_TuboCarton	0.86
518	0.009	0.000	0.001	0.000	5.9	0.12	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
519	-0.010	0.000	0.002	0.000	-24.2	0.50	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
520	0.007	0.000	0.001	0.000	10.3	0.21	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
521	0.001	0.000	0.001	0.000	6.9	0.14	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
522	-0.000	0.000	0.000	0.000	-4.7	0.10	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83

523	0.003	0.000	0.001	0.000	9.4	0.19	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
524	0.007	0.000	0.002	0.000	16.2	0.33	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
525	-0.012	0.000	0.000	0.000	-3.1	0.06	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
526	-0.000	0.000	0.002	0.000	-18.6	0.38	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
527	-0.018	0.000	0.000	0.000	-3.3	0.07	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
528	-0.006	0.000	0.001	0.000	-10.1	0.21	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
529	-0.015	0.000	0.001	0.000	-12.0	0.25	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
535	-0.005	0.000	0.000	0.000	-108.5	0.21	Ø20·2_Cartón	0.11
545	-0.008	0.000	0.000	0.000	-343.6	0.65	Ø20·2_Cartón	0.04
558	-0.007	0.000	0.000	0.000	-425.1	0.81	Ø20·2_Cartón	0.02
559	0.006	0.000	0.000	0.000	70.8	0.05	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
560	0.067	0.000	0.000	0.000	8.9	0.01	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
561	0.012	0.000	0.000	0.001	202.6	0.14	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
562	0.090	0.000	0.000	0.002	156.6	0.11	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
563	0.232	0.000	0.000	0.003	303.6	0.21	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
564	0.151	0.000	0.000	0.000	237.4	0.16	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
565	0.111	0.000	0.000	0.000	149.0	0.10	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
566	0.007	0.000	0.000	0.000	186.3	0.13	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
567	0.005	0.000	0.000	0.000	63.8	0.04	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
568	0.068	0.000	0.000	0.000	6.5	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
569	-0.003	0.000	0.000	0.004	-5.4	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
570	0.021	0.000	0.000	0.000	3.9	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1049	-0.022	0.000	0.000	0.001	-4.6	0.09	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1050	-0.003	0.000	0.000	0.001	-2.6	0.05	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1051	-0.001	0.000	0.001	0.000	-7.2	0.15	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1052	-0.022	0.000	0.001	0.000	-7.4	0.15	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1053	0.005	0.000	0.002	0.000	16.7	0.35	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1054	-0.019	0.000	0.001	0.001	-7.0	0.14	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1055	-0.002	0.000	0.001	0.000	-13.5	0.28	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1056	-0.006	0.000	0.001	0.000	-8.8	0.18	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1057	0.005	0.000	0.000	0.000	2.2	0.05	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1058	-0.006	0.000	0.001	0.000	-6.8	0.14	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1059	-0.009	0.000	0.002	0.000	-16.1	0.33	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1060	0.009	0.000	0.001	0.000	11.2	0.23	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1061	-0.008	0.000	0.002	0.001	-30.3	0.63	Ø50·5_TuboCarton	0.86
1062	0.002	0.000	0.001	0.000	7.8	0.16	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1063	-0.013	0.000	0.002	0.000	-16.4	0.34	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
1064	0.008	0.000	0.001	0.000	17.8	0.37	Ø50·5_TuboCarton	1.00
1070	-0.005	0.000	0.000	0.000	-106.9	0.20	Ø20·2_Cartón	0.11
1080	-0.008	0.000	0.000	0.000	-340.1	0.64	Ø20·2_Cartón	0.04
1093	-0.007	0.000	0.000	0.000	-432.2	0.82	Ø20·2_Cartón	0.02
1094	0.006	0.000	0.000	0.000	67.1	0.05	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
1095	0.067	0.000	0.000	0.001	8.8	0.01	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1096	0.012	0.000	0.000	0.000	163.1	0.11	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
1097	0.088	0.000	0.000	0.002	154.9	0.11	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
1098	0.229	0.000	0.000	0.003	314.1	0.22	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
1099	-0.003	0.000	0.000	0.004	-5.3	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1100	0.021	0.000	0.000	0.000	3.8	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00

1634	-0.045	0.000	0.002	0.002	-24.7	0.51	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1635	0.022	0.000	0.002	0.003	23.5	0.48	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1636	0.003	0.000	0.002	0.000	19.8	0.41	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1637	-0.016	0.000	0.002	0.001	-20.0	0.41	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1638	0.007	0.000	0.002	0.001	15.6	0.32	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1639	-0.013	0.000	0.002	0.001	-20.7	0.43	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1640	0.005	0.000	0.003	0.001	31.5	0.65	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1641	-0.017	0.000	0.000	0.001	-5.4	0.11	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1642	0.012	0.000	0.003	0.000	27.2	0.56	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1643	-0.019	0.000	0.000	0.000	-5.5	0.11	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1644	-0.000	0.000	0.001	0.000	-5.9	0.12	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1645	0.003	0.000	0.002	0.000	17.7	0.37	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1646	-0.001	0.000	0.002	0.001	-22.7	0.47	Ø50·5_TuboCarton	0.86
1647	-0.005	0.000	0.001	0.000	-14.4	0.30	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1648	-0.027	0.000	0.002	0.000	-18.9	0.39	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
1649	0.016	0.000	0.001	0.001	20.4	0.42	Ø50·5_TuboCarton	1.00
1655	-0.003	0.000	0.000	0.000	-156.7	0.30	Ø20·2_Cartón	0.11
1665	-0.006	0.000	0.000	0.000	-338.7	0.64	Ø20·2_Cartón	0.04
1678	-0.004	0.000	0.000	0.000	-365.1	0.69	Ø20·2_Cartón	0.02
1679	0.009	0.000	0.000	0.002	251.1	0.17	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
1680	0.073	0.000	0.001	0.001	13.6	0.01	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1681	0.040	0.000	0.001	0.008	322.3	0.22	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
1682	0.142	0.000	0.001	0.012	543.9	0.37	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
1683	0.149	0.000	0.000	0.007	368.8	0.25	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
1684	0.052	0.000	0.000	0.001	6.6	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1685	0.071	0.000	0.000	0.002	9.8	0.01	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2212	-0.046	0.000	0.002	0.002	-25.3	0.52	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2213	0.022	0.000	0.002	0.003	24.1	0.50	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2214	0.002	0.000	0.002	0.001	20.6	0.42	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2215	-0.016	0.000	0.002	0.001	-20.4	0.42	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2216	0.007	0.000	0.002	0.001	15.6	0.32	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2217	-0.013	0.000	0.002	0.001	-21.2	0.44	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2218	0.005	0.000	0.003	0.000	31.9	0.66	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2219	-0.017	0.000	0.000	0.001	-5.1	0.11	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2220	0.012	0.000	0.003	0.000	27.9	0.57	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2221	-0.019	0.000	0.000	0.000	-5.4	0.11	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2222	-0.000	0.000	0.001	0.000	-6.5	0.13	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2223	0.003	0.000	0.002	0.000	17.8	0.37	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2224	-0.000	0.000	0.002	0.000	-22.1	0.46	Ø50·5_TuboCarton	0.86
2225	-0.006	0.000	0.001	0.000	-14.5	0.30	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2226	-0.027	0.000	0.002	0.000	-18.7	0.39	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
2227	0.016	0.000	0.001	0.001	20.3	0.42	Ø50·5_TuboCarton	1.00
2228	-0.013	0.000	0.002	0.000	-16.4	0.34	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
2229	0.008	0.000	0.001	0.000	17.8	0.37	Ø50·5_TuboCarton	1.00
2230	-0.007	0.000	0.002	0.001	-29.6	0.61	Ø50·5_TuboCarton	0.86
2231	0.002	0.000	0.001	0.000	8.1	0.17	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2232	-0.008	0.000	0.001	0.000	-15.0	0.31	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2233	0.006	0.000	0.000	0.000	3.1	0.06	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00

