

02-012

### PARAMETRIC DESIGN OF A DEPLOYABLE STRUCTURE. A CASE STUDY

Zamora-Polo, Francisco<sup>(1)</sup>; Zambrano Vivar, Carlos<sup>(2)</sup>; Luque-Sendra, Amalia<sup>(3)</sup>; Hipólito-Ojalvo, Francisco<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Universidad de Extremadura/Universidad de Sevilla, <sup>(2)</sup>Universidad de Extremadura, <sup>(3)</sup>Universidad de Sevilla

Deployable structures are used for temporary or moveable applications. Their high relationship between supported load and their mass, their modularity and their transportable characteristics allow their use in several applications such as exhibition rooms or emergency homes (refugee camps).

In this communication, we describe the parametric design of a deployable structure and its dimensioning their elements using structures design software. Parametric design allows the optimization of the structure in its early stages guaranteeing the geometric compatibility of the structure.

**Keywords:** *Deployable structures; parametric modelling; desing*

### MODELADO PARAMÉTRICO DE UNA ESTRUCTURA PLEGABLE. ESTUDIO DE CASO

Las estructuras plegables son utilizadas para su aplicación en instalaciones temporales o bien aquellas que deben trasladarse de un lugar a otro.

Su alta relación carga soportada/peso, su configuración modular y su carácter transportable hacen que su uso sea muy recomendable en diversas aplicaciones que van desde salas de exposición, a alojamiento para desplazados (campos de refugiados).

En esta comunicación se describe el modelado paramétrico de una estructura plegable así como el dimensionamiento de las barras mediante un software de cálculo de estructuras. El modelado paramétrico permite la optimización de la estructura en sus primeras fases garantizando la compatibilidad geométrica de la estructura.

**Palabras clave:** *Estructuras plegables; modelado paramétrico; diseño;*

Correspondencia: fzamora@unex.es



©2018 by the authors. Licensee AEIPRO, Spain. This article is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 1. Introducción

Una estructura plegable está compuesta por un conjunto de barras unidas con articulaciones formando figuras planas como pueden ser rombos, triángulos, cuadrados y hexágonos que dan lugar a una estructura tridimensional. Las estructuras plegables se pueden transformar desde una posición compacta a una desplegada consiguiéndose un elevado coeficiente volumen generado/peso de la estructura (Mira, Coelho, Thrall y Temmerman, 2015).

Entre las ventajas que presentan este tipo de estructuras podemos encontrar:

- Se pueden desplegar en lugares que requieren una mínima preparación.
- Presentan una relativa facilidad de montaje/desmontaje.
- Dan lugar a estructuras modulares que pueden acoplarse entre sí.

Por otro lado, su uso es muy diverso y va desde la construcción de la industria aeroespacial (Zhang, Li, Yang y Ru, 2017), la construcción de puentes (Lederman, You y Glišić, 2014) o bien para la creación de espacios de cubrición temporales para campos de refugiados (Alegria Mira, Thrall y De Temmerman, 2014).

