



○ DE ESTRUCTURAS  
DESPLIEGABLES CON  
Z  
W  
S BARRAS  
D RECTAS ARTICULADAS

## DISEÑO DE ESTRUCTURAS DESPLEGABLES CON BARRAS RECTAS ARTICULADAS

Casos de Estudio. Grupo de Investigación SMiA.

Autor: Omar Fabrisio Avellaneda Lopez  
Profesor Asociado de la ETSAB – Universidad Politécnica de Cataluña

El presente artículo describe el desarrollo de estructuras desplegables, presentando un caso de estudio realizado como prototipo a escala real, apoyado en el diseño computacional y la fabricación digital: el Pabellón Vértex en el campus de la universidad de Monterrey, Méjico. Para la construcción del mismo se han utilizado principalmente barras de madera, tubos de PVC y cubiertas textiles. El caso de estudio presentado es uno de los realizados en el marco de la investigación y tesis doctoral de Omar Avellaneda, miembro y co-fundador del grupo de investigación SMiA.

La fabricación y el montaje del prototipo fueron realizados con el apoyo de los alumnos de la Escuela de Arquitectura, Arte y Diseño (EAAD) del Tecnológico de Monterrey, campus Monterrey, como

parte de una invitación para impartir el taller sobre Estructuras Desplegables. El taller se realizó en coordinación con el arquitecto Juan Talamás, miembro del grupo de investigación SMiA y profesor de la escuela de arquitectura.

El grupo de Investigación SMiA (Structural Morphology in Architecture) pertenece al Laboratorio de Innovación y Tecnología en la Arquitectura (LiTA) de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura del Vallés (ETSAV). Somos un grupo de arquitectos y diseñadores en el campo de las estructuras ligeras, modulares y transformables. Nuestro trabajo se enfoca en el uso de nuevas estrategias de diseño para las estructuras ligeras aplicadas a la arquitectura. Con el uso de herramientas tales como el diseño paramétrico y la fabricación digital, buscamos explorar y expandir

las fronteras en la arquitectura transformable. Nos especializamos en el diseño, análisis y construcción de estructuras desplegables, basadas en el sistema tipo tijera o barras articuladas. Este tipo de estructuras se caracterizan por sus ventajas constructivas y estructurales como:

- Bajo peso y economía de costo.
- Cubrir grandes luces.
- Rápida ejecución.
- Elementos modulares que facilitan los procesos de fabricación y ensamblaje.
- Ahorro en mano de obra y trabajo in situ.
- Reutilización de la estructura.
- Estructuras efímeras y permanentes.
- Adaptabilidad y uso responsable del suelo.
- Transportable y almacenable.

El objetivo principal de nuestras investigaciones es, ofrecer a través de la morfología estructural, nuevas alternativas de diseño que permitan el desarrollo de aplicaciones arquitectónicas orientadas hacia la construcción ligera y la arquitectura transformable. Para ello, se han realizado exploraciones constructivas aplicando el sistema tipo tijera en diferentes propuestas arquitectónicas a nivel de prototipo, permitiendo desarrollar las uniones con un alto grado de detalle y validar las ventajas anteriormente mencionadas.



MODELOS A ESCALA DESARROLLADOS POR LOS ESTUDIANTES DEL MASTER EN ARQUITECTURA DE LA NOTTINGHAM TRENT UNIVERSITY (UK) EN UNO DE LOS WORKSHOPS IMPARTIDOS POR EL GRUPO DE INVESTIGACIÓN SMiA.



Nuestro equipo de investigación encuentra su inspiración en las geometrías complejas y en la morfología estructural, aplicadas a la arquitectura. Creemos en la formación temprana sobre las estructuras ligeras y transformables en los cursos de pregrado, estimulando a arquitectos y diseñadores a un uso racional y sostenible de los sistemas constructivos ligeros y espaciales. Arquitectos como Emilio Pérez Piñero y Félix Escrig han inspirado nuestro trabajo hacia una arquitectura adaptable y transformable. Escrig escribió en su libro "Modular, Ligero, Transformable. Un paseo por la arquitectura ligera móvil" sobre la importancia de construir maquetas y prototipos con estructuras desplegables y la importancia en la enseñanza y difusión de este tipo de estructuras, para su aplicación en la arquitectura .

