

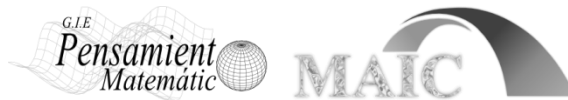
# Investigación

## Evaluación de la influencia del factor de forma de una estructura de nervios cuatripartitos bajo solicitaciones cuasiestáticas

## Evaluation of the influence of the form factor of a quadripartite nerve structure under quasi-static loads

Juan Manuel Ros García, Roberto Alonso González Lezcano  
y Susana Hormigos Jiménez

Revista de Investigación



Volumen IV, Número 2, pp. 075-090, ISSN 2174-0410  
Recepción: 15 Ago'14; Aceptación: 10 Sep'14

1 de octubre de 2014

### Resumen

A partir de un modelo estructural básico, definido por nervios cuatripartitos de curvatura esquinada y bastidor horizontal de base, se realizan diferentes simulaciones numéricas por discretización de puntos, considerando el factor de forma de su geometría, variable. El método aplicado sirve para confirmar que el coeficiente de seguridad resultante de la comparación realizada a los modelos, se optimiza al reducir progresivamente la relación entre la superficie de la envolvente y el volumen encerrado por la estructura espacial. El modelo es sometido a la acción de cargas permanentes y acciones de viento con efecto prolongado en su aplicación cuasiestática. Se realiza un análisis del comportamiento sobre la estructura portante tanto de manera aislada como considerando las cargas totales, determinando por cada configuración de forma las zonas más desfavorables solicitadas y la evaluación de cargas dominantes. Asimismo se consideran en la modelización, los casos materiales para la estructura de acero al carbono en la parte inferior horizontal de la base, adoptando la solución tanto con aleación metálica de aluminio como de fibra de vidrio en la parte superior de los nervios cuatripartitos.

**Palabras Clave:** Simulación numérica, modelización numérica, estructura portante, factor de forma.

### Abstract

From a basic structural model, defined by quadripartite nerves with cloister curvature and horizontal frame as the base, different numerical simulations are performed by using points discretization, considering the form factor of its geometry, variable. The method used allows confirming that the safety factor resulting from the comparison of the models is

optimized when reducing gradually the ratio of the covered area and the volume enclosed by the spatial structure. The model is subjected to the action of permanent and wind loads, with prolonged effect in their quasistatic application. It is performed a behavioral analysis of the supporting structure both in isolation and considering the total loads, determining for every shape configuration the worst requested areas and evaluating prevailing loads. It is also considered when modeling the material cases for carbon steel structure in the lower horizontal part of the base, thus adopting the solution with aluminum metal alloy as glass fiber in the top of the quadripartite nerves.

**Keywords:** Numerical simulation, numerical modelization, supporting structure, form factor.

## 1. Introducción

Se hace preciso establecer un método de cálculo que permita establecer una comparación de las variables que operan en el diseño estructural basado en fiabilidad, coste y seguridad de un módulo espacial. Con tal objetivo se demuestra que a partir del desarrollo de simulaciones numéricas de una estructura portante definida por nervios cuatripartitos, se alcanzan mejores resultados desde el punto de vista de resistencia mecánica al practicar una reducción de su *factor de forma*. Se entiende por *factor de forma* de un espacio construido como el coeficiente entre la superficie de la envolvente y el volumen que comprende ( $S/V$ ). A medida que el volumen aumenta, también lo hace la superficie exterior, pero en menor proporción, de manera que el factor de forma disminuye. Igualmente, a mayor compacidad menor superficie exterior<sup>1</sup>.

Se pretende demostrar mediante simulaciones numéricas por elementos finitos que al modificar el denominado *factor de forma* de la estructura se puede obtener un mayor índice de seguridad en el diseño de la estructura portante al ser sometida a cargas permanentes y cargas de viento; lo que garantizaría una mejora en su funcionalidad, seguridad y habitabilidad. Dentro de las diferentes opciones materiales, se verifica dimensionalmente considerando para la parte inferior horizontal de la estructura, acero al carbono y aleación metálica por un lado y fibra de vidrio por otro para los nervios superiores cuatripartitos.