2234	-0.006	0.000	0.001	0.000	-6.3	0.13	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2235	-0.001	0.000	0.001	0.001	-13.5	0.28	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2236	-0.006	0.000	0.001	0.000	-8.3	0.17	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2237	0.004	0.000	0.002	0.000	16.2	0.33	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2238	-0.018	0.000	0.001	0.001	-7.0	0.14	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2239	-0.001	0.000	0.001	0.000	-6.6	0.14	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2240	-0.022	0.000	0.001	0.000	-7.3	0.15	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2241	-0.022	0.000	0.000	0.001	-4.3	0.09	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2242	-0.002	0.000	0.000	0.001	-2.4	0.05	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2248	-0.003	0.000	0.000	0.000	-157.4	0.30	Ø20·2_Cartón	0.11
2258	-0.007	0.000	0.000	0.000	-344.0	0.65	Ø20·2_Cartón	0.04
2271	-0.004	0.000	0.000	0.000	-366.9	0.70	Ø20·2_Cartón	0.02
2272	0.009	0.000	0.000	0.002	253.3	0.17	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
2273	0.073	0.000	0.001	0.001	13.7	0.01	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2274	0.040	0.000	0.001	0.008	320.4	0.22	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
2275	0.142	0.000	0.001	0.012	550.6	0.38	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
2276	0.163	0.000	0.000	0.007	394.4	0.27	ØTubo_Soporte_Membra	1.00
2277	0.052	0.000	0.000	0.001	6.6	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2278	0.071	0.000	0.000	0.002	10.0	0.01	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2279	0.014	0.000	0.001	0.000	8.5	0.18	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2280	0.015	0.000	0.000	0.000	3.0	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2281	-0.021	0.000	0.000	0.000	-3.3	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	0.93

TRACCIÓN MAXIMA EN LA MEMBRANA

Barra	Nudos	t/metro	kg/5cm	Ratio
2257	113-124	0.082	4.1	0.26

TRACCIÓN EN LOS POLI-CABLES

Cable	t	Ratio	Barras	Longitud (m)	Código
1	0.003	0.00	427-439	2.380	Cinta_Carga_50x3P...
3	0.003	0.00	961-973	2.380	Cinta_Carga_50x3P...
5	0.002	0.00	1559-1570	1.916	Cinta_Carga_50x3P...
8	0.002	0.00	1687-1715	4.859	Cinta_Carga_50x3P...
9	0.000	0.00	1716-1727	2.412	Cinta_Carga_50x3P...
10	0.003	0.00	1728-1740	2.288	Cinta_Carga_50x3P...
11	0.002	0.00	1741-1747	1.112	Cinta_Carga_50x3P...
12	0.002	0.00	2137-2148	1.916	Cinta_Carga_50x3P...
52	0.001	0.00	37-50	2.345	WEB30x3POLYE
53	0.002	0.00	440-451	1.916	Cinta_Carga_50x3P...
79	0.002	0.00	1102-1123	3.632	Cinta_Carga_50x3P...
84	0.002	0.00	1128-1130	0.522	WEB30x3POLYE
100	0.004	0.00	1146-1149	0.704	WEB30x3POLYE
135	0.002	0.00	2124-2136	2.379	Cinta_Carga_50x3P...

TRACCIÓN EN LOS CABLES SIMPLES

Bar	t	Ratio	Código
1	0.003	0.00	WEB30x3POLYE
2	0.003	0.00	WEB30x3POLYE
3	0.001	0.00	WEB30x3POLYE
4	0.001	0.00	WEB30x3POLYE
5	0.001	0.00	WEB30x3POLYE
6	0.001	0.00	WEB30x3POLYE
7	0.001	0.00	WEB30x3POLYE
8	0.001	0.00	WEB30x3POLYE
9	0.001	0.00	WEB30x3POLYE
10	0.006	0.00	WEB30x3POLYE
11	0.000	0.00	WEB30x3POLYE
12	0.000	0.00	WEB30x3POLYE
13	0.000	0.00	WEB30x3POLYE
14	0.000	0.00	WEB30x3POLYE
15	0.000	0.00	WEB30x3POLYE
16	0.000	0.00	WEB30x3POLYE
17	0.000	0.00	WEB30x3POLYE
18	0.000	0.00	WEB30x3POLYE
19	0.000	0.00	WEB30x3POLYE
20	0.000	0.00	WEB30x3POLYE
21	0.000	0.00	WEB30x3POLYE
22	0.000	0.00	WEB30x3POLYE
23	0.000	0.00	WEB30x3POLYE
24	0.000	0.00	WEB30x3POLYE
25	0.002	0.00	WEB30x3POLYE
26	0.003	0.00	WEB30x3POLYE
27	0.004	0.00	WEB30x3POLYE
28	0.005	0.00	WEB30x3POLYE
29	0.006	0.00	WEB30x3POLYE
30	0.002	0.00	WEB30x3POLYE
31	0.002	0.00	WEB30x3POLYE
32	0.002	0.00	WEB30x3POLYE
33	0.002	0.00	WEB30x3POLYE
34	0.002	0.00	WEB30x3POLYE
35	0.002	0.00	WEB30x3POLYE
36	0.003	0.00	WEB30x3POLYE
537	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
571	0.003	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
572	0.003	0.00	WEB30x3POLYE
573	0.000	0.00	WEB30x3POLYE
574	0.000	0.00	WEB30x3POLYE
575	0.000	0.00	WEB30x3POLYE
576	0.000	0.00	WEB30x3POLYE

Resultados Cubierta Exterior - Al aire libre

Viento X = 35 km/h Viento Y = 35 km/h Viento total = 49.5 km/h (Velocidad real)

Tipo de edificio = Cerrado, caras planas

Nieve = 0 kg/m² Superficie cubierta = 12.73 m² aprox.; Cn = 1.00

Presión interna = 0 kg/m²

Pretensado de la membrana = 0/0 %

Peso de los cables = 95.4 kg

Peso de los tubos = 78.3 kg

Peso de la membrana = 5.2 kg (29.10 m²)

RESULTADOS EN LOS NUDOS FIJOS

	(t)			
Nudo	Rx	Ry	Rz	R(total)
1	-0.003	-0.002	-0.003	0.005
2	-0.001	0.000	-0.001	0.002
3	-0.001	0.000	-0.001	0.002
4	-0.001	0.000	-0.001	0.002
5	-0.005	-0.004	-0.007	0.010
6	-0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	-0.000	0.000	0.000
12	-0.000	-0.001	-0.001	0.001
22	-0.003	-0.004	-0.002	0.005
33	0.007	-0.004	0.026	0.027
47	0.000	-0.000	0.000	0.000
65	-0.001	-0.001	-0.001	0.002
78	-0.004	0.004	0.013	0.014
84	0.000	-0.000	0.000	0.000
114	-0.002	-0.001	-0.003	0.004
129	0.009	-0.004	0.045	0.046
137	0.000	-0.000	0.000	0.000
153	-0.001	-0.000	-0.000	0.001
161	-0.002	-0.001	0.005	0.005
174	0.000	-0.000	0.000	0.000
197	0.001	0.001	-0.000	0.001
222	-0.000	0.000	-0.000	0.000
243	-0.004	0.002	-0.007	0.008
269	0.000	-0.000	0.000	0.000
295	-0.004	-0.000	-0.002	0.004
321	0.000	-0.000	0.000	0.000
348	-0.000	-0.000	0.000	0.000
378	-0.000	-0.000	0.000	0.000
394	-0.000	0.001	-0.007	0.007
415	-0.000	-0.010	0.050	0.051