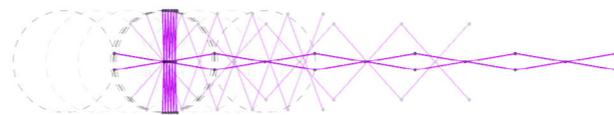
### Diseño paramétrico de las estructuras desplegables

Las Estructuras Desplegables con Barras Rectas Articuladas (EDBRA), son sistemas desplegables formados por unidades simples de un par de barras articuladas en su centro y unidas en sus extremos a más unidades para formar sistemas o módulos. La agrupación de módulos da como resultado sistemas desplegables complejos.

Los sistemas desplegables han evolucionado en los últimos años con el avance de programas en diseño paramétrico, permitiendo que la modelación y pruebas de movimiento sean mucho más rápidas que antes. De esta manera es posible modelar sistemas desplegables complejos en corto tiempo. El diseño de movimiento implica tener una comprensión geométrica y espacial mucho más allá de los sólidos platónicos y de los polígonos y poliedros regulares.

La posibilidad de diseñar un sistema desplegable complejo mediante un código o algoritmo que permite modificar todas las variables necesarias, facilita el camino para experimentar con estos

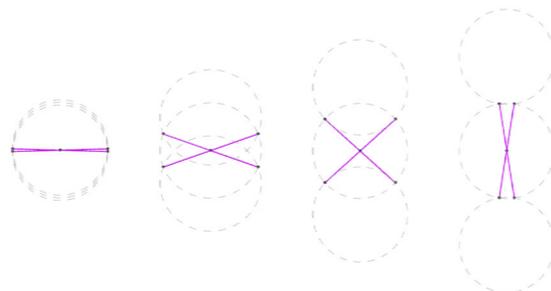
sistemas.



ESQUEMA GEOMÉTRICO DE UN SISTEMA DESPLEGABLE CON BARRAS RECTAS

### Unidad Simple

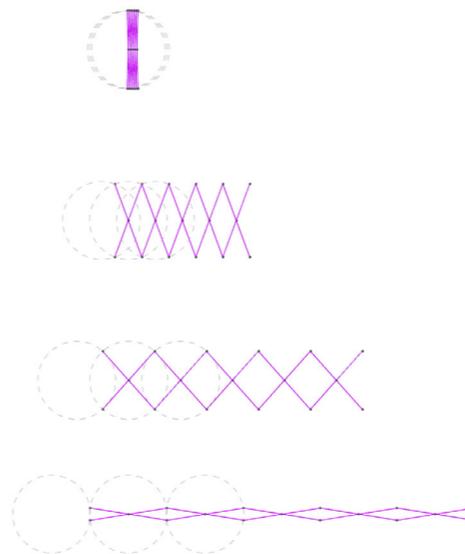
Las EDBRA son sistemas desplegables formados por una unidad simple de dos pares de barras rectas articuladas en su centro. Esta articulación central simétrica es la que hace que sus barras giren respecto a su centro marcando un recorrido circular. Los círculos que están inscritos en los extremos de cada barra se desplazan constantemente manteniendo el mismo eje central de su articulación. La intersección entre los círculos garantiza la longitud de las barras. A este conjunto lo llamaremos Unidad Simple.



