



Pabellón Vertex. Experiencia Constructiva de una estructura desplegable con barras rectas

Omar Fabrisio AVELLANEDA LOPEZ^a - Juan Felipe TALAMAS SALAZAR^b

^a* PhD(c) - Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. España
info@smia-experimental.com

^b Prof. MSc. Tecnológico de Monterrey. Monterrey. México.
info@smia-experimental.com

Resumen (abstract)

El grupo de investigación SMiA (Structural Morphology in Architecture), junto con los estudiantes de la Escuela de Arquitectura, Arte y Diseño del Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey trabajamos en la fabricación y construcción de una estructura desplegable con barras rectas articuladas de 90 metros cuadrados construidos; Pabellón Vertex. Previamente diseñada por el grupo de investigación, como parte de una tesis doctoral.

El presente artículo describe las experiencias obtenidas durante los procesos de diseño, fabricación y montaje de una estructura desplegable. Hacer uso del "High Tech" en diseño y "Low Tech" en construcción. Y hacer comprobaciones físicas a escala real del comportamiento mecánico de este tipo de estructuras, y sus múltiples aplicaciones en la arquitectura. Finalmente el afrontar este reto académico y culminarlo con éxito, nos abre las puertas a nuevas propuestas y líneas futuras de desarrollo en el campo de las estructuras desplegables.

El proyecto se usó como escenario para eventos estudiantiles del Tecnológico de Monterrey, campus Monterrey.

Palabras Clave: estructuras desplegables, morfología estructural, diseño paramétrico, arquitectura transformable, geometría activa, arcos desplegables, tenso estructuras.

1. Introducción

Las estructuras desplegadas con barras rectas articuladas, tiene la virtud de ser ligeras, modulares, y transformables. Son características muy conocidas y estudiadas por distintos centros de investigación y referentes en el mundo, uno de estos referentes era el Arquitecto Felix Scrig[1], quien nos dejó un fantástico legado en el estudio de estas estructuras. Nosotros desde el grupo de investigación SMiA (Structural Morphology in Architecture) de la UPC, BarcelonaTech. Hemos venido trabajando en el desarrollo de estas estructuras enfocados en su aplicación real. Para esto contamos con el apoyo de herramientas digitales y programas computacionales de diseño paramétrico y de análisis teóricos FEA (Finite Element Analysis), así como de máquinas de fabricación e impresión digital, y cortes laser.

La morfología de las estructuras desplegadas está muy relacionada con los conceptos de geometría de sólidos, Y este es el punto de inicio de esta investigación. La exploración de la transformabilidad y la búsqueda de geometrías apropiadas para un sistema de habitabilidad. La exploración de la forma es muy importante en esta investigación, ya que se busca superficies de doble curvatura, sin-clásticas o anti-clásticas con sistemas de barras rectas como solución de un elemento contenedor.

En este contexto el grupo de investigación SMiA es invitado por el Tecnológico de Monterrey a impartir un taller sobre estructuras desplegadas a estudiantes de carrera de arquitectura y diseño industrial. El taller tiene como objetivo la introducción en el mundo de la arquitectura transformable con una metodología experimental.

En una primera etapa se exploran los conceptos básicos de las estructuras desplegadas con modelos a escala. Piezas de barras rígidas hechas con corte laser y uniones impresas en 3d mas tornillos y tuercas, son los materiales necesarios para la construcción de pequeñas maquetas de estudio de movimiento y agrupaciones geométricas. Es casi como un "lego" de estructuras desplegadas. En esta fase el objetivo es desarrollar los conceptos de patrón, forma y movimiento de las estructuras desplegadas.



Figura 1: Maquetas a pequeña escala de sistemas desplegados

Una vez con los conceptos básicos y con diseño previo del grupo de investigación SMiA, comenzamos una segunda etapa del taller sobre estructuras desplegables. La construcción de un prototipo a escala real. El prototipo es parte de una tesis doctoral sobre Estructuras desplegables con barras rectas articuladas y su control máximo o límite de movimiento. Investigación avanzada por Omar Avellaneda junto con su diseño.