419	0.000	-0.000	-0.006	0.006
450	0.000	-0.000	0.000	0.000
480	0.000	-0.000	0.000	0.000
507	-0.000	-0.000	0.000	0.000
533	0.004	-0.000	-0.002	0.005
559	-0.000	-0.000	0.000	0.000
585	0.002	0.003	-0.007	0.008
606	-0.000	-0.000	0.000	0.000
631	-0.002	0.003	-0.002	0.004
654	-0.000	-0.000	0.000	0.000
667	-0.001	-0.001	-0.011	0.011
675	-0.000	0.000	0.000	0.000
691	-0.000	-0.000	0.000	0.000
699	-0.008	-0.006	0.052	0.053
713	0.001	0.000	-0.006	0.006
744	-0.000	-0.000	0.000	0.000
749	-0.000	0.003	-0.009	0.010
763	0.000	-0.000	0.000	0.000
781	-0.000	-0.000	0.000	0.000
794	-0.012	-0.000	0.058	0.059
806	0.002	-0.003	-0.001	0.004
815	-0.001	-0.010	-0.007	0.013
818	-0.000	-0.000	0.000	0.000
822	-0.000	0.000	0.000	0.000
823	0.003	-0.000	-0.006	0.007
824	0.001	-0.004	-0.003	0.005
825	-0.000	-0.000	0.000	0.000
826	-0.000	0.000	0.000	0.000
827	-0.000	0.000	0.000	0.000
828	0.000	0.000	0.003	0.003
829	0.000	0.000	0.003	0.003
830	-0.005	0.003	-0.004	0.007
831	-0.009	-0.002	-0.006	0.011
832	-0.000	-0.003	-0.001	0.003
833	0.001	-0.018	-0.019	0.026

 TOT. -0.039 -0.058 0.131

Deformación máxima = 203 mm en el nudo 790

 DATOS BARRAS RÍGIDAS

Barra	Axial t	Torsor tm	M.max t	C.max kg/cm ²	Tensión	Ratio	Código	Pandeo
						?		
515	-0.011	0.000	0.000	0.000	-4.4	0.09	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
516	-0.006	0.000	0.000	0.000	-5.2	0.11	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
517	0.008	0.000	0.001	0.000	5.7	0.12	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00

518	0.002	0.000	0.001	0.000	10.6	0.22	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
519	0.000	0.000	0.000	0.000	0.7	0.02	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
520	-0.009	0.000	0.001	0.000	-8.7	0.18	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
521	-0.002	0.000	0.000	0.000	-1.2	0.02	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
522	-0.009	0.000	0.001	0.000	-6.0	0.12	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
523	-0.024	0.000	0.001	0.000	-13.4	0.28	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
524	-0.010	0.000	0.001	0.000	-8.2	0.17	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
525	0.005	0.000	0.001	0.000	11.0	0.23	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
526	-0.041	0.000	0.001	0.000	-11.4	0.24	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
527	-0.001	0.000	0.000	0.000	-3.6	0.07	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
528	-0.041	0.000	0.001	0.000	-11.3	0.23	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
529	-0.051	0.000	0.001	0.000	-10.2	0.21	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
530	0.007	0.000	0.001	0.000	6.2	0.13	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
536	-0.010	0.000	0.000	0.000	-137.4	0.26	Ø20·2_Cartón	0.11
546	-0.007	0.000	0.000	0.000	-279.1	0.53	Ø20·2_Cartón	0.04
559	-0.013	0.000	0.000	0.000	-682.2	1.29	Ø20·2_Cartón	0.02
560	-0.001	0.000	0.000	0.001	-38.9	0.03	ØTubo_Soporte_Membra	0.70
561	0.001	0.000	0.000	0.001	19.9	0.04	Ø20·2_Cartón	1.00
562	-0.003	0.000	0.000	0.001	-30.0	0.02	ØTubo_Soporte_Membra	0.89
563	-0.013	0.000	0.000	0.006	-298.8	0.21	ØTubo_Soporte_Membra	0.89
564	-0.008	0.000	0.000	0.000	-60.8	0.04	ØTubo_Soporte_Membra	0.89
565	-0.011	0.000	0.000	0.000	-61.9	0.04	ØTubo_Soporte_Membra	0.89
566	-0.015	0.000	0.000	0.001	-142.3	0.10	ØTubo_Soporte_Membra	0.89
567	-0.003	0.000	0.000	0.001	-66.4	0.05	ØTubo_Soporte_Membra	0.89
568	-0.001	0.000	0.000	0.001	-88.7	0.06	ØTubo_Soporte_Membra	0.70
569	0.002	0.000	0.000	0.000	11.5	0.02	Ø20·2_Cartón	1.00
570	-0.010	0.000	0.000	0.003	-42.6	0.08	Ø20·2_Cartón	0.97
571	0.005	0.000	0.000	0.003	32.0	0.06	Ø20·2_Cartón	1.00
1050	-0.046	0.000	0.001	0.003	-15.3	0.32	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1051	-0.005	0.000	0.001	0.003	-10.2	0.21	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1052	-0.007	0.000	0.000	0.001	-3.0	0.06	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1053	-0.042	0.000	0.000	0.001	-8.4	0.17	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1054	-0.001	0.001	0.001	0.000	-6.9	0.14	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1055	-0.041	0.000	0.000	0.000	-7.8	0.16	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1056	-0.030	0.000	0.001	0.001	-10.3	0.21	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1057	-0.010	0.000	0.000	0.001	-6.8	0.14	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1058	-0.001	0.000	0.000	0.001	-3.9	0.08	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1059	-0.010	0.000	0.000	0.001	-5.4	0.11	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1060	-0.008	0.000	0.001	0.001	-7.4	0.15	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1061	-0.001	0.000	0.000	0.001	-4.8	0.10	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1062	-0.002	0.000	0.001	0.001	-9.8	0.20	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1063	-0.001	0.000	0.000	0.001	-3.2	0.07	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1064	-0.006	0.000	0.000	0.000	-5.0	0.10	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
1065	0.003	0.000	0.000	0.000	5.0	0.10	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1071	-0.009	0.000	0.000	0.000	-143.6	0.27	Ø20·2_Cartón	0.11
1081	-0.013	0.000	0.000	0.000	-457.7	0.87	Ø20·2_Cartón	0.04
1094	-0.014	0.000	0.000	0.000	-730.5	1.39	Ø20·2_Cartón	0.02
1095	-0.001	0.000	0.000	0.001	-49.5	0.03	ØTubo_Soporte_Membra	0.70