DESARROLLO GEOMÉTRICO DE UNA UNIDAD SIMPLE DESPLEGABLE

### Sistemas Axiales Rectos

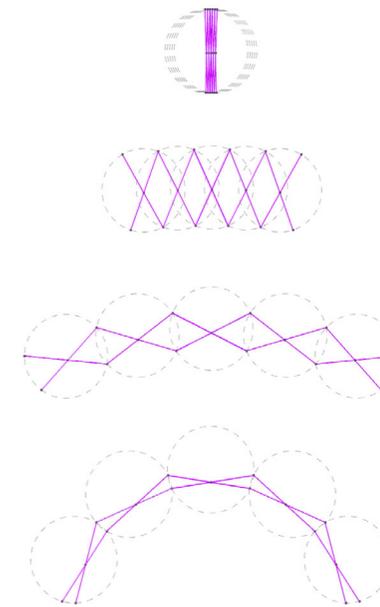
La agrupación de unidades simples con articulación en su centro construye un sistema desplegable lineal simple. El movimiento de una EDBRA lineal simple es vectorial. El sistema se alarga y llegará a su máxima longitud cuando los ejes a, b y c verticales se encuentren más alejados. En esta posición, el sistema logrará su máxima apertura.



SISTEMA AXIAL RECTO

### Sistemas Axiales Curvos

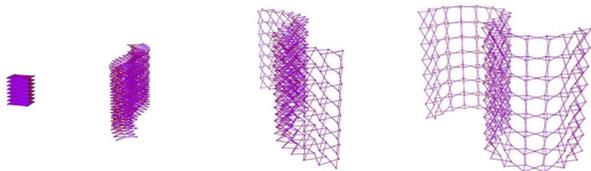
La agrupación de unidades simples con centros asimétricos construye un sistema desplegable lineal curvo simple. El movimiento de una EDBRA lineal curvo simple es polar. Recordamos que cada unidad simple asimétrica tiene un ángulo de referencia que cambia según la rotación de sus barras. La agrupación de la misma unidad asimétrica hace que todas las unidades tengan el mismo centro del ángulo de referencia como se observa en la siguiente figura.



SISTEMA AXIAL CURVO

### Sistemas Biaxiales

Los sistemas biaxiales son los formados por unidades simples conectadas en dos direcciones o vectores de movimiento. La trayectoria geométrica que recorren los vectores de movimiento puede ser lineal recto o lineal curvo, y dependerá del patrón de combinación dado por las unidades simples. Los sistemas biaxiales pueden conformar superficies planas, monocásticas, sinclásticas y anticlásticas.



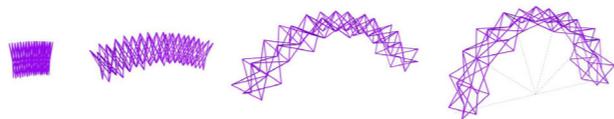
SISTEMA DESPLEGABLE BIAxIAL. PROCESO DE DESPLIEGUE

### Sistemas Triaxiales.

Los sistemas triaxiales están formados por unidades simples agrupadas en tres direcciones o vectores de movimiento. La trayectoria geométrica que recorren los vectores de movimiento puede ser lineal recta o lineal curva. Esto dependerá del patrón de combinación dado por las unidades simples. Los sistemas triaxiales pueden conformar superficies planas, monocásticas, sinclásticas y anticlásticas. Son los sistemas más complejos de agrupar, ya que, dependiendo del patrón o geometría, pueden tener restricciones parciales o totales de movimiento.

Para definir los parámetros de diseño de las unidades simples debemos partir de los polígonos desplegados y de sus posibles agrupaciones. En este caso partiremos del polígono desplegable

mínimo que es el triángulo, de modo de obtener un módulo triaxial desplegable con sección triangular.

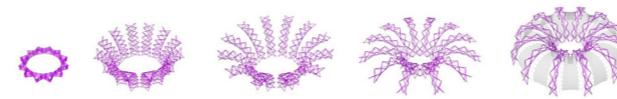


SISTEMA DESPLEGABLE TRIAXIAL. PROCESO DE DESPLIEGUE. ARCO MÓDULOS HEXAGONALES.