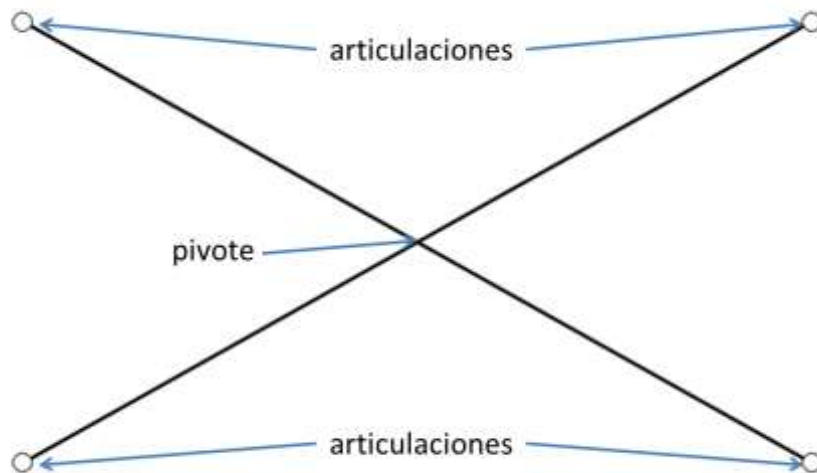
La primera referencia documentada de una estructura desplegable la podemos encontrar en la silla de aspa egipcia. Esta silla está formada por barras en forma de aspa que posibilita su plegado. También los romanos utilizaron el *Velum* o *Velarium* como antecedentes de los techos retráctiles. Las estructuras desplegables también fueron utilizadas en la cultura romana como espacio para el refugio, el *Papilo* o tienda romana es un ejemplo de ello. Un tipo de vivienda usada en por los pueblos nómadas de Asia Central es la *Yurta*, que tiene su origen en la Edad Media y que fue diseñada para soportar las condiciones climáticas de Mongolia. En otro extremo del mundo podemos encontrar una estructura plegable utilizada por la población indígena de Estados Unidos, el *Tipi* con un esqueleto formado por palos de madera y cubierta por pieles de animales. En la Edad Moderna, la primera referencia con la que se cuenta es la estructura de aspas propuestas por Leonardo Da Vinci. En España, esta disciplina ha contado con investigadores del más alto nivel como pueden ser Emilio Pérez Piñero que diseñó un teatro portátil utilizando estructuras plegables (Piñero, 1961) o Felix Escrig que realizó junto a su equipo numerosas invenciones utilizando como base las estructuras plegables (Escrig Pallarés, 2012).

Este trabajo está centrado en estructuras tipo tijeras. En la figura 1 se muestra la unidad fundamental de estas, el aspa. Como se puede observar se trata de un conjunto de dos barras unidas en sus extremos por articulaciones, y que cuentan con un sistema de pivote que le permite moverse con un cierto grado de libertad.

Existen tres tipos diferentes de mecanismo tipo tijera según la forma y ubicación del pivote denominados: mecanismos de traslación, polares y angulares (Mira et al., 2015).

- La unidad básica de tijera de traslación, está compuesta por vigas rectas con una bisagra de tijera en el centro de las vigas. Estas unidades muestran un despliegue lineal en el que las unidades permanecen paralelas. Se utilizan en rejillas planas o curvas en superficies de traslación.
- Unidad básica de tijera polar: en esta unidad la bisagra de tijera se desplaza desde el centro con cierta excentricidad. En esta configuración, el despliegue realizado provoca que las unidades obtengan un ángulo determinado respecto a un punto central de referencia. Son adecuadas para formar rejillas de curvatura simple como bóvedas o el arco de tijera más básico.

**Figura 1: Unidad fundamental de tijera. Fuente: Elaboración propia basado en Gantes, Georgiou, & Koumousis (1998)**



- Unida básica de tijera angular: estas unidades consisten en vigas dobladas donde la bisagra se coloca en esa torcedura. Esto da lugar a la propiedad de despliegue radial durante el cual se mantiene la forma general, a menudo utilizada como forma de cúpulas.

La inclusión del modelado paramétrico supone un gran avance en el diseño y optimización. De esta forma puede ser utilizado para diversos usos como pueden ser la minimización del impacto medio ambiental (Tao, Li y Yu, 2018) o bien para el análisis de modelos cinemáticos (Correa, Koo y Ferreira, 2016).

El objetivo de este trabajo es obtener el diseño de un mecanismo basado en estructuras plegables que garantice la compatibilidad geométrica y el estudio cinemático de las mismas. Del mismo modo, se pretende realizar un estudio paramétrico en función de las siguientes magnitudes: longitud, excentricidad, espesor, canto y ancho de la barra, diámetro y longitud del bulón.

El estudio llevado a cabo en este documento está orientado al desarrollo de una estructura de unidad tijera polar que tendrá todas las ventajas enunciadas en los apartados anteriores, ya sea facilidad de montaje, rapidez del mismo, menor peso de la estructura plegable, que podrá ser usada como elemento para cubrir tantos grandes espacios, por ejemplo cubiertas de piscinas, escenarios de conciertos, etc.; como espacios menores, como puede ser una tienda de campaña.