1096	0.001	0.000	0.000	0.000	11.2	0.02	Ø20·2_Cartón	1.00
1097	-0.003	0.000	0.000	0.004	-150.1	0.10	ØTubo_Soporte_Membra	0.89
1098	-0.019	0.000	0.000	0.004	-193.2	0.13	ØTubo_Soporte_Membra	0.89
1099	-0.019	0.000	0.001	0.016	-618.9	0.43	ØTubo_Soporte_Membra	0.89
1100	-0.010	0.000	0.000	0.000	-26.6	0.05	Ø20·2_Cartón	0.97
1101	0.005	0.000	0.000	0.002	33.7	0.06	Ø20·2_Cartón	1.00
1636	-0.026	0.000	0.003	0.007	-31.1	0.64	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1637	-0.013	0.000	0.003	0.007	-27.8	0.57	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1638	-0.013	0.001	0.001	0.002	-9.2	0.19	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1639	-0.025	0.000	0.001	0.002	-11.0	0.23	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1640	-0.007	0.001	0.001	0.001	-6.8	0.14	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1641	-0.024	0.000	0.001	0.002	-8.5	0.18	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1642	-0.020	0.000	0.001	0.002	-10.0	0.21	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1643	-0.009	0.000	0.001	0.002	-7.4	0.15	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1644	-0.007	0.001	0.001	0.002	-9.7	0.20	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1645	-0.009	0.000	0.001	0.002	-8.0	0.16	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1646	-0.006	0.001	0.001	0.003	-12.8	0.26	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1647	-0.009	0.000	0.001	0.003	-10.9	0.23	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1648	-0.002	0.001	0.001	0.003	-11.8	0.24	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1649	-0.008	0.000	0.001	0.003	-11.2	0.23	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1650	-0.008	0.000	0.001	0.002	-6.6	0.14	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
1651	-0.003	0.001	0.001	0.002	-5.9	0.12	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.93
1657	-0.006	0.000	0.001	0.002	-273.4	0.52	Ø20·2_Cartón	0.11
1667	-0.017	0.000	0.001	0.001	-751.8	1.43	Ø20·2_Cartón	0.04
1680	-0.025	0.000	0.001	0.001	-1281.8	2.43	Ø20·2_Cartón	0.02
1681	-0.001	0.000	0.000	0.001	-145.0	0.10	ØTubo_Soporte_Membra	0.70
1682	0.001	0.000	0.001	0.001	101.9	0.19	Ø20·2_Cartón	1.00
1683	-0.003	0.000	0.000	0.007	-253.7	0.17	ØTubo_Soporte_Membra	0.89
1684	-0.013	0.000	0.002	0.026	-978.0	0.67	ØTubo_Soporte_Membra	0.89
1685	-0.018	0.000	0.002	0.034	-1270.1	0.87	ØTubo_Soporte_Membra	0.85
1686	-0.009	0.000	0.000	0.003	-48.1	0.09	Ø20·2_Cartón	0.97
1687	0.006	0.000	0.000	0.001	39.4	0.07	Ø20·2_Cartón	1.00
2214	-0.059	0.000	0.002	0.004	-24.1	0.50	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2215	0.010	0.000	0.002	0.004	18.1	0.37	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2216	-0.001	0.000	0.001	0.001	-9.1	0.19	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2217	-0.047	0.000	0.001	0.002	-14.6	0.30	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2218	0.002	0.000	0.001	0.001	8.3	0.17	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2219	-0.046	0.000	0.001	0.001	-13.2	0.27	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2220	-0.033	0.000	0.001	0.001	-13.3	0.27	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2221	-0.010	0.000	0.001	0.000	-6.3	0.13	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2222	-0.006	0.001	0.000	0.001	-5.5	0.11	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2223	-0.010	0.000	0.000	0.001	-4.8	0.10	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2224	-0.006	0.000	0.001	0.002	-9.9	0.20	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2225	-0.008	0.000	0.001	0.002	-8.7	0.18	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2226	-0.000	0.001	0.001	0.002	-8.9	0.18	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2227	-0.008	0.000	0.001	0.002	-8.7	0.18	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2228	-0.006	0.000	0.001	0.002	-6.6	0.14	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
2229	-0.002	0.001	0.001	0.002	-5.9	0.12	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.93

2230	-0.014	0.000	0.000	0.000	-4.6	0.09	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
2231	0.003	0.000	0.000	0.000	3.8	0.08	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2232	-0.000	0.000	0.001	0.000	-7.9	0.16	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2233	-0.010	0.000	0.000	0.000	-2.6	0.05	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2234	-0.009	0.000	0.001	0.000	-6.7	0.14	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2235	-0.011	0.000	0.000	0.000	-3.8	0.08	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2236	-0.010	0.000	0.001	0.000	-6.1	0.13	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2237	-0.021	0.000	0.001	0.000	-14.9	0.31	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2238	-0.011	0.000	0.001	0.000	-8.1	0.17	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2239	0.006	0.000	0.001	0.000	11.0	0.23	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2240	-0.039	0.000	0.001	0.000	-12.9	0.27	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2241	-0.000	0.000	0.001	0.000	-6.2	0.13	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2242	-0.040	0.000	0.001	0.000	-12.6	0.26	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2243	-0.053	0.000	0.001	0.000	-12.4	0.26	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2244	0.011	0.000	0.001	0.000	8.8	0.18	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2250	-0.010	0.000	0.001	0.001	-269.4	0.51	Ø20·2_Cartón	0.11
2260	0.000	0.000	0.001	0.001	258.0	0.49	Ø20·2_Cartón	1.00
2273	-0.013	0.000	0.001	0.001	-747.2	1.42	Ø20·2_Cartón	0.02
2274	-0.001	0.000	0.000	0.002	-268.6	0.18	ØTubo_Soporte_Membra	0.70
2275	0.001	0.000	0.001	0.004	117.2	0.22	Ø20·2_Cartón	1.00
2276	-0.003	0.000	0.001	0.011	-421.7	0.29	ØTubo_Soporte_Membra	0.89
2277	-0.006	0.000	0.002	0.023	-870.3	0.60	ØTubo_Soporte_Membra	0.89
2278	-0.004	0.000	0.001	0.017	-615.9	0.42	ØTubo_Soporte_Membra	0.89
2279	-0.010	0.000	0.000	0.002	-50.0	0.09	Ø20·2_Cartón	0.97
2280	0.006	0.000	0.000	0.002	39.0	0.07	Ø20·2_Cartón	1.00
2281	0.000	0.000	0.000	0.000	3.4	0.07	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2282	-0.006	0.000	0.000	0.000	-17.7	0.03	Ø20·2_Cartón	0.83
2283	-0.000	0.000	0.000	0.001	-41.6	0.08	Ø20·2_Cartón	0.83

TRACCIÓN MAXIMA EN LA MEMBRANA

Barra	Nudos	t/metro	kg/5cm	Ratio
1679	23-42	0.250	12.5	0.78

TRACCIÓN EN LOS POLI-CABLES

Cable	t	Ratio	Barras	Longitud (m)	Código
3	0.013	0.00	3-10	1.408	Cinta_Carga_50x3P...
4	0.000	0.00	11-22	2.412	Cinta_Carga_50x3P...
5	0.014	0.00	23-50	4.802	Cinta_Carga_50x3P...
6	0.005	0.00	427-439	2.399	Cinta_Carga_50x3P...
7	0.001	0.00	440-451	1.915	Cinta_Carga_50x3P...
10	0.000	0.00	574-585	2.412	Cinta_Carga_50x3P...
11	0.005	0.00	962-974	2.399	Cinta_Carga_50x3P...
12	0.001	0.00	975-986	1.917	Cinta_Carga_50x3P...