La estructura está formada por 9 arcos desplegables distribuidos así; 3 arcos menores centrales, formando un anillo con 3 aberturas a 120 grados. Luego 3 arcos medianos formando un anillo intermedio. Y finalmente 3 arcos grandes formando el anillo exterior. La agrupación de los arcos forma 3 aberturas o vértices a 120 grados. Cada arco desplegable está formado por 7 módulos de base triangular desplegable. El módulo está formado por un par de barras articuladas rectas y simétricas y dos pares de barras rectas asimétricas. Esta asimetría es la que permite la curvatura de la estructura en forma de arco. El Pavellon Vertex es de 90 metros cuadrados construidos en su estado de uso (abierto). Altura máxima de 3,70 metros. Y 70kg de peso aproximadamente. En su estado de transportabilidad (cerrado) ocupa un área de 2 metros cuadrados y una altura de 1,40 metros.

2. Diseño Paramétrico

La hipótesis de partida para el diseño del Pabellón Vertex era la de crear un espacio habitable con estructuras desplegables con barras rectas articuladas, pero no como resultado de una agrupación superficial de un módulo. Es decir no queríamos recorrer el camino de agrupar un módulo desplegable y con este diseñar una superficie sinclásticas o anticlásticas hasta lograr una superficie que contenga un espacio. Este camino ya ha sido recorrido en otros ejercicios académicos previos.



Figura 2: Hipotesis; evolución de los sistemas desplegables habitables.

Esta hipótesis nos hacía repensar el diseño. El camino que se tomó fue el de coger un elemento usado en la arquitectura tradicional y volverlo desplegable. Es así como llegamos a diseñar un arco espacial de sección triangular y desplegable. Básicamente un arco desplegable. El proceso de diseño surge de la necesidad de construir espacios habitables con elementos estructurales, como vigas, columnas, arcos, etc.

Con el uso del software Rhinoceros, y el plugin Grasshopper se logró parametrizar el diseño. El arco de sección triangular está formado por una cara de barras rectas simétricas, y dos caras de barras rectas asimétricas. Para dar movimiento a la agrupación de barras rectas simétricas y asimétricas se usó la geometría de los círculos. Y tomando los puntos de intersección entre círculos se construyen las barras articuladas.

Generando el movimiento lineal para las barras rectas con articulación simétrica y movimiento curvo para las barras rectas con articulación asimétrica.

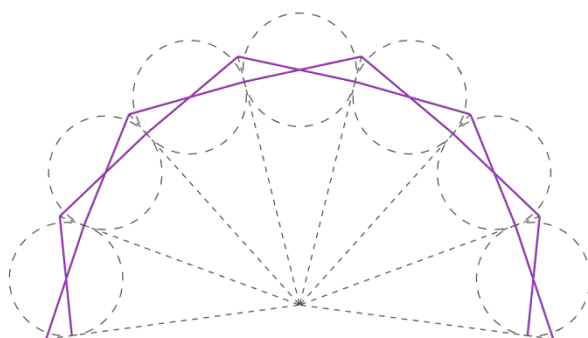


Figura 3: Geometría de movimiento paramétrico asimétrico.

Una vez diseñado el módulo desplegable de sección triangular, se agrupan módulos para formar el arco desplegable. El diseño del arco se ajustó y su ángulo de giro fue calculado para tener 7 módulos por arco con el fin de ser eficientes económicamente y responsables ambientalmente.

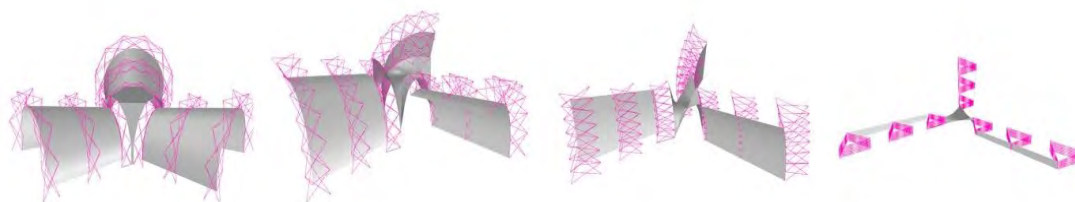


Figura 4: Diseño paramétrico Pabellón Vertex. Estudio de movimiento.