### Sistemas desplegables especiales

Para la conformación de las EDBRA compuestas por sistemas desplegables, será necesario elegir uno de los sistemas desplegables vistos, que se utilizará como un módulo compuesto o elemento constructivo para agrupar.

Lo primero es definir las EDBRA como un sistema compuesto. Esto quiere decir que la estructura estará formada por dos, tres o más sistemas desplegables con compatibilidad de movimiento y se modularán según la geometría y búsqueda de la forma, siempre buscando una aplicación arquitectónica. El objetivo es usar los sistemas desplegables como elementos constructivos y modularlos para formar una estructura desplegable compuesta que se pliegue por partes. Según la cantidad de sistemas desplegables agrupados, se abre un abanico de posibilidades y agrupaciones espaciales para explorar. Como se mencionó anteriormente, la idea es diseñar estructuras desplegables espaciales con aplicaciones arquitectónicas y, el sistema desplegable ideal para iniciar esta exploración es, el arco desplegable. Recordemos que tenemos tres tipos de arcos desplegables, uno biaxial y dos triaxiales.



SISTEMA DESPLEGABLE ESPECIAL. PROCESO DE DESPLIEGUE. TORUS.

### Caso de estudio: Sistemas Desplegables Abiertos

Los sistemas desplegables abiertos son estructuras que requieren de elementos adicionales al sistema para estar en equilibrio en su estado de uso o despliegue. Es decir, que no son auto portantes cuando están desplegadas en su posición final y por lo tanto requieren de elementos adicionales como barras, cables o, en algunos casos, textiles, para estar en equilibrio. El caso de estudio que presentamos (Pabellón Vértex), está formado por arcos desplegables de sección triangular que, orientados con determinada geometría, forman una estructura desplegable.

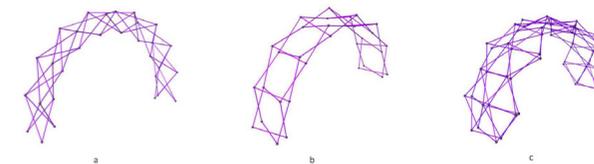
A continuación, describiremos la construcción geométrica y el diseño paramétrico del arco desplegable con sus agrupaciones. Se aplicarán condiciones básicas de contorno para el análisis de tensiones y deformaciones de la estructura y los procesos de fabricación y montaje del prototipo a escala humana.

### Geometría y Parametría del arco desplegable

La geometría de Pabellón Vértex nace de la hipótesis de diseñar y construir una estructura desplegable de mediana escala que no constituya simplemente la agrupación de módulos siguiendo una superficie definida.

El elemento constructivo base seleccionado para el diseño del Vértex fue el arco desplegable. Mediante el agrupamiento de varios módulos base se buscó generar un espacio construido de escala intermedia.

El arco desplegable con barras rectas articuladas más simple es el formado por unidades simples asimétricas. Si la asimetría se aproxima a cero, el arco tendrá una proyección de curvatura cercana a una línea recta. Si la asimetría de la unidad simple aumenta, el arco tendrá una proyección de curvatura más pronunciada. Con el principio de agrupación de las unidades simples asimétricas, es posible construir tres tipos de agrupación espacial por módulos: un arco desplegable con módulos en forma de prisma de base triangular, uno con módulos desplegables cuadrados y un tercero, con módulos desplegables hexagonales.

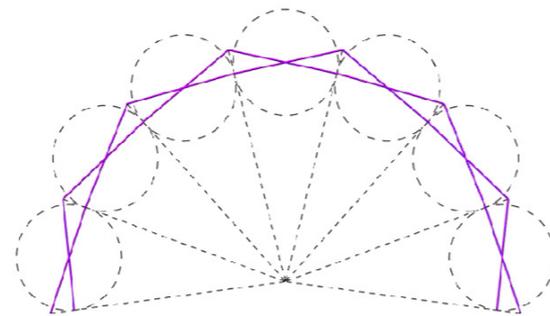


TIPOS DE ARCOS DESPLEGABLES. (A) ARCO MÓDULO TRIANGULAR. (B) ARCO MÓDULO CUADRADO. (C) ARCO MÓDULO HEXAGONAL.