14	0.011	0.00	1144-1171	4.801	Cinta_Carga_50x3P...
15	0.005	0.00	1548-1560	2.377	Cinta_Carga_50x3P...
16	0.001	0.00	1561-1572	1.917	Cinta_Carga_50x3P...
19	0.002	0.00	1689-1717	4.865	Cinta_Carga_50x3P...
20	0.000	0.00	1718-1729	2.412	Cinta_Carga_50x3P...
21	0.012	0.00	1730-1742	2.288	Cinta_Carga_50x3P...
22	0.001	0.00	1743-1749	1.099	Cinta_Carga_50x3P...
23	0.004	0.00	2126-2138	2.399	Cinta_Carga_50x3P...
24	0.004	0.00	2139-2150	1.917	Cinta_Carga_50x3P...
28	0.004	0.00	1103-1131	4.865	Cinta_Carga_50x3P...

TRACCIÓN EN LOS CABLES SIMPLES

Bar	t	Ratio	Código
1	0.002	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2	0.002	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
538	0.001	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
572	0.002	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
573	0.002	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1073	0.001	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1102	0.001	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1132	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1133	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1134	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1135	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1136	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1137	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1138	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1139	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1140	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1141	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1142	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1143	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1659	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1688	0.001	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2252	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2284	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2286	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2287	0.027	0.01	Cinta_Carga_50x3POLYE
2288	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2289	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2290	0.009	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2291	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2292	0.013	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2293	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2294	0.004	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE

Resultados Cubierta Seccionada - Recinto cerrado

Viento X = 0 km/h Viento Y = 0 km/h Viento total = 0.0 km/h (Velocidad real)

Tipo de edificio = Cerrado, caras planas

Nieve = 0 kg/m² Superficie cubierta = 7.55 m² aprox.; Cn = 1.00

Presión interna = 0 kg/m²

Pretensado de la membrana = 0/0 %

Peso de los cables = 11.0 kg

Peso de los tubos = 80.7 kg

Peso de la membrana = 3.5 kg (19.74 m²)

RESULTADOS EN LOS NUDOS FIJOS

(t)				
Nudo	Rx	Ry	Rz	R(total)
1	-0.000	-0.002	0.003	0.003
4	0.000	0.002	0.013	0.013
88	-0.000	0.000	-0.000	0.000
89	0.000	0.000	-0.000	0.000
185	0.003	-0.003	0.017	0.017
187	-0.003	-0.003	0.017	0.017
258	0.000	0.002	0.002	0.003
260	-0.000	0.002	0.002	0.003
547	-0.000	0.000	-0.001	0.001
548	0.000	0.000	-0.001	0.001
834	0.001	-0.001	-0.020	0.020
836	-0.001	-0.001	-0.020	0.020
840	0.007	0.002	0.043	0.043
842	-0.007	0.002	0.043	0.043
TOT.	-0.000	0.000	0.095	

Deformación máxima = 34 mm en el nudo 303

DATOS BARRAS RÍGIDAS

Barra	Axial t	Torsor tm	M.max t	C.max kg/cm ²	Tensión	Ratio	Código	Pandeo
536	-0.003	0.000	0.001	0.000	-9.2	0.19	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
537	-0.014	0.000	0.001	0.000	-11.2	0.23	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
538	0.002	0.000	0.001	0.000	12.5	0.26	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
539	-0.017	0.000	0.001	0.000	-8.2	0.17	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
540	0.006	0.000	0.001	0.000	9.7	0.20	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
541	-0.016	0.000	0.000	0.000	-4.3	0.09	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
542	-0.004	0.000	0.000	0.000	-1.1	0.02	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
543	-0.005	0.000	0.001	0.000	-11.8	0.24	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87

544	-0.001	0.000	0.001	0.000	-9.2	0.19	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
545	-0.004	0.000	0.000	0.000	-1.5	0.03	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
546	-0.007	0.000	0.002	0.000	-16.1	0.33	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
547	0.003	0.000	0.001	0.000	8.0	0.17	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
548	-0.005	0.000	0.001	0.000	-19.0	0.39	Ø50·5_TuboCarton	0.86
549	-0.000	0.000	0.001	0.000	-10.6	0.22	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
550	-0.011	0.000	0.000	0.000	-6.6	0.14	Ø50·5_TuboCarton	0.94
551	-0.002	0.000	0.000	0.000	-4.2	0.09	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
552	-0.002	0.000	0.001	0.000	-12.6	0.26	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
553	0.001	0.000	0.001	0.000	8.5	0.01	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
554	0.003	0.000	0.001	0.000	5.4	0.11	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
555	-0.023	0.001	0.003	0.013	-47.8	0.03	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
556	0.008	0.000	0.002	0.007	25.3	0.02	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1092	-0.017	0.000	0.000	0.001	-5.3	0.11	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1093	-0.003	0.000	0.000	0.001	-4.3	0.09	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1094	0.002	0.000	0.000	0.000	4.0	0.08	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1095	-0.020	0.000	0.000	0.000	-4.1	0.08	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1096	0.004	0.000	0.001	0.000	10.7	0.22	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1097	-0.019	0.000	0.001	0.000	-10.4	0.22	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1098	-0.001	0.000	0.001	0.000	-7.5	0.16	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1099	-0.012	0.000	0.001	0.000	-12.8	0.26	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1100	0.002	0.000	0.000	0.000	1.2	0.03	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1101	-0.012	0.000	0.000	0.000	-4.4	0.09	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1102	-0.006	0.000	0.001	0.000	-10.3	0.21	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1103	-0.004	0.000	0.001	0.000	-18.2	0.38	Ø50·5_TuboCarton	0.86
1104	-0.007	0.000	0.001	0.001	-12.0	0.25	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
1105	-0.009	0.000	0.000	0.001	-8.0	0.16	Ø50·5_TuboCarton	0.94
1106	-0.001	0.000	0.001	0.001	-15.4	0.32	Ø50·5_TuboCarton	0.86
1107	-0.012	0.000	0.000	0.001	-7.5	0.15	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1108	-0.021	0.000	0.001	0.002	-16.6	0.34	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
1109	-0.001	0.000	0.001	0.002	-8.5	0.18	Ø50·5_TuboCarton	0.94
1110	-0.003	0.000	0.000	0.000	-5.4	0.11	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1111	-0.011	0.000	0.002	0.000	-18.3	0.38	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1112	-0.024	0.000	0.001	0.001	-8.0	0.16	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1113	0.008	0.000	0.002	0.001	20.3	0.42	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1114	0.006	0.000	0.002	0.000	22.6	0.47	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1115	-0.025	0.000	0.001	0.000	-9.2	0.19	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1116	-0.001	0.000	0.001	0.000	-11.0	0.23	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1117	-0.019	0.000	0.002	0.001	-19.8	0.41	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1118	-0.001	0.000	0.002	0.001	-15.6	0.32	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1119	-0.021	0.000	0.001	0.001	-13.0	0.27	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1120	-0.043	0.000	0.001	0.000	-16.4	0.34	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1121	0.019	0.000	0.001	0.000	14.9	0.31	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1122	0.002	0.000	0.000	0.001	7.0	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1123	0.001	0.000	0.001	0.002	14.3	0.01	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1124	-0.010	0.001	0.002	0.024	-30.7	0.02	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1125	0.003	0.000	0.001	0.013	16.3	0.01	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1661	-0.002	0.000	0.000	0.000	-4.2	0.09	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1662	-0.002	0.000	0.001	0.000	-12.5	0.26	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1663	-0.023	0.000	0.003	0.013	-47.8	0.03	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00