Se realizará también un estudio de la correlación entre la luz y la altura interior de las estructuras diseñadas y los parámetros considerados: longitud de la barra y excentricidad de la misma. Se llevará a cabo un estudio estático de la estructura plegable con el programa Robot Structural Analysis con la finalidad de comprobar su viabilidad y seguridad estructural.

## 2. Metodología

La modelización, el estudio cinemático y la parametrización de las estructuras se ha llevado a cabo mediante el programa Autodesk Inventor ©. Con la parametrización se obtiene un método sistemático con el que poder modificar las variables fundamentales del diseño, obteniendo instantáneamente el resultado sin necesidad de realizar nuevamente el diseño y ensamblado de las piezas que componen la estructura plegable.

Mediante técnicas de regresión se han obtenido correlaciones entre la luz y la altura de la estructura plegable y la longitud de la barra y su excentricidad, utilizándose para ello Microsoft Excel©.

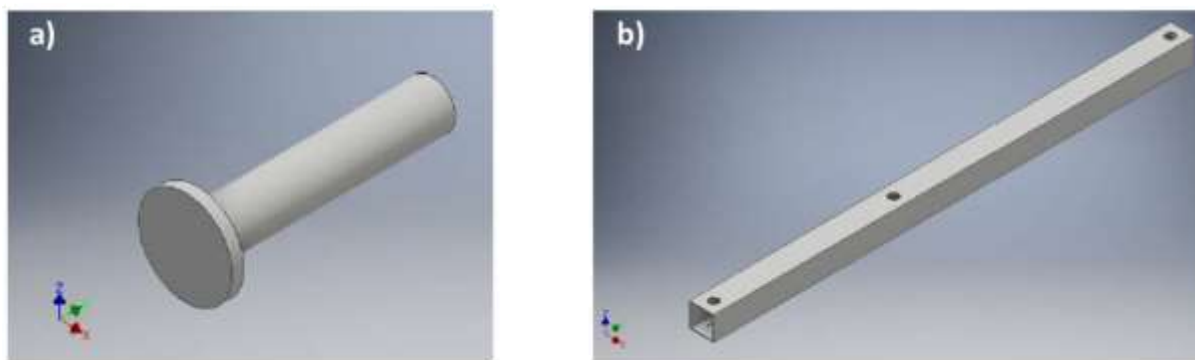
Una vez que se han generado las estructuras, se ha estudiado la posibilidad de comprobar estructuralmente las barras mediante la herramienta Robot Structural Analysis ©. Para la determinación de las cargas se ha utilizado el Código Técnico de la Edificación (España, 2006)

### 3. Resultados y discusión

#### 3.1. Modelización de la estructura

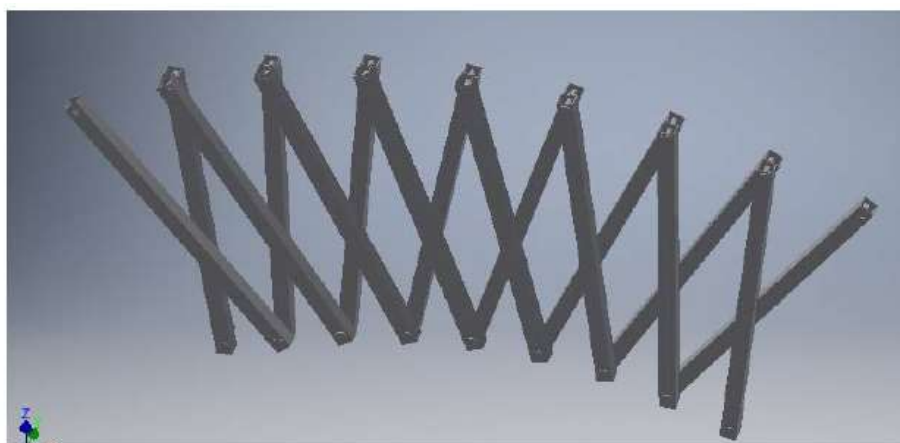
Todas las estructuras analizadas contarán con 8 unidades tijeras unidas entre sí. Para lo modelización, en primer lugar se debe definir un bulón con su correspondiente embellecedor y una barra hueca con los correspondientes agujeros (Figura 2).