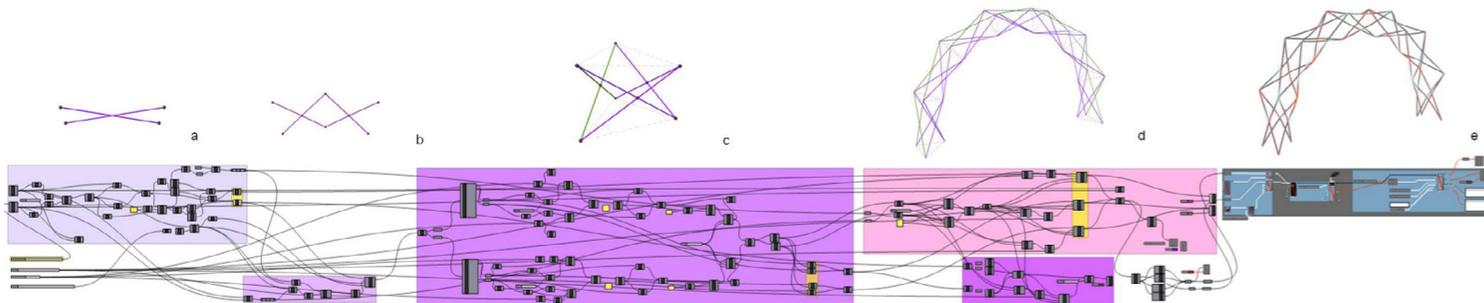
La opción seleccionada para el prototipo que se construyó fue la del arco de sección triangular. La elección se basó en que la misma constituye la geometría más estable (el triángulo) y, además, en su diseño se utilizan menos elementos rectos, por lo que consume menos material y torna más ligera a la estructura resultante. Otro punto a su favor, es la estabilidad durante el proceso de despliegue y en su estado de uso, considerando que las EDBRA están conformadas por barras articuladas, lo que produce una

inestabilidad de movimiento, y el arco desplegable de sección triangular es el que menos articulaciones tiene.

El diseño paramétrico para un arco desplegable consiste en formar un módulo de barras articuladas de sección triangular. El módulo está formado por 3 pares de unidades simples desplegables: una unidad simple simétrica o con la articulación en su centro y dos unidades simples asimétricas o con su centro desplazado. Las tres unidades simples están inscritas en un prisma de base triangular. La curvatura del arco desplegable espacial está dada por los dos pares de tijeras con sus centros desplazados o unidades asimétricas. Recordemos que, según la posición de la articulación asimétrica de las barras, la curvatura definida será más o menos pronunciada. Por tanto, la asimetría del par de tijeras es la que define la curvatura del arco desplegable.

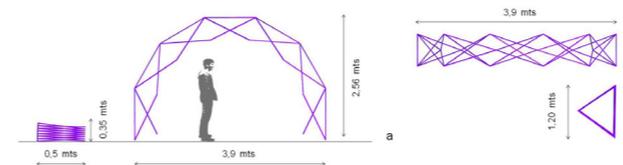


GEOMETRÍA DE MOVIMIENTO PARAMÉTRICO ASIMÉTRICO



ALGORITMO RHINO + GRASSHOPPER PARA DISEÑO Y SIMULACIÓN DE MOVIMIENTO DEL ARCO DESPLEGABLE

Una vez diseñado el módulo desplegable de sección triangular, se agruparon módulos con asimetría exterior para formar el arco desplegable.