1664	0.008	0.000	0.002	0.007	25.3	0.02	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2200	-0.017	0.000	0.000	0.001	-5.3	0.11	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2201	-0.003	0.000	0.000	0.001	-4.3	0.09	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2202	0.001	0.000	0.000	0.000	4.0	0.08	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2203	-0.020	0.000	0.000	0.000	-4.1	0.08	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2204	0.004	0.000	0.001	0.000	10.6	0.22	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2205	-0.019	0.000	0.001	0.000	-10.5	0.22	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2206	-0.001	0.000	0.001	0.000	-7.5	0.16	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2207	-0.012	0.000	0.001	0.000	-12.8	0.26	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2208	0.002	0.000	0.000	0.000	1.2	0.02	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2209	-0.012	0.000	0.000	0.000	-4.3	0.09	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2210	-0.006	0.000	0.001	0.000	-10.2	0.21	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2211	-0.004	0.000	0.001	0.000	-18.1	0.37	Ø50·5_TuboCarton	0.86
2212	-0.007	0.000	0.001	0.001	-12.0	0.25	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
2213	-0.009	0.000	0.000	0.001	-7.9	0.16	Ø50·5_TuboCarton	0.94
2214	-0.001	0.000	0.001	0.001	-15.4	0.32	Ø50·5_TuboCarton	0.86
2215	-0.012	0.000	0.000	0.001	-7.5	0.15	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2216	-0.021	0.000	0.001	0.002	-16.6	0.34	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
2217	-0.001	0.000	0.001	0.002	-8.6	0.18	Ø50·5_TuboCarton	0.94
2218	-0.003	0.000	0.000	0.000	-5.4	0.11	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2219	-0.011	0.000	0.002	0.000	-18.3	0.38	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2220	-0.024	0.000	0.000	0.001	-7.7	0.16	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2221	0.008	0.000	0.002	0.001	20.2	0.42	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2222	0.006	0.000	0.002	0.000	22.6	0.47	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2223	-0.025	0.000	0.001	0.000	-9.3	0.19	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2224	-0.001	0.000	0.001	0.001	-11.2	0.23	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2225	-0.019	0.000	0.002	0.001	-20.0	0.41	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2226	-0.001	0.000	0.002	0.001	-15.5	0.32	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2227	-0.021	0.000	0.001	0.001	-12.7	0.26	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2228	-0.043	0.000	0.001	0.001	-16.5	0.34	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2229	0.019	0.000	0.001	0.001	15.0	0.31	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2230	0.002	0.000	0.000	0.002	6.9	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2231	0.001	0.000	0.001	0.002	14.3	0.01	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2232	-0.010	0.001	0.002	0.024	-30.6	0.02	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2233	0.003	0.000	0.001	0.013	16.3	0.01	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2234	-0.001	0.000	0.001	0.000	-240.8	0.46	Ø20·2_Cartón	0.02
2235	-0.001	0.000	0.000	0.000	-168.3	0.32	Ø20·2_Cartón	0.04
2236	-0.001	0.000	0.000	0.000	-79.8	0.15	Ø20·2_Cartón	0.11
2237	-0.001	0.000	0.000	0.000	-56.3	0.11	Ø20·2_Cartón	0.11
2238	-0.001	0.000	0.000	0.000	-55.4	0.11	Ø20·2_Cartón	0.11
2239	-0.001	0.000	0.000	0.000	-79.6	0.15	Ø20·2_Cartón	0.11
2240	-0.001	0.000	0.001	0.000	-223.9	0.42	Ø20·2_Cartón	0.02
2241	-0.001	0.000	0.000	0.000	-154.6	0.29	Ø20·2_Cartón	0.04
2242	-0.001	0.000	0.001	0.000	-222.5	0.42	Ø20·2_Cartón	0.02
2243	-0.001	0.000	0.000	0.000	-153.6	0.29	Ø20·2_Cartón	0.04
2244	-0.001	0.000	0.000	0.000	-168.8	0.32	Ø20·2_Cartón	0.04
2245	-0.001	0.000	0.001	0.000	-239.3	0.45	Ø20·2_Cartón	0.02

TRACCIÓN MAXIMA EN LA MEMBRANA

Barra	Nudos	t/metro	kg/5cm	Ratio
2196	685-691	0.007	0.3	0.02

TRACCIÓN EN LOS POLI-CABLES

Cable	t	Ratio	Barras	Longitud (m)	Código
2	0.004	0.00	2-36	5.208	Cinta_Carga_50x3P...
3	0.001	0.00	37-70	5.152	Cinta_Carga_50x3P...
5	0.002	0.00	558-592	5.208	Cinta_Carga_50x3P...
6	0.001	0.00	593-626	5.153	Cinta_Carga_50x3P...
8	0.004	0.00	1127-1161	5.208	Cinta_Carga_50x3P...
9	0.001	0.00	1162-1195	5.152	Cinta_Carga_50x3P...
11	0.002	0.00	1666-1700	5.208	Cinta_Carga_50x3P...
12	0.001	0.00	1701-1734	5.153	Cinta_Carga_50x3P...
13	0.001	0.00	448-472	3.696	Cinta_Carga_50x3P...
14	0.001	0.00	1004-1028	3.697	Cinta_Carga_50x3P...
15	0.001	0.00	1573-1597	3.696	Cinta_Carga_50x3P...
16	0.001	0.00	2112-2136	3.697	Cinta_Carga_50x3P...

TRACCIÓN EN LOS CABLES SIMPLES

Bar	t	Ratio	Código
1	0.004	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
557	0.002	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1126	0.004	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1665	0.002	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE

Resultados Cubierta Seccionada - Al aire libre

Viento X = 35.33 km/h Viento Y = 35.33 km/h Viento total = 50.0 km/h (Velocidad)

Tipo de edificio = Cerrado, caras planas

Nieve = 0 kg/m² Superficie cubierta = 7.32 m² aprox.; Cn = 1.00

Presión interna = 0 kg/m²

Pretensado de la membrana = 0/0 %

Peso de los cables = 16.7 kg

Peso de los tubos = 80.7 kg

Peso de la membrana = 3.5 kg (19.74 m²)

RESULTADOS EN LOS NUDOS FIJOS

Nudo	Rx	Ry	Rz	R(total)
1	-0.008	0.005	-0.011	0.015
2	0.000	0.000	0.001	0.001
3	-0.000	-0.013	0.058	0.060
6	0.003	0.021	-0.021	0.030
90	-0.003	0.002	-0.020	0.020
91	-0.000	0.004	-0.019	0.020
187	0.008	-0.009	0.046	0.047
189	-0.010	-0.008	0.059	0.060
260	-0.024	-0.006	-0.002	0.025
262	0.016	0.010	-0.029	0.035
428	-0.005	-0.001	-0.005	0.007
429	0.000	0.000	0.001	0.001
551	-0.004	0.008	-0.012	0.015
552	0.002	0.004	-0.018	0.019
838	-0.005	-0.022	-0.011	0.025
840	0.002	-0.032	-0.029	0.043
844	0.008	0.006	0.041	0.042
846	-0.013	0.006	0.074	0.075
848	-0.000	-0.005	-0.006	0.008
849	0.001	-0.016	-0.018	0.024
TOT.	-0.030	-0.045	0.075	

Deformación máxima = 90 mm en el nudo 452

DATOS BARRAS RÍGIDAS

Barra	Axial	Torsor	M.max	C.max	Tensión	Ratio	Código	Pandeo
t	tm	tm	t	kg/cm ²		?		