Previo a la construcción del Pabellón Vertex, habíamos tenido la oportunidad de construir un prototipo con 4 arcos desplegables de sección triangular agrupados de forma radial formando una sección de un Torus. Este prototipo de 36 metros cuadrados nos sirvió para analizar y testear el comportamiento de los arcos como elementos estructurales y contenedores. El arco solo era bastante estable, pero agrupado y con un cerramiento textil, era necesario incorporar elementos adicionales como anclajes a suelo y cables como elementos de tensión para contrarrestar la fuerza del viento.



Figura 5: Pabellón Torus4. Experiencia previa con arcos desplegables, construida en la UIC. Barcelona.

Teniendo esta experiencia previa y sabiendo que queríamos construir un prototipo de mayor tamaño, se decidió hacer una agrupación central a manera de núcleo con los arcos desplegables. El núcleo da mayor rigidez y estabilidad entre los arcos. Cada arco está orientado a 120° grados formando un triángulo equilátero en planta. Y la idea era que de cada arco creciera hacia el exterior paralelo a los arcos del núcleo. Teniendo finalmente una estructura con tres tuneles conicos rotados a 120° grados del centro. Pabellon Vertex.

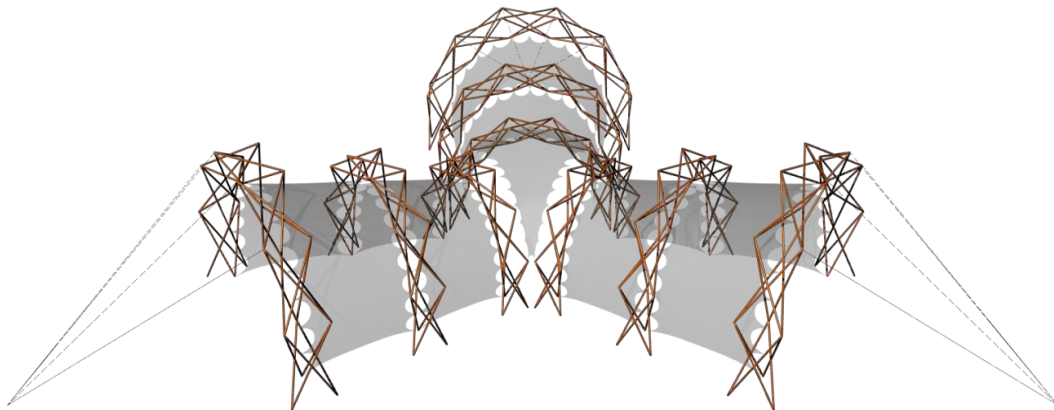


Figura 6: Pabellón Vertex. Diseño parametrico.

3. Mecanizado del Material y Construcción

Definido el diseño digital del prototipo y habiendo hecho las comprobaciones de movimiento en el software y haciendo ensayos de comportamiento geométrico en maquetas, es decir posibles deformaciones o pandeos de las barras durante el movimiento del arco. Teníamos todo listo para la mecanización del material y construcción física de los arcos.

Este trabajo se realizó con el apoyo del laboratorio de maquetas y fabricación de la Escuela de Arquitectura, Arte y Diseño del Tecnológico de Monterrey, Campus Monterrey. En este espacio los estudiantes tuvieron la oportunidad de mecanizar la madera para fabricar las barras de los arcos y construir las uniones con tubos de PVC. La construcción de los arcos se hizo en el patio de la Escuela de Arquitectura.



Figura 7: Materiales usados para la estructura del prototipo.

El Pabellón Vertex está formado por 9 arcos desplegables. Dividido en 3 grupos. Cada grupo es de 3 arcos de igual tamaño. Un primer grupo de arcos son los que forman el núcleo central del prototipo. Los arcos más pequeños. Un segundo grupo formando un anillo intermedio son los arcos medianos. Y un tercer grupo de arcos, los más grandes y exteriores son los que forman los accesos a cada túnel del prototipo.



Figura 8: fabricación y mecanización de material.

Los materiales usados para la construcción de los arcos fueron, madera de pino para las barras articuladas, tubos de PVC de 5mm de diámetro para las uniones y tornillos M3 de 3mm con tuercas autoblocantes para las uniones de las articulaciones entre barras de madera y tubos de PVC. La sección de las barras de madera que se usaron para el prototipo fue de 27mm por 10mm.