GEOMETRÍA DEL ARCO DESPLEGABLE

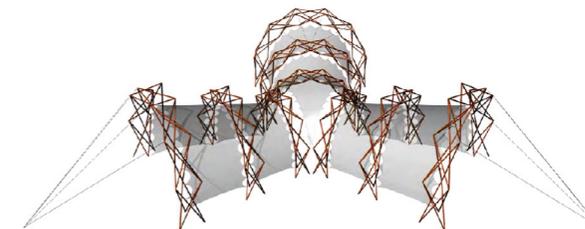
Cada arco está formado por 7 módulos triangulares, con barras de entre 1,06 m y 1,20 m de longitud. El arco en su estado abierto ocupa un área de 2,7 m<sup>2</sup> y posee una habitabilidad de 2 m<sup>2</sup> aproximadamente. Las dimensiones fueron controladas y definidas previamente con el diseño paramétrico para lograr una forma de arco transitable en su interior con el fin de agrupar los arcos para formar la geometría final de la estructura.

Una vez definida la geometría del arco desplegable, el siguiente paso era definir el tipo de agrupación a usar para configurar la forma final del prototipo.

Para el prototipo se decidió una agrupación radial de arcos, que daría mayor rigidez al sistema, cubierta con una membrana textil que definió finalmente tres túneles concéntricos.

El Pabellón Vértex está formado por 9 arcos desplegables, divididos en 3 grupos, con dimensiones crecientes desde el centro. Cada grupo consta de 3 arcos de igual tamaño. Un primer grupo de arcos más pequeños son los que forman el núcleo central del prototipo, con aberturas a 120°. Un segundo grupo de arcos medianos constituyen el anillo intermedio. Finalmente, un tercer grupo de

arcos más grandes, son los que forman el anillo exterior con los accesos a cada túnel del prototipo.

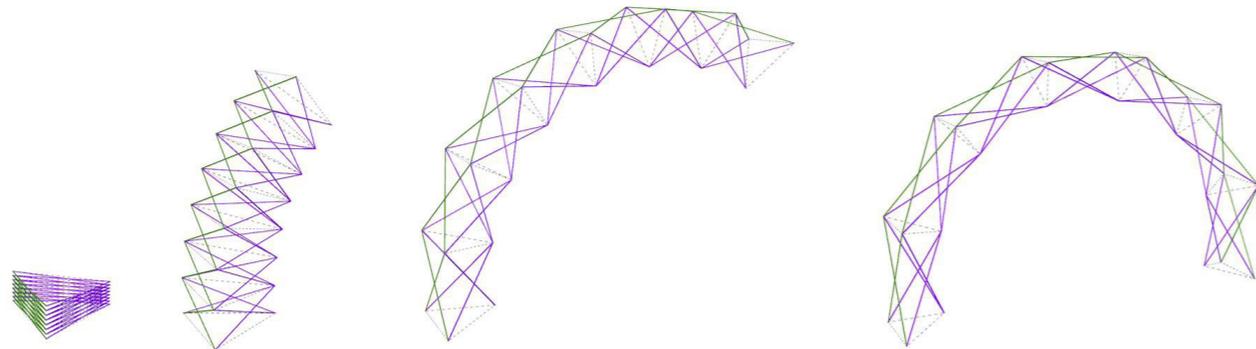


VISTA DEL PABELLÓN VÉRTEX FORMADO POR 9 ARCOS DESPLEGABLES CRECIENTES.

#### Fabricación del prototipo: Pabellón Vértex

Como se mencionó anteriormente, la fabricación y el montaje del prototipo para el pabellón fueron realizados por estudiantes y docentes en el marco de un Taller sobre Estructuras Desplegables. La propuesta geométrica del pabellón Vértex consistió en el diseño de la geometría del arco desplegable como primer paso, y luego en la propuesta de agrupación para definir la configuración final de la estructura.