536	-0.059	0.000	0.000	0.000	-7.0	0.14	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
537	0.002	0.000	0.000	0.000	1.2	0.02	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
538	0.002	0.000	0.000	0.000	5.0	0.10	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
539	-0.058	0.000	0.000	0.000	-9.9	0.20	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
540	0.004	0.000	0.001	0.000	14.0	0.29	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
541	-0.051	0.000	0.003	0.000	-29.1	0.60	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
542	-0.018	0.000	0.001	0.000	-7.8	0.16	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
543	-0.027	0.000	0.003	0.000	-34.5	0.71	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
544	-0.006	0.000	0.000	0.000	-3.5	0.07	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
545	-0.027	0.000	0.002	0.000	-25.1	0.52	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
546	-0.006	0.000	0.001	0.000	-14.6	0.30	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
547	-0.024	0.000	0.004	0.000	-36.3	0.75	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
548	-0.002	0.000	0.001	0.001	-21.8	0.45	Ø50·5_TuboCarton	0.86
549	0.006	0.000	0.000	0.001	2.9	0.06	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
550	-0.027	0.000	0.001	0.001	-20.6	0.43	Ø50·5_TuboCarton	0.94
551	-0.018	0.000	0.002	0.001	-19.1	0.39	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
552	-0.027	0.000	0.004	0.004	-40.1	0.83	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
553	0.005	0.000	0.006	0.005	93.2	0.06	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
554	-0.008	0.000	0.003	0.001	-26.8	0.55	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
555	-0.036	0.001	0.005	0.015	-69.1	0.05	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
556	-0.014	0.000	0.000	0.005	-6.4	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1092	-0.047	0.000	0.001	0.003	-18.7	0.39	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1093	-0.017	0.000	0.001	0.003	-16.1	0.33	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1094	0.001	0.000	0.001	0.003	18.6	0.38	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1095	-0.062	0.000	0.004	0.003	-42.3	0.87	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1096	0.004	0.000	0.001	0.003	13.0	0.27	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1097	-0.051	0.000	0.005	0.005	-56.4	1.16	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1098	-0.007	0.000	0.001	0.002	-11.5	0.24	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1099	-0.039	0.000	0.005	0.002	-48.4	1.00	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1100	0.002	0.000	0.001	0.002	7.0	0.14	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1101	-0.034	0.000	0.004	0.002	-37.7	0.78	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1102	-0.004	0.000	0.002	0.004	-15.6	0.32	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1103	0.001	0.001	0.001	0.000	20.1	0.41	Ø50·5_TuboCarton	1.00
1104	-0.012	0.002	0.002	0.007	-23.1	0.48	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
1105	-0.015	0.000	0.002	0.008	-34.3	0.71	Ø50·5_TuboCarton	0.94
1106	-0.004	0.000	0.001	0.001	-22.4	0.46	Ø50·5_TuboCarton	0.86
1107	-0.019	0.000	0.001	0.003	-15.6	0.32	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1108	-0.020	0.001	0.003	0.009	-29.6	0.61	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
1109	-0.014	0.000	0.003	0.011	-46.1	0.95	Ø50·5_TuboCarton	0.94
1110	-0.006	0.001	0.001	0.002	-9.5	0.20	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1111	-0.016	0.000	0.003	0.002	-28.1	0.58	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1112	-0.028	0.000	0.002	0.005	-24.3	0.50	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1113	0.004	0.000	0.002	0.005	22.7	0.47	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1114	-0.005	0.001	0.002	0.003	-19.6	0.40	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1115	-0.028	0.000	0.002	0.003	-24.8	0.51	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1116	0.001	0.000	0.001	0.003	13.5	0.28	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
1117	-0.034	0.000	0.004	0.004	-39.8	0.82	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1118	-0.000	0.000	0.003	0.007	-30.3	0.63	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83

1119	-0.043	0.000	0.003	0.008	-37.1	0.77	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1120	-0.042	0.000	0.002	0.006	-26.8	0.55	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
1121	-0.004	0.000	0.002	0.006	-22.1	0.46	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1122	0.004	0.000	0.006	0.027	100.2	0.07	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1123	0.003	0.000	0.004	0.013	76.5	0.05	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1124	-0.014	0.003	0.003	0.012	-44.1	0.03	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1125	-0.009	0.000	0.000	0.001	-6.0	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1661	-0.019	0.000	0.002	0.000	-23.6	0.49	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1662	-0.034	0.000	0.004	0.002	-40.1	0.83	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
1663	-0.036	0.002	0.005	0.013	-68.1	0.05	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
1664	-0.014	0.000	0.000	0.003	-7.0	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2200	-0.060	0.000	0.001	0.001	-11.0	0.23	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2201	0.009	0.000	0.001	0.000	6.1	0.13	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2202	0.003	0.000	0.001	0.000	10.5	0.22	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2203	-0.051	0.000	0.000	0.000	-5.6	0.12	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2204	0.004	0.000	0.002	0.000	15.5	0.32	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2205	-0.043	0.000	0.003	0.000	-32.5	0.67	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2206	-0.006	0.000	0.001	0.001	-13.5	0.28	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2207	-0.032	0.000	0.003	0.001	-34.0	0.70	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2208	-0.010	0.000	0.000	0.000	-6.0	0.12	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2209	-0.031	0.000	0.002	0.000	-24.8	0.51	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2210	-0.005	0.000	0.001	0.002	-12.7	0.26	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2211	-0.001	0.001	0.002	0.001	-25.9	0.53	Ø50·5_TuboCarton	0.86
2212	-0.012	0.001	0.002	0.006	-20.7	0.43	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
2213	-0.019	0.000	0.002	0.007	-32.0	0.66	Ø50·5_TuboCarton	0.94
2214	-0.004	0.000	0.002	0.002	-28.4	0.59	Ø50·5_TuboCarton	0.86
2215	-0.018	0.000	0.002	0.004	-19.6	0.40	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2216	-0.020	0.002	0.004	0.011	-35.6	0.73	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.91
2217	-0.013	0.000	0.004	0.013	-53.2	1.10	Ø50·5_TuboCarton	0.94
2218	-0.007	0.001	0.001	0.003	-14.8	0.30	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2219	-0.020	0.000	0.003	0.003	-32.7	0.67	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2220	-0.029	0.000	0.001	0.003	-15.6	0.32	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2221	-0.001	0.000	0.001	0.003	-17.6	0.36	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2222	-0.019	0.000	0.002	0.003	-26.9	0.55	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2223	-0.030	0.000	0.002	0.004	-24.0	0.50	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2224	0.001	0.000	0.002	0.000	15.0	0.31	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2225	-0.050	0.000	0.002	0.001	-27.1	0.56	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2226	0.001	0.000	0.002	0.004	21.2	0.44	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2227	-0.053	0.000	0.002	0.005	-24.6	0.51	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.87
2228	-0.075	0.000	0.001	0.003	-24.6	0.51	Ø50·10_Tubos_CartDob	0.83
2229	0.021	0.000	0.001	0.003	19.4	0.40	Ø50·10_Tubos_CartDob	1.00
2230	0.005	0.000	0.005	0.023	82.1	0.06	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2231	0.004	0.000	0.008	0.002	122.7	0.08	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2232	-0.024	0.003	0.008	0.013	-94.2	0.06	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2233	-0.009	0.000	0.000	0.001	-5.2	0.00	Ø40_Tubp_AnillosCusp	1.00
2234	-0.008	0.000	0.001	0.000	-532.7	1.01	Ø20·2_Cartón	0.02
2235	-0.000	0.000	0.001	0.001	-258.1	0.49	Ø20·2_Cartón	0.04
2236	-0.002	0.000	0.001	0.001	-285.6	0.54	Ø20·2_Cartón	0.11