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



Figura 9: Construcción de los arcos despleables.

Igualmente 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 permita instalar la cubierta tipo lycra con una tensión admisible sin llegar a la rotura. Las piezas o patrón hechos en lycra se fabricaron con huecos perimetrales hechos con ojales metálicos y separaciones de 50cm. Estos puntos son los anclajes de tensión entre la tela y la estructura en madera.

Finalmente se fabricaron unas piezas de anclaje o bloqueo de movimiento para cada uno de los extremos de los arcos. Con esto garantizamos la apertura máxima de cada arco y respetamos las dimensiones teóricas dadas por el diseño digital.

Los tiempos de mecanizado y fabricación, fueron de 3 días.

4. Montaje y Prototipo

Con todos los 9 arcos terminados, la cubierta textil lista, y los anclajes de movimiento para cada arco. Se procedió a hacer pruebas de montaje. Recordemos que el prototipo es de carácter experimental y de desarrollo, y único en su tipo. Por lo que eran necesarias pruebas y ensayos previos al montaje final y comprobaciones del comportamiento mecánico de cada una de las piezas. También fueron necesarios elementos adicionales como cables de vientos y anclajes tipo camping para garantizar la estabilidad de la estructura según las condiciones de contorno como vientos y cargas vivas. El prototipo final se construiría en el Jardín de las Carreras, punto central y de mayor tráfico estudiantil del campus.

El ensayo de montaje que más atención y verificaciones nos dio fue el del núcleo central. Usando los tres arcos pequeños los agrupamos en forma triangular y los unimos entre ellos. Cada arco tenía su anclaje de movimiento en sus extremos y adicionalmente usamos anclajes a suelo tipo camping de 30cm de longitud. Las verificaciones de deformaciones y roturas no se presentaron y la estabilidad formal de la estructura permitía cargas laterales físicas hechas in situ, sin presentar daños.



Figura 10: Ensayo de montaje para el núcleo del prototipo y Anclajes para bloqueo de movimiento.

El montaje de la estructura final se realizó en 5 horas teniendo presente 3 pasos de montaje. El primer paso era dibujar en el terreno la geometría del prototipo, e instalar cada uno de los arcos en los puntos de referencia. Los arcos se instalaron del centro hacia afuera. Primero se instaló el núcleo y se verificaba la estabilidad de cada arco. Luego se instalaban los arcos intermedios y finalmente los arcos externos. Cada arco era revisado en dimensiones, estabilizado con los anclajes de bloqueo de movimiento y anclados a suelo en sus 4 puntos de apoyo.



Figura 11: Montaje del Pabellón Vertex con arcos desplegables y cubierta tipo lycra.

Un segundo paso fue el de la instalación de la cubierta tipo lycra. De igual forma que 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 fueron necesarias la instalación de cables de tensión en los arcos exteriores para estabilizar las cargas y empujes de la tela. Debido a que la estructura fue instalada en campo abierto se tomó la decisión en sitio de hacer perforaciones a la tela con el fin de no hacer mayor resistencia a las cargas del viento y que esto ocasionara rotura de las barras de madera.



Figura 12: Pabellón Vertex.

Y finalmente un tercer paso fue la instalación de los cables a tensión, estabilizando la estructura. En este punto se revisaron cada barra de madera chequeando que no presentaran fracturas de fabricación o mecanizado. Se revisaron los puntos de anclaje entre la tela y la estructura para aliviar tensiones y así evitar roturas. En general una revisión de todos los elementos instalados y ver el comportamiento mecánico de la estructura en funcionamiento. El Pabellón Vertex se usó inicialmente durante su presentación como ejercicio académico durante 3 días. Posteriormente ha sido utilizado en eventos y actividades lúdicas dentro del campus. Habiéndose instalado hasta el día de hoy unas 5 veces más. Estimamos que por la naturaleza de baja resistencia a los agentes externos de los materiales el prototipo tenga una durabilidad de 1 año y medio a dos años.



Figura 13: Pabellón Vertex. Vista frontal.