**Figura 2: a) Bulón genérico b) Barra genérica. Fuente: Elaboración propia**



Una vez que han sido modelados estos elementos será necesario mediante la opción ensamblaje establecer las relaciones que tienen unos con otros. Dando lugar de esta forma, a la estructura constituida por 8 unidades tijeras (Figura 3)

**Figura 3: Estructura plegable formada por 8 unidades tijeras polares. Fuente: Elaboración propia**



Para hacer posible el estudio cinemático resulta necesario definir que la estructura se trata de una estructura plana, por lo tanto el plano de movimiento va a estar restringido al plano xy y por otro lado que van a existir dos puntos, concretamente los extremos que se van a desplazar únicamente en la dirección horizontal (tienen impedido el desplazamiento vertical).

Con esta configuración establecida, y aplicando una determinada fuerza en uno de los extremos de la estructura, considerando el otro extremo como un apoyo fijo, resulta posible el despliegado de la misma.

Una vez conseguida la modelización de una estructura con unas dimensiones determinadas se procedió a parametrizar las dimensiones de cada uno de los elementos. Los parámetros a partir de los cuales han sido definidas todas sus dimensiones son el diámetro del bulón ( $d$ ), la longitud de la barra ( $L$ ), el canto ( $b$ ), el ancho ( $h$ ) y el espesor ( $t$ ) de estas (se han supuesto rectangulares y huecas) así como la excentricidad  $e$ , definida como distancia que existe entre el pivote y el punto medio de la barra

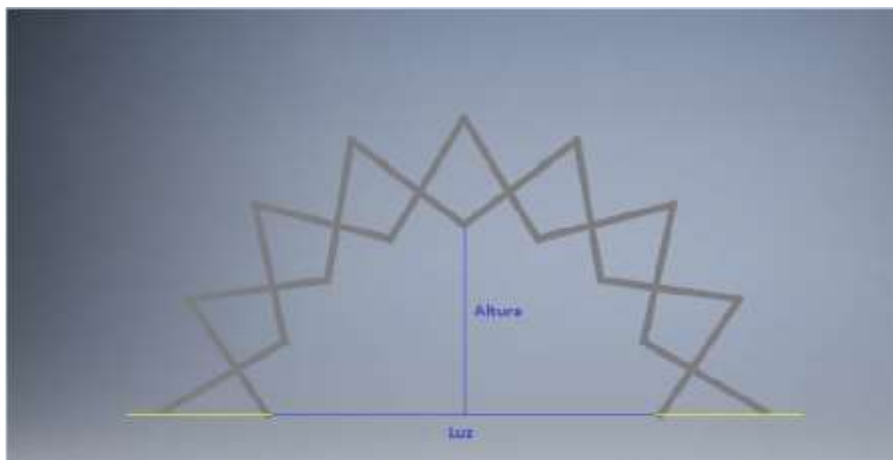
$$Distancia_{pivote} = \frac{L}{2} + e \quad (1)$$

El resultado de esta parametrización es el diseño de una estructura en la que se pueden cambiar fácilmente las dimensiones sin tener que volver a modelar en cada ocasión cada uno de los elementos y por ende la estructura.

### 3.2. Correlaciones entre los parámetros de las estructuras de barras

El diseño y parametrización expuesto en el apartado anterior, hace posible el análisis de las diversas estructuras de forma más sencilla. En este trabajo se intenta buscar una correlación entre la longitud de las barras y la excentricidad con la luz y la altura de la estructura (Figura 4)

**Figura 4: Definición del parámetro luz y altura de una estructura plegable. Fuente: Elaboración propia**



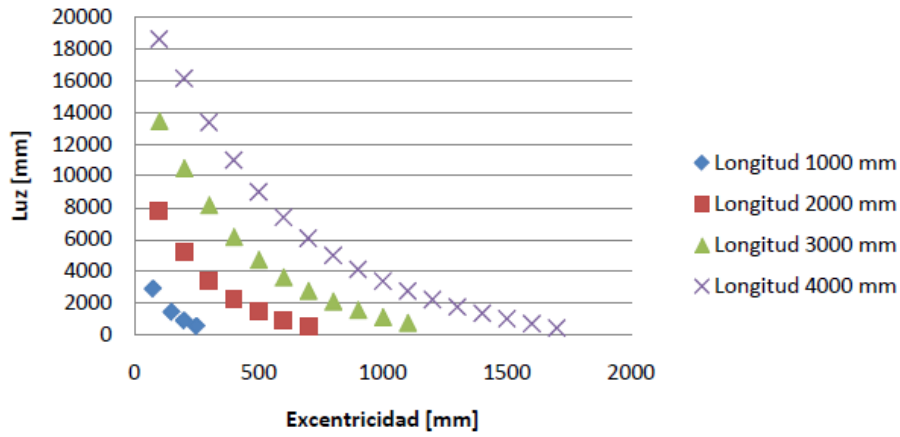
Se han modelado 39 estructuras plegables cambiando las longitudes de las barras (1m, 2m, 3m y 4m) y diferentes excentricidades. Las Figuras 5 y 6 muestran los valores de la luz y la altura en función de las longitudes y las excentricidades.

Obviamente, el valor de las excentricidades deben ser en todos los casos positivas, como mucho puede adoptar el valor de  $L/2$  y en el caso de adoptar un valor de  $e=0$  se convertiría en una estructura de tijeras de traslación.

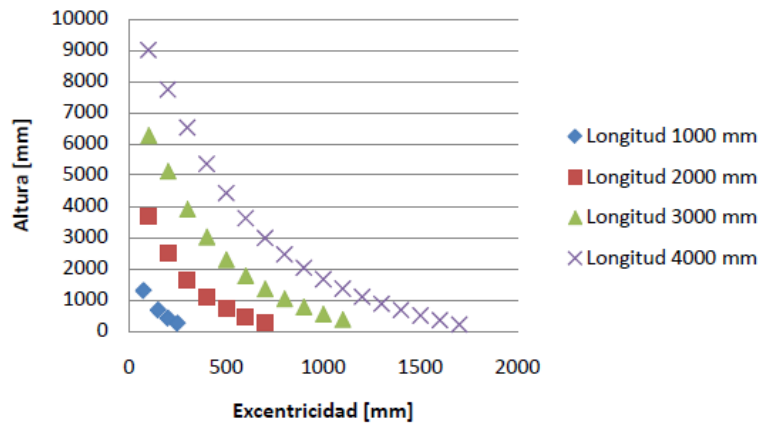
Si se representa la luz/longitud de la barra y la excentricidad en % ( $e/L \cdot 100$ ) se puede obtener la figura 7. Como se puede observar, todas las estructuras tienen un comportamiento similar. Realizando una correlación asimilando a un polinomio de tercer orden es posible obtener la ecuación 2. Donde la excentricidad está expresada en % ( $e_{\%}$ ).

$$\frac{Luz}{L} = -8 \cdot 10^{-5} e_{\%}^3 + 0.008 e_{\%}^2 - 0.357 e_{\%} + 5.540 \quad (2)$$

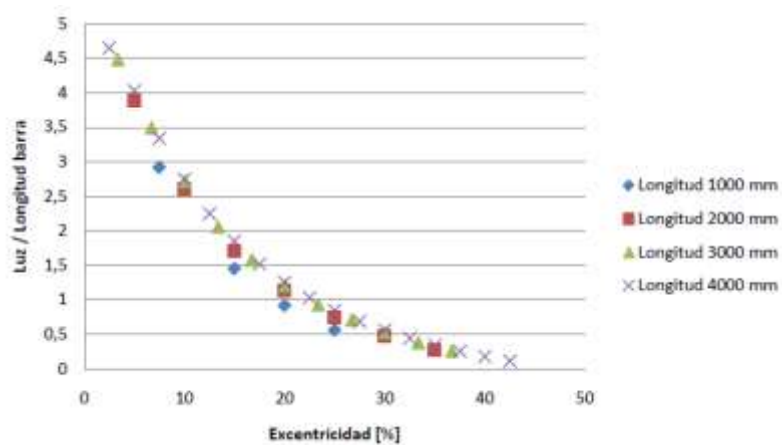
**Figura 5: Luz de una estructura plegable de 8 barras en función de la excentricidad. Fuente: Elaboración propia**