2237	-0.005	0.000	0.000	0.000	-113.4	0.21	Ø20-2_Cartón	0.11
2238	-0.004	0.000	0.000	0.000	-72.7	0.14	Ø20-2_Cartón	0.11
2239	-0.004	0.000	0.001	0.001	-264.3	0.50	Ø20-2_Cartón	0.11
2240	-0.003	0.000	0.001	0.000	-344.5	0.65	Ø20-2_Cartón	0.02
2241	0.004	0.000	0.000	0.000	152.2	0.29	Ø20-2_Cartón	1.00
2242	-0.003	0.000	0.001	0.000	-311.8	0.59	Ø20-2_Cartón	0.02
2243	0.012	0.000	0.000	0.000	156.5	0.30	Ø20-2_Cartón	1.00
2244	0.013	0.000	0.001	0.001	211.0	0.40	Ø20-2_Cartón	1.00
2245	-0.003	0.000	0.001	0.000	-349.4	0.66	Ø20-2_Cartón	0.02

TRACCIÓN MAXIMA EN LA MEMBRANA

Barra	Nudos	t/metro	kg/5cm	Ratio
1735	811-840	0.068	3.4	0.21

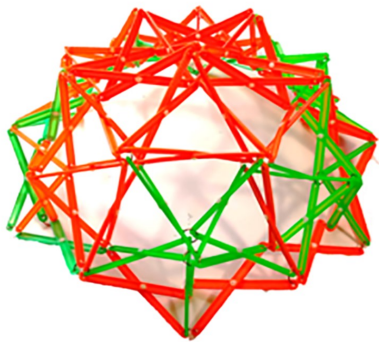
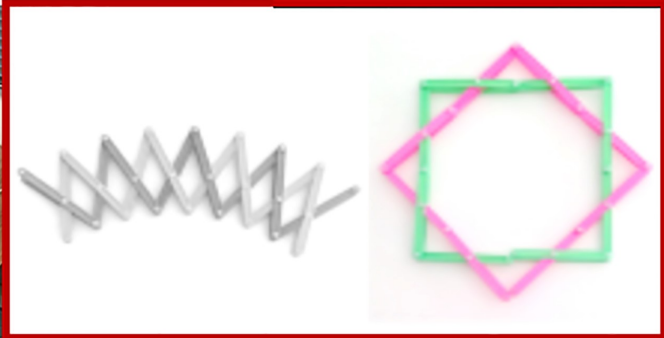
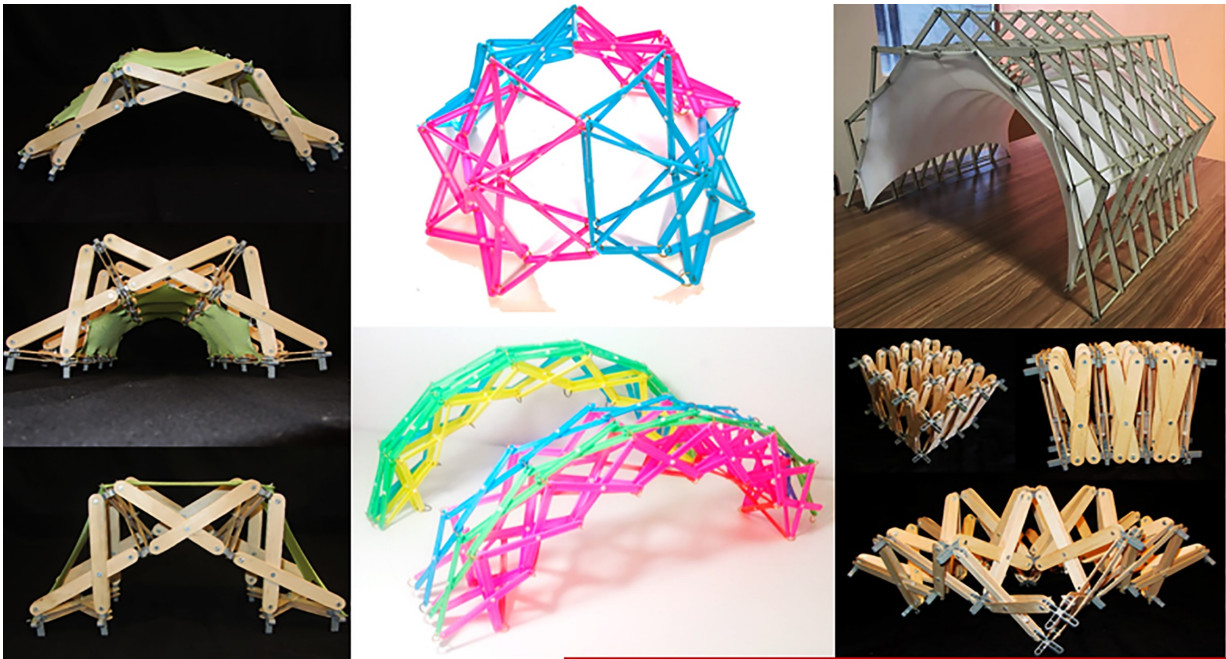
TRACCIÓN EN LOS POLI-CABLES

Cable	t	Ratio	Barras	Longitud (m)	Código
2	0.033	0.01	2-36	5.209	Cinta_Carga_50x3P...
3	0.023	0.01	37-70	5.153	Cinta_Carga_50x3P...
5	0.016	0.00	558-592	5.209	Cinta_Carga_50x3P...
6	0.014	0.00	593-626	5.154	Cinta_Carga_50x3P...
8	0.034	0.01	1127-1161	5.209	Cinta_Carga_50x3P...
9	0.020	0.01	1162-1195	5.152	Cinta_Carga_50x3P...
11	0.025	0.01	1666-1700	5.209	Cinta_Carga_50x3P...
12	0.020	0.01	1701-1734	5.154	Cinta_Carga_50x3P...
13	0.010	0.00	448-472	3.697	Cinta_Carga_50x3P...
14	0.008	0.00	1004-1028	3.697	Cinta_Carga_50x3P...
15	0.010	0.00	1573-1597	3.697	Cinta_Carga_50x3P...
16	0.009	0.00	2112-2136	3.697	Cinta_Carga_50x3P...
23	0.007	0.00	2252,2253	5.741	Cinta_Carga_50x3P...
24	0.008	0.00	2254,2255	5.900	Cinta_Carga_50x3P...

TRACCIÓN EN LOS CABLES SIMPLES

Bar	t	Ratio	Código
1	0.033	0.01	Cinta_Carga_50x3POLYE
557	0.015	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
1126	0.034	0.01	Cinta_Carga_50x3POLYE
1665	0.025	0.01	Cinta_Carga_50x3POLYE
2246	0.024	0.01	Cinta_Carga_50x3POLYE
2247	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2248	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2249	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE

2250	0.000	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE
2251	0.015	0.00	Cinta_Carga_50x3POLYE



ANEXO 3