5. Conclusiones y futuras investigaciones

La experiencia de construir prototipos a escala intermedia de estructuras desplegables es muy positiva. El cambio de escala, el diseño de las uniones, el comportamiento mecánico del prototipo, su peso, el paso de lo digital al prototipo, las deformaciones, son algunas de las cosas que se evidencian en la práctica. Si bien las propuestas estaban planteadas como prototipos de bajo costo, fueron considerados los mejores materiales y por tanto su inversión fue algo a considerar. Gracias a recursos colectivos fue posible su elaboración.

Pero es fundamental en la investigación de estructuras desplegables avanzar lo más posible a la construcción final del prototipo pues solo así se pueden solucionar la mayor cantidad de problemas.

El cambio de escala. Esto es una de las conclusiones más valiosas. Comprobar físicamente los resultados obtenidos del análisis teórico FEA (Finite Element Analysis) que con la elaboración de una maqueta a escala pequeña son imperceptibles las deformaciones o desplazamientos. Poder tener control del peso real o aproximado de la estructura, de las uniones, y de los accesorios. Al cambiar la escala es más difícil controlar el movimiento de la estructura, por lo que es necesario plantear sistemas de control de movimiento.

Sistemas de control de movimiento. Las estructuras desplegables con barras rectas tienen dos tipos de clasificaciones según su estabilidad. Sistemas cerrados los cuales son autoportante en sí mismo, como los domos desplegables. Y sistemas abiertos que son los que requieren de elementos adicionales a su configuración geométrica como cables o barras que permiten bloquear su movimiento. En estos últimos es donde se requiere una

investigación futura. Lograr controlar la máxima, mínima o límite posición de movimiento de una estructura desplegable permitirá tener aplicaciones arquitectónicas más eficientes.

Deformaciones y torsión de las barras. El paso de las maquetas de trabajo a un prototipo de escala intermedia, obliga a comprobar dimensiones de los elementos, materiales y diseño de uniones. El sistema de estructuras desplegable requiere del diseño de sus uniones. Uniones que con diseños a medida para evitar desplazamiento de las barras y disminuir las deformaciones.

El grupo de investigación SMiA ve necesario dar el salto de los diseños digitales y las maquetas a pequeña escala hacia la construcción de prototipos a escala humana. Es en estos ejercicios académicos donde se puede avanzar más en el desarrollo y solución de nuevos problemas de las estructuras desplegables con barras rectas articuladas. Las cuales creemos que tiene una aplicación muy interesante dentro de la arquitectura convencional.

6. Referencias

A Fuller Explanation, The Synergetic Geometry of R. Buckminster Fuller, Amy C. Edmondson, Birkhauser, 1987. ISBN 978-0-8176-3338-7. Stuttgart

Synergetics: explorations in the geometry of thinking. Richard Buckminster Fuller, E. J. Applewhite. 1982. ISBN 9780025418707. Michigan University.

IASS-SLTE 2014: Shells, Membranes and Spatial Structures: Footprints [15-19 September 2014] Briasilia. Brazil.

International Association for Shell and Spatial Structures.2013. Wroclaw, Poland. ISBN: 978-83-7493-787-0

IASS - New Materials and Technologies - New Designs and Innovations. Acapulco. Mexico.

Estructuras No Convencionales En Arquitectura. Maria Claudia Villate , Universidad Nacional De Colombia, 2008. ISBN 9789587750522

New Proposal for Transformable Architecture, Engineering and Desing. In honor of Emilio Perez Piñeros. 18th, 20th september 2013. Abstract book. Felix Escrig & Jose Sanches. Sevilla. Spain. ISBN: 978-84-939565-3-0

Escrig, F. [2006], New designs and geometries of deployable scissor structures, in: Adaptables 2006, Proceedings of the International Conference on Adaptability in Design and Construction, Eindhoven University of Technology, pp.5-18, 5-22

Modular, ligero, transformable: un paseo por la arquitectura ligera móvil. Félix Escrig Pallarés. Universidad de Sevilla, 2012. ISBN: 97884472142

<https://smia-experimental.com/> - Structural Morphology in Architecture research group of the University Polytechnic of Catalonia.

<http://blogwintess.blogspot.com/> - Software developed and used for calculating Tensile Structures by Prof. Ramon Sastre Sastre.