**Figura 6: Altura de una estructura plegable de 8 barras en función de la excentricidad. Fuente: Elaboración propia**



**Figura 7: Relación luz/L frente a  $e_{\%}$ . Fuente: Elaboración propia**



De una forma similar se podrían obtener una correlación entre la altura de la estructura y la longitud de la barra y la excentricidad en la que pivota la unidad de tijera (ecuación 3)

$$\frac{Altura}{L} = -4 \cdot 10^{-5} e_{\%}^3 + 0.004 e_{\%}^2 - 0.169 e_{\%} + 2.668 \quad (3)$$

Los resultados anteriores resultan ser muy interesantes ya que permiten correlacionar dos dimensiones que van a ser muy importantes para el diseño de la estructura (luz y altura) con la longitud de la barra y su excentricidad. De esta forma para una aplicación particular conocida la altura y la luz deseada se pueden obtener un conjunto de combinaciones de longitudes y excentricidades que cumplan esta configuración geométrica.

Una de las limitaciones del estudio que se presenta es que se ha limitado al análisis de 8 unidades tijeras. En posteriores trabajos se pretende cambiar el número de unidades tijeras y conseguir con ello un conjunto de curvas similares a las expresadas en las ecuaciones 2 y 3.

Con la consecución de estas correlaciones estaría solucionado el modelado geométrico. Correspondería en un segundo lugar determinar si las estructuras diseñadas cumplen con los Estados Límites Últimos y con los Estados Límites de Servicio. Esto será desarrollado en el siguiente apartado.

### 3.3. Comprobación de los Estados Límites Últimos de una de las estructuras

Una vez que se ha realizado una simulación geométrica que garantiza la compatibilidad de las estructuras estudiadas, sería necesario comprobar si las estructuras cumplen con la normativa vigente en lo referente a la seguridad estructural. Para garantizar este extremo, resulta necesario utilizar un programa que permita determinar los esfuerzos y los desplazamientos. En este caso se ha optado por Robot Structural Analysis ©. Consideramos que puede ser una buena opción al tratarse de programas comercializados con la misma compañía. No obstante, la compatibilidad entre estos programas no está garantizada. Es el caso que hemos podido comprobar con la modelización en Revit© y posterior exportación a Robot Structural Analysis ©. A pesar de compartir la misma matriz, las exportaciones de los modelos de un programa a otro pueden conllevar una pérdida de información.

El estudio estático se ha realizado considerando que la estructura está formada por pórticos separados por 5m de distancia, que están cubiertos por una lona. La estructura se ha situado en Cádiz. La ciudad de Cádiz se encuentra dentro de la zona C, según el Documento Básico de Seguridad Estructural- Acciones en la Edificación (CTE DB SE AE) (España, 2006).

Las características de la lona elegida PVC Megaflex Opaco pueden observarse en la tabla 1

**Tabla 1. Características de la lona PVC Megaflex Opaco (LDM, 2018)**

Márgenes	Medida (mm)
Composición	Poliéster 1300D 14x14
Revestimiento	PVC
Característica	Alta resistencia (rasgado y ruptura)
Peso	0.8 kp/m <sup>2</sup>
Espesor	0.72mm±5%
Tiempo de vida	5 años

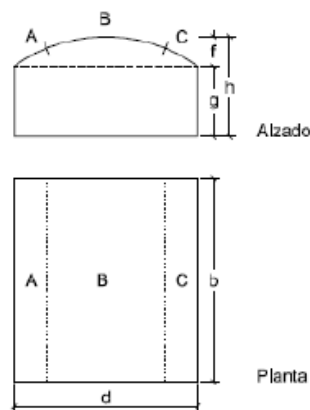
En un principio no se ha considerado sobrecarga de uso. Con ello se considera que sobre la estructura no va a recaer ninguna carga más allá de su propio peso y el mantenimiento se realizará cuando la estructura se encuentre plegada.

Respecto a las cargas de nieve, estas no serán consideradas. Al tratarse de una estructura que puede ser plegada y desplegada, se considera que en el caso hipotético de que nevara en la ciudad de Cádiz sería posible plegar la estructura y por lo tanto no considerar la carga de nieve.