Para nuestro caso de estudio, el arco desplegable está formado por 7 módulos. Cada módulo está formado por 3 unidades simples desplegables, una unidad simétrica y dos unidades asimétricas, unidas por 6 articulaciones compuestas. Por lo tanto, cada módulo desplegable está formado por 6 barras rectas y 6 articulaciones compuestas. El total de elementos para la construcción del arco desplegable con 7 módulos triangulares es de 14 barras simétricas, 28 barras asimétricas y 24 uniones compuestas.



SIMULACIÓN DE MOVIMIENTO PARAMÉTRICO PARA EL ARCO DESPLEGABLE



MODELOS A ESCALA DEL ARCO DESPLEGABLE USANDO MÉTODOS DE FABRICACIÓN DIGITAL



DETALLE CONSTRUCTIVO PARA LAS ARTICULACIONES COMPUESTAS Y LOS SISTEMAS DE BLOQUEO DE MOVIMIENTO

Para las articulaciones compuestas se fabricaron anillos con tubos de PVC, con una doble capa de puntos de articulación. De esta manera, una misma articulación compuesta recibía las barras del primer módulo en una capa o eje de unión y, en una segunda capa, las barras del siguiente módulo. Esta solución constructiva daba fluidez al movimiento del arco.

Definido el diseño paramétrico del prototipo, se realizaron comprobaciones de movimiento y simulaciones con el software y ensayos de comportamiento geométrico en maquetas, es decir, posibles deformaciones o pandeos de las barras durante el movimiento del arco.

Teniendo en cuenta la manipulación manual de los elementos que conforman el arco desplegable y el arco ya armado, las dimensiones propuestas debieron contemplar la facilidad en

el control y manejo de no solo los elementos individuales sino también, de la estructura de un arco en su estado cerrado y de la agrupación completa en la posición definitiva.



PROCESO DE FABRICACIÓN Y MONTAJE. TECNOLÓGICO DE MONTERREY, MÉJICO.



96

Durante el proceso se fabricaron cada una de las piezas y se construyeron los 9 arcos independientes que formaron la estructura final. Para cada arco terminado se hicieron pruebas de movimiento, de estabilidad y verificación de rotura de cada barra de madera, para garantizar estabilidad, resistencia y rigidez.

Paralelamente, se trabajó el mecanizado y patrón del textil tipo lycra que iba a cubrir la estructura. Este patrón fue previamente diseñado en Grasshopper, calculando una tolerancia de tensión que nos permitiera instalar la cubierta tipo lycra con una tensión admisible sin llegar a la rotura. Los patrones hechos en lycra se fabricaron con huecos perimetrales, con ojales metálicos y separaciones de 50 cm. Estos puntos son los anclajes de tensión entre la tela y la estructura en madera.

El montaje de la estructura final se realizó en 2 horas. El primer paso consistió en dibujar en el terreno la geometría del prototipo y fijar cada uno de los arcos en los puntos de referencia. Los arcos se instalaron del centro hacia afuera, según su tamaño.

Primero se instaló el núcleo y se verificó la estabilidad de cada arco. Luego se instalaron los arcos intermedios y finalmente los arcos externos. Cada arco fue anclado al terreno en sus puntos de apoyo y se estabilizaron con anclajes de bloqueo de movimiento. Los materiales empleados para la construcción de los arcos fueron: madera de pino, para las barras articuladas, de 27 mm por 10 mm de sección, tubos de PVC de 5mm de diámetro para las uniones y tornillos M3 de 3 mm de diámetro, con tuercas autobloqueantes para las uniones de las articulaciones entre barras y tubos.

ENSAMBLADO DE UN ARCO DESPLEGABLE



PRUEBA DE MONTAJE PARA EL NÚCLEO DEL VÉRTEX.

97



Posteriormente, se instaló la cubierta textil de lycra. De igual forma que con el montaje de la estructura, se inició su instalación del centro hacia afuera. La tela, por sus características de tensión, ejercía empuje en los arcos hacia el interior, por lo que fue necesario la instalación de cables de tensión en los arcos exteriores para estabilizar dichas cargas y empujes producidos por la tela. Debido a que la estructura fue instalada en campo abierto, se tomó la decisión en el sitio de hacer perforaciones a la tela con el fin de reducir la resistencia a las cargas del viento que podrían ocasionar la rotura de las barras de madera.