Se procede del modo que el factor de seguridad se determina por medio de la siguiente expresión:

$$\eta_M = \sigma_{VM} / \sigma_Y$$

Donde:

$\eta_M$  es el coeficiente de seguridad aplicable a la propiedad de los materiales en la combinaciones de cargas estáticas para los distintos materiales [1].

$\sigma_{VM}$  es el valor resultante de esfuerzo debido a las sollicitaciones aplicadas (esfuerzo de Von Mises en nuestro caso).

$\sigma_Y$  es el valor de cálculo de las propiedades de los materiales (límite elástico).

---

<sup>1</sup> Compacidad se define como la relación entre el volumen comprendido dentro de una superficie envolvente, es decir, el inverso del factor de forma.

El material fallará cuando la máxima energía de distorsión se presenta en materiales dúctiles que son capaces de absorber una cierta cantidad de energía antes de sufrir una falla o de romper.

De acuerdo con este criterio un elemento estructural colapsa cuando en alguno de sus puntos la energía de distorsión por unidad de volumen rebasa un cierto umbral (ver figura 1):

$$e_{dist} \geq \frac{\sigma_Y^2}{2E}$$

La fluencia ocurrirá cuando la energía de distorsión de un volumen unitario sea igual a la energía de distorsión del mismo volumen cuando se lo someta a un esfuerzo uniaxial hasta la resistencia a la fluencias (límite elástico del material).

El esfuerzo de Von Mises se obtiene por la siguiente expresión:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \geq \sigma_Y$$

Donde:

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$$

$\sigma_Y$ , la tensión del límite elástico del material de la pieza.

$\sigma_1, \sigma_3$ , la mayor y la menor tensión principal en el punto considerado.

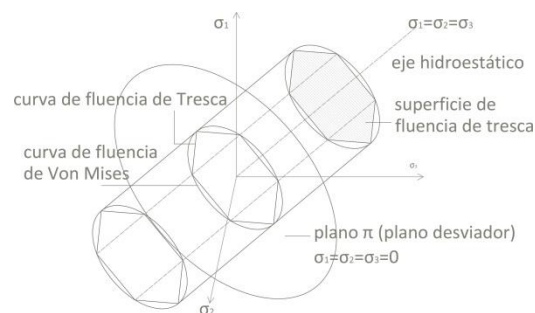


Figura 1. Representación criterio de Von Mises

Es sabido que la forma envolvente de un edificio representa un factor determinante en cuanto a su aprovechamiento climático y relación con el entorno, definido por dos de sus principales características: la superficie de su cerramiento y el volumen que encierra.

A medida que el volumen aumenta, también lo hace la superficie exterior, pero en menor proporción, de manera que el *factor de forma* disminuye. Igualmente, a mayor compacidad menor superficie exterior y, consecuentemente, pérdidas energéticas menores y mayor eficiencia prestacional.

Así que, para minimizar el intercambio energético entre el edificio y su ambiente exterior, teóricamente la mejor forma de una edificación sería la esférica. La compacidad de un edificio depende de la geometría (forma y tamaño) de las condiciones de contorno [2].

De igual manera se pretende demostrar que el *factor de forma* no solo contribuye a minimizar el balance energético del espacio construido sino que también tiene incidencia directa en la resistencia mecánica de su estructura, y que a mayor compacidad volumétrica existe una mejor respuesta frente a resistencia de cargas referidas a viento y nieve.

Los modelos que han sido utilizados (ver Figura 2), sometidos a variables tipológicas de compacidad geométrica son:

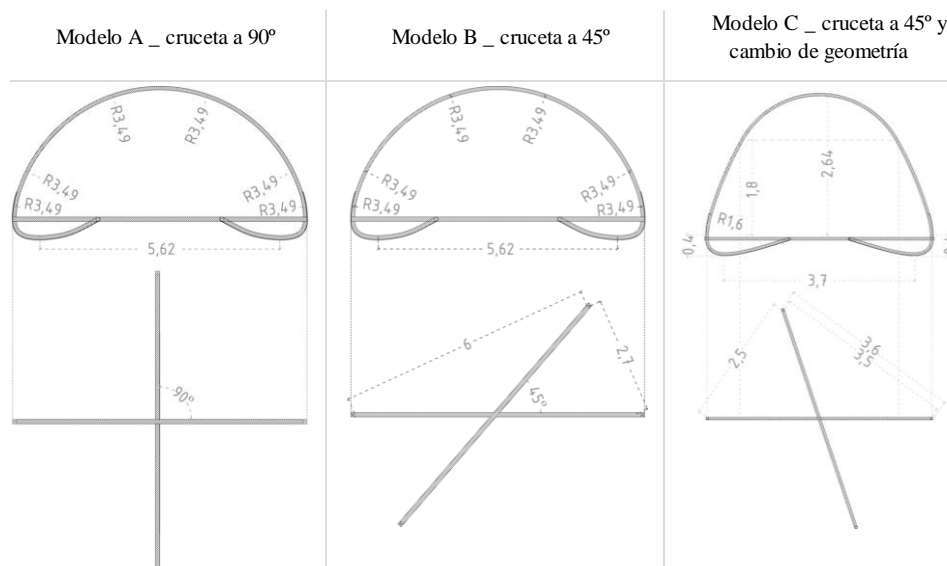


Figura 2. Modelos de tipología variable considerados

## 2. Metodología desarrollada

Para la determinación del modelo se ha utilizado el método de elementos finitos como valiosa herramienta en la etapa del diseño ya que permite no solo representar geometrías complejas, considerando las más variadas condiciones de carga, y las propiedades mecánicas del material, sino que también facilita la interacción entre los distintos componentes estructurales del modelo<sup>2</sup>.

Se procede de manera que la estructura queda dividida en pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema.

<sup>2</sup> La metodología por elementos finitos permite realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo. Sin embargo no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método. Los prototipos, por lo tanto, siguen siendo necesarios, pero en menor número, ya que el primero puede acercarse bastante más al diseño óptimo, minimizando el elevado coste económico y el tiempo de desarrollo.

Un punto cualquiera del sólido tiene tres desplazamientos  $u, v, w$ , que son función de las coordenadas  $(x, y, z)$  del punto (ver Figura 3), y que se agrupan en un vector:

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix}$$

Un nodo cualquiera de un elemento tiene tres desplazamientos  $u, v, w$ . Todos ellos se agrupan formando el vector de desplazamientos nodales del elemento.

$$\delta^e = [U_1 \ V_1 \ W_1 \ U_2 \ V_2 \ W_2 \ \dots]^T$$

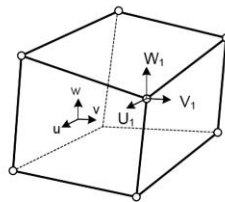


Figura 3. Elemento finito tridimensional de 8 nudos

Los desplazamientos se interpolan en función de los desplazamientos nodales mediante las funciones de interpolación:

$$u = \sum N_i U_i$$

$$v = \sum N_i V_i$$

$$w = \sum N_i W_i$$

Esta interpolación se representa en la forma matricial habitual:

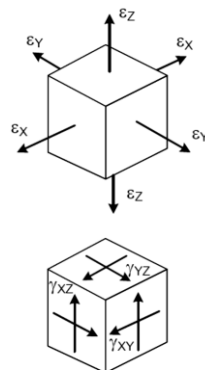
$$\mathbf{u} = \mathbf{N} \delta^e$$

Siendo  $\mathbf{N}$  la matriz de funciones de interpolación, cuya estructura en este caso es:

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & N_n & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \dots & \dots & 0 & N_n & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & \dots & \dots & 0 & 0 & N_n \end{bmatrix}$$

En un punto sólido tridimensional, el vector de deformaciones unitarias contiene seis términos, que corresponden a las tres deformaciones unitaria  $\mathbf{e}$ , y a las tres deformaciones ingenieriles  $\mathbf{g}$ .

Su valor en función de las derivadas de los desplazamientos es, en el caso de las pequeñas deformaciones:



$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial z} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \\ \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \end{Bmatrix}$$

Esta expresión se puede poner en la forma habitual:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \boldsymbol{\partial} \mathbf{u}$$

donde se identifica el operador  $\mathbf{j}$ , de tamaño  $6 \times 3$ , que pasa de las deformaciones  $\mathbf{u}$  a las deformaciones unitarias. Sustituyendo las deformaciones  $\mathbf{u}$  en función de las deformaciones nodales, a través de las funciones de interpolación se obtiene:

$$\boldsymbol{\epsilon} = \boldsymbol{\partial} \mathbf{u} = \boldsymbol{\partial} \mathbf{N} \boldsymbol{\delta}^e = \mathbf{B} \boldsymbol{\delta}^e$$

La matriz  $\mathbf{B}$  relaciona las deformaciones de los nudos con las deformaciones unitarias en un punto cualquiera del elemento:

$$\mathbf{B} = \boldsymbol{\partial} \mathbf{N}$$

Dada la estructura de  $\mathbf{N}$ , la matriz  $\mathbf{B}$  se puede poner en la forma:

$$\mathbf{B} = \partial \mathbf{N} = \partial \begin{bmatrix} N_1 & 0 & 0 & \dots & \dots & N_n & 0 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & \dots & \dots & 0 & N_n & 0 \\ 0 & 0 & N_1 & \dots & \dots & 0 & 0 & N_n \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = [\mathbf{B}_1 \quad \mathbf{B}_2 \quad \dots \quad \mathbf{B}_n]$$

Cada una de las matrices  $\mathbf{B}_i$  tiene la forma siguiente:

$$\mathbf{B}_i = \partial \begin{bmatrix} N_i & 0 & 0 \\ 0 & N_i & 0 \\ 0 & 0 & N_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} \\ \frac{\partial N_i}{\partial y} & \frac{\partial N_i}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_i}{\partial z} & \frac{\partial N_i}{\partial y} \\ \frac{\partial N_i}{\partial z} & 0 & \frac{\partial N_i}{\partial x} \end{bmatrix}$$

Las tensiones en un punto cualquiera del dominio están definidas por el tensor de tensiones en tres dimensiones:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \end{Bmatrix}$$

La ecuación constitutiva del material para un material elástico lineal es:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_0) + \boldsymbol{\sigma}_0$$

Siendo:

$\mathbf{D}$  la matriz elástica, que para un material elástico lineal es constante y depende de sólo dos parámetros: el módulo de elasticidad  $E$  y el módulo de Poisson  $\nu$ . Su valor es

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix}$$

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$$

$\mathbf{e}_0$  es el vector de las deformaciones unitarias iniciales existentes en el material en el punto considerado, debidas normalmente a las temperaturas, aunque pueden incluirse en ellas las debidas a los errores de forma, etc.

$s_0$  son las tensiones iniciales presentes en el material, de valor conocido.

Se han elaborado diferentes modelizaciones (ver Figura 4) para cada uno de los tres módulos estructurales que han sido considerados, modificando su ya descrito *factor de forma*. Los modelos desarrollados constan de 13654 nodos y 4567 elementos del tipo C3D8R<sup>3</sup>.

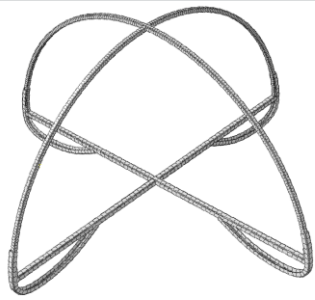
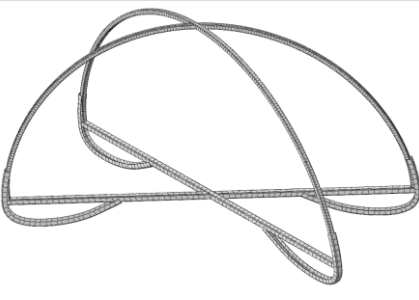
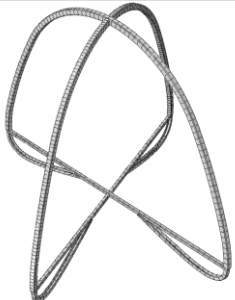
Modelo A _ cruceta a 90°	Modelo B _ cruceta a 45°	Modelo C_ Cruceta a 45° y cambio de geometría
		
n° elementos: 21672 n° nodos: 6720	n° elementos: 22528 n° nodos: 77908	n° elementos: 7252 n° nodos: 29996

Figura 4. Mallado de los modelos

Una vez definidos los modelos, se introducen las propiedades de los materiales de los distintos elementos de los prototipos analizados. También es necesario definir su sección y, cuando se precise, su orientación. Los tres modelos comparten las siguientes características:

<sup>3</sup> El modelo se discretizó a partir de una estructura mallada mediante elementos lineales hexaédricos de 8 nudos del tipo C3D8R (integración reducida). Estos elementos nos dan una solución precisa con un menor coste computacional.



Las propiedades de los apoyos y de las barras inferiores de los modelos, piezas que se ven sometidas a deformación plástica (por tanto, es necesario dar información al programa sobre su comportamiento, también en régimen plástico) y constituidas por perfiles de acero, son las siguientes:

- Coeficiente de Poisson: 0.3
- Módulo elástico: 202 GPa
- Densidad: 7850 Kg/m<sup>3</sup>
- Límite elástico: 300MPa
- Alargamiento: 0,20
- Resistencia de rotura: 500MPa

Por otro lado, las barras superiores están formadas por perfiles de aleación metálica de aluminio con las siguientes propiedades:

- Coeficiente de Poisson: 0.33
- Módulo elástico: 70 GPa
- Densidad: 2700 Kg/m<sup>3</sup>
- Límite elástico: 150 MPa
- Alargamiento: 0,08
- Resistencia de rotura: 180MPa

Se supone también un segundo caso en el que las barras superiores, en vez del mencionado aluminio, estén conformadas por perfiles tubulares de fibra de vidrio (material anisótropo, cuyo comportamiento varía según la dirección de la fibra) con las siguientes características [3]:

- Coeficiente de Poisson: 0.09-0.23
- Módulo elástico: 23 GPa
- Densidad: 1800 Kg/m<sup>3</sup>
- Límite elástico de tracción a 90° de la dirección de la fibra: 50 MPa
- Límite elástico de tracción a 0° de la dirección de la fibra: 240 MPa
- Límite elástico de compresión a 90° de la dirección de la fibra : 70 MPa
- Límite elástico de compresión a 0° de la dirección de la fibra : 240 MPa
- Alargamiento: 0,023
- Esfuerzo a flexión: 240 MPa

Una vez asignados los materiales a cada una de las partes que constituyen los prototipos se lleva a cabo el ensamblaje de las mismas, de tal forma que queda definida la posición que ocupan en el espacio. Para ello, se han creado partes independientes para emplearlas como referencia al crear particiones en las superficies de contacto de los apoyos con las barras

inferiores con el propósito de facilitar la convergencia del programa a la hora de obtener los resultados.

Es importante definir las superficies de contacto existentes entre los distintos elementos. Un sólido se considera como un conjunto de nodos vinculados unos a otros mediante elementos, si esto no queda debidamente indicado ambos volúmenes entrarían en contacto sin apreciar ninguno de los dos la presencia del otro, de manera que se simularía el movimiento de cada pieza de forma independiente.

Para ello se definen las superficies de contacto y las propiedades de su interacción. [4] [5]

Ya que las propiedades han sido indicadas, debe especificarse las cargas a las que se ven sometidos los modelos (indicando las superficies que se ven afectadas por estas) y las condiciones de contorno de los mismos.

Los tres modelos se ven sometidos a lo siguiente:

- Cargas en barras superiores:
- Cargas de nieve:  $20 \text{ Kp/m}^2$
- Cubierta:  $3 \text{ Kp/m}^2$
- Cargas de viento:  $\alpha=20^\circ$
- Barlovento:  $66 \text{ Kp/m}^2$
- Sotavento:  $-30 \text{ Kp/m}^2$
- Cargas en barras inferiores y apoyos:
- Cargas de uso:  $200 \text{ Kp/m}^2$
- Efecto coriolis:  $15 \text{ Kp/m}^2$
- Balasto:  $1800 \text{ Kp/m}^3$

La carga de barlovento de  $66 \text{ Kp/m}^2$  ha sido asignada en la superficie exterior de la mitad de las barras que conforman la cruceta superior, mientras que la de sotavento de  $-30 \text{ Kp/m}^2$  se ha incluido de la misma manera en la mitad restante de dicha cruceta.

En cuanto a la asignación de las cargas de nieve y cubierta se ha seleccionado la totalidad de la superficie exterior de los perfiles de aluminio.

La carga de viento considerada corresponde a una velocidad del viento de  $75 \text{ km/h}$ . La dirección del viento se considera paralela al suelo, no obstante, la presión sobre la estructura se considera perpendicular a la superficie de esta.

El viento produce presiones por debajo de la línea del plano osculador en la zona de barlovento y succiones por encima de esta línea y en la zona de sotavento (ver Figura 5).

La dirección del viento se ha considerado paralela al eje X. La carga de viento en el sector de presiones se ha considerado constante y con valor de  $66 \text{ Kp/m}^2$ .

En el sector de succiones, la carga también se ha considerado constante y con valor de  $-30 \text{ Kp/m}^2$ .

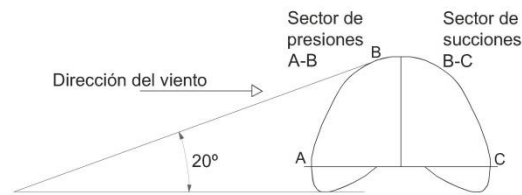


Figura 5. Cargas de viento

La carga de uso se ha aplicado en el área superior de las barras inferiores. Para incluir la carga de balasto se ha seleccionado la superficie inferior de los apoyos, al igual que a la hora de añadir el efecto coriolis teniendo en cuenta también la superficie de las barras inferiores comprendida entre los apoyos.

Por último se han definido las condiciones de contorno indicando una superficie determinada de un grupo de elementos, en la parte inferior de los perfiles que conforman los apoyos, empotrada en el terreno. Las cargas y las condiciones de contorno han sido incluidas por unidad de superficie y en coordenadas cartesianas.

Se sabe que las cargas a la que se ven sometidos los modelos son permanentes. Teniendo esto en cuenta definimos un único paso de solicitaciones de cargas en el que asumimos un valor que asciende literalmente desde cero hasta llegar al máximo, con la finalidad de que la convergencia para obtener resultados se consiga con mayor facilidad.

### 3. Resultados numéricos

En la Tabla 1 se puede apreciar que en los modelos de secciones tubulares de 5mm el modelo con plano inferior horizontal en cruceta de 45° y factor de forma más bajo está sometido a menores esfuerzos. Resultando un mayor margen de seguridad al fallo frente al viento y ante las sobrecargas de uso; esto es aplicable tanto para las estructuras de parte superior de aluminio como de parte superior de fibra de vidrio. En todos los modelos analizados la zona más desfavorable resultó ser la estructura inferior de acero.

También se aprecia claramente que la estructura con suelo en cruceta a 45° e inferior factor de forma está siendo sometida a menores desplazamientos horizontales bajo las mismas solicitaciones

Modelo	Cruceta a 45°			Cruceta a 90°			Modelo actual (cruceta a 45°)		
Sección	Perfiles de 5mm								
Material	Acero + Aluminio								
Cargas	Uso	Viento	Cargas totales	Uso	Viento	Cargas totales	Uso	Viento	Cargas totales
Esfuerzo Von Mises ( Mpa)	<b>100,8</b>	<b>30,03</b>	<b>100,4</b>	<b>96,27</b>	<b>29,5</b>	<b>95,87</b>	<b>60,81</b>	<b>49,06</b>	<b>74,57</b>
Desplazamiento (m)	1,64E-03	1,69E-03	1,68E-03	1,65E-03	1,66E-03	1,67E-03	5,78E-04	1,42E-03	1,44E-03
Defomormación unitaria	3,70E-04	3,33E-04	3,69E-04	4,78E-04	2,01E-04	4,77E-04	4,03E-04	3,60E-03	6,82E-04
Material	Acero + Fibra de vidrio								
Cargas	Uso	Viento	Cargas totales	Uso	Viento	Cargas totales	Uso	Viento	Cargas totales
Esfuerzo Von Mises ( Mpa)	<b>100,8</b>	<b>37,06</b>	<b>100,4</b>	<b>96,27</b>	<b>36,42</b>	<b>95,87</b>	<b>67</b>	<b>49,48</b>	<b>85,04</b>
Desplazamiento (m)	1,64E-03	4,92E-03	3,40E-03	1,65E-03	4,82E-03	4,84E-03	5,95E-04	3,60E-03	3,61E-03
Defomormación unitaria	3,70E-04	9,94E-04	5,25E-04	4,78E-04	5,45E-04	5,47E-04	9,65E-04	9,43E-04	1,20E-03

Figura 6. Resultados numéricos según cargas de uso, cargas de viento y cargas totales.

En el modelo A con un *factor de forma* de 1,77 se alcanza un esfuerzo Von Mises de 95,87MPa (ver Figura 6) en la parte inferior de la estructura lo que da lugar a un