De esta forma, la estructura estará sometida al peso propio de la estructura y de la lona así como a las cargas de viento.

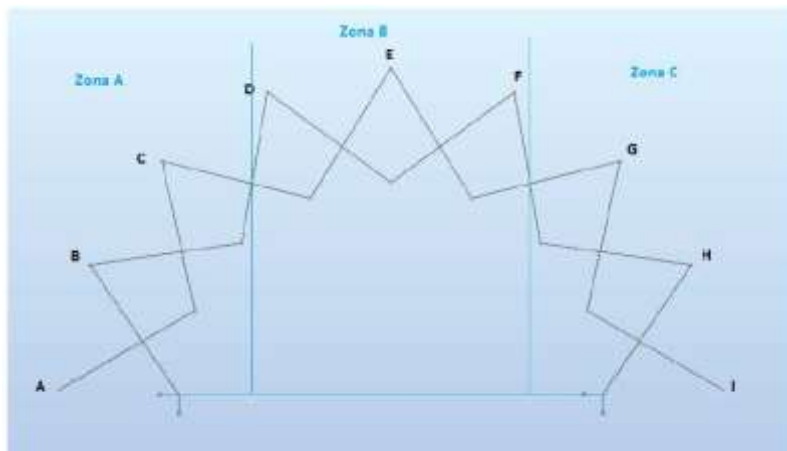
Para el cálculo de estas cargas de viento, es necesario obtener conforme a lo establecido en el CTE DB SE AE un coeficiente de forma, para la obtención del coeficiente de forma se asimila la estructura a una cubierta cilíndrica según lo descrito en la normativa aplicable.

**Figura 8: Determinación de zonas en cubierta cilíndrica según el CTE DB SE AE. Fuente: CTE DB SE AE (España, 2006)**



Para la estructura considerada la zonificación utilizada se corresponde con la mostrada en la figura 9.

**Figura 9: Zonificación de la estructura plegable. Fuente: Elaboración propia**



Para la determinación de la dirección de la carga de viento se establece que esta será perpendicular a la lona, que a su vez cubriría los nudos *ABCDEFHI*. Por lo tanto la carga será proporcional a la distancia que una cada par de nudos y tendrá como dirección la



perpendicular a la dirección que une los nudos, y de sentido saliente o entrante en función de si la carga es de succión o de presión.

Una vez introducidas cada una de las cargas, el programa permite realizar las combinaciones de acciones correspondientes pudiendo comprobarse cada una de las barras.

La figura 10 muestra un ejemplo de análisis de los resultados para diversas barras calculadas por el programa.

**Figura 10: Comprobación de barras. Fuente: Elaboración propia**

Barra	Perfil	Material	Lay	Laz	Solicit.	Caso
1 Barra_1	110x110x10	S 275	47.53	47.53	0.16	9 ELU
2 Barra_2	110x110x10	S 275	47.56	47.56	0.26	9 ELU
3 Barra_3	110x110x10	S 275	46.39	46.39	0.41	9 ELU
4 Barra_4	110x110x10	S 275	46.30	46.30	0.49	9 ELU
5 Barra_5	110x110x10	S 275	46.39	46.39	0.61	9 ELU
6 Barra_6	110x110x10	S 275	46.34	46.34	0.66	9 ELU
7 Barra_7	110x110x10	S 275	46.30	46.30	0.71	9 ELU
8 Barra_8	110x110x10	S 275	46.30	46.30	0.71	9 ELU
9 Barra_9	110x110x10	S 275	46.34	46.34	0.67	9 ELU
10 Barra_10	110x110x10	S 275	46.35	46.35	0.62	9 ELU
11 Barra_11	110x110x10	S 275	46.34	46.34	0.61	9 ELU
12 Barra_12	110x110x10	S 275	46.35	46.35	0.43	9 ELU
13 Barra_13	110x110x10	S 275	46.34	46.34	0.30	9 ELU
14 Barra_14	110x110x10	S 275	46.48	46.48	0.22	9 ELU
15 Barra_15	110x110x10	S 275	47.65	47.65	0.12	9 ELU
16 Barra_16	110x110x10	S 275	47.53	47.53	0.06	9 ELU

De esta forma, se ha comprobado que el programa Robot Structural Analysis© puede ser utilizado como fuente de información para el diseño final de las estructuras que se pretenden calcular.

Una limitación al proceso mostrado en esta comunicación es que las cargas deben ser introducidas manualmente. Es decir, deben ser calculadas las coordenadas de los nudos, comprobar la zona a la que pertenecen, determinar la dirección de las cargas e introducirlas manualmente. La elaboración de una herramienta que facilitara todas estas operaciones supone un importante reto para la automatización del proceso.

#### 4. Conclusiones

En el presente trabajo se ha demostrado como las técnicas de modelado paramétrico permiten analizar la compatibilidad geométrica de las estructuras plegables formadas por unidades tijeras de carácter polar. Mediante el diseño con Autodesk Inventor© y mediante la parametrización se ha conseguido modelar un conjunto de 39 estructuras plegables con distintas longitudes de barra y excentricidades. Fruto de este análisis se ha obtenido la luz y altura compatible con cada una de las estructuras, permitiendo obtener una curva para estimar los valores sin tener que realizar las simulaciones.

En segundo lugar se ha comprobado la compatibilidad de los modelos producidos con Autodesk Inventor © y Robot Structural Analysis©. Se ha comprobado la compatibilidad de ambos programas y establecido un procedimiento para comprobar los Estados Límites Últimos en estructuras desplegadas de este tipo.

Como líneas de trabajo futuro sería interesante poder realizar un análisis con un número distinto de unidades tijeras y la creación de una interfaz gráfica que permita automatizar todo el proceso.

## 5. Referencias

- Alegria Mira, L., Thrall, A. P., & De Temmerman, N. (2014). Deployable scissor arch for transitional shelters. *Automation in Construction*, 43, 123–131. doi: 10.1016/J.AUTCON.2014.03.014
- Correa, J., Koo, B., & Ferreira, P. (2016). Parallel-kinematics XYZ MEMS part 1: Kinematics and design for fabrication. *Precision Engineering*, 46, 135–146. doi: 10.1016/j.precisioneng.2016.04.009
- Escrig Pallarés, F. (2012). *Modular, ligero, transformable. Un paseo por la arquitectura ligera móvil*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- España. (2006). Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo, por el que se aprueba el Código Técnico de la Edificación. *Boletín Oficial Del Estado*, (74, 28 de Marzo 2006), 11816–11831.
- Gantes, C. J., Georgiou, P. O., & Koumoussis, V. K. (1998). Optimum design of deployable structures using genetic algorithms. *WIT Transactions on The Built Environment*, 38, 255–264.
- LDM. (2018). Características de lonas. Consultado 6 de Abril de 2018. Obtenido de: <http://ldm.la/producto/megaflex/>
- Lederman, G., You, Z., & Glišić, B. (2014). A novel deployable tied arch bridge. *Engineering Structures*, 70, 1–10. doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2014.03.015
- Mira, L. A., Coelho, R. F., Thrall, A. P., & Temmerman, N. De. (2015). Parametric evaluation of deployable scissor arches. *Engineering Structures*, 99, 479–491. doi: 10.1016/j.engstruct.2015.05.013
- Piñero, E. P. (1961). A reticular movable theatre. *The Architects' Journal*, 134, 299.
- Tao, J., Li, L., & Yu, S. (2018). An innovative eco-design approach based on integration of LCA, CAD\CAE and optimization tools, and its implementation perspectives. *Journal of Cleaner Production*. doi: 10.1016/j.jclepro.2018.03.213
- Zhang, Y., Li, N., Yang, G., & Ru, W. (2017). Dynamic analysis of the deployment for mesh reflector deployable antennas with the cable-net structure. *Acta Astronautica*, 131, 182–189. doi: 10.1016/J.ACTAASTRO.2016.11.038

## Agradecimientos

Los autores agradecen la ayuda concedida por la Junta de Extremadura para la realización de actividades de investigación y desarrollo tecnológico, de divulgación y de transferencia de conocimiento por los Grupos de Investigación de Extremadura. Esta ayuda ha sido cofinanciada por fondos FEDER.