Finalmente, luego de la colocación de los cables a tensión para estabilizar la estructura, se revisaron las barras de madera, chequeando que no presentaran fracturas producidas durante el proceso de fabricación o mecanizado. Se revisaron también los puntos de anclaje entre la tela y la estructura para aliviar tensiones y así evitar roturas o rasgaduras.





MIRALO AQUÍ



El Pabellón Vértex se usó inicialmente durante su presentación, al finalizar el ejercicio académico y durante 3 días. Posteriormente, ha sido utilizado en eventos y actividades lúdicas dentro del campus. Estimamos que, por la naturaleza de la baja resistencia a los agentes externos de los materiales utilizados, el prototipo pueda alcanzar una vida útil de 1 año y medio a dos años.

### Discusión y conclusiones

La construcción de un prototipo a escala humana requiere no sólo del interés académico y el soporte económico de las instituciones, sino que también de la ayuda del recurso humano para tareas de mecanizado del material y ensamblaje. En este sentido, corresponde agradecer a los estudiantes y colaboradores de la universidad donde se realizó la experiencia descrita. La experiencia colectiva de construir prototipos en el marco de un Taller de Estructuras Desplegables, permite nuevos enfoques para la resolución de aspectos constructivos no previstos en la etapa de diseño.

Como parte de una metodología de diseño paramétrico y construcción de prototipos a escala humana, esta experiencia sirve como guía para futuros trabajos, aportando en la mejora de procesos y, el estudio de tensiones y deformaciones hechos para el caso de estudio descrito, fueron parte de esta búsqueda, a modo de un análisis orientativo para el proceso constructivo, y no como modelo de cálculo.

La construcción de prototipos de bajo costo en esta investigación, permite continuar explorando materiales y detalles constructivos para las EDBRA que se puedan estandarizar para el desarrollo de un sistema constructivo desplegable que tenga una aplicación en la industria de la construcción y la arquitectura.

Con la ayuda del diseño paramétrico y nuevas técnicas de fabricación digital, el diseño de las estructuras desplegables

adquiere una mayor importancia y facilita los procesos de comprobación de movimiento y búsqueda de la forma, razón por la cual reduce considerablemente los procesos de diseño y amplía el panorama de posibilidades en la búsqueda de nuevas geometrías y agrupaciones desplegables.

### Referencias

- [1] O. Avellaneda. Diseño Paramétrico de las Estructuras Desplegables, control límite de movimiento. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, 2020.
- [2] M. Mendoza, O. Avellaneda, D. Peña. Learning by doing: Fostering creativity in the teaching and learning of deployable structures in architectural education. Creativity in Structural Design Proceedings of the IASS Annual Symposium. Boston USA, 2018.
- [3] O. Avellaneda, "Deployable Structures System, Hexagonal X-frame. Three Case Studies" ARCHI DOCT, 14 February, v. 4, n. 2, p. 41-56, 2017.
- [4] O. Avellaneda, M. Mendoza, D. Peña, Vértex Pavillion. Deployable Arches Structure with Triangular Section. Proceedings of the IASS Annual Symposium 2020/21 and the 7th International Conference on Spatial Structures. Inspiring the Next Generation. UK, 2021.
- [5] New Proposal for Transformable Architecture, Engineering and Design. In honor of Emilio Pérez Piñeros. 18th, 20th september 2013. Abstract book. Félix Escrig & Jose Sanchez. Sevilla, Spain. ISBN: 978-84-939565-3-0
- [6] Modular, ligero, transformable: un paseo por la arquitectura ligera móvil. Félix Escrig Pallarés. Universidad de Sevilla, 2012. ISBN: 97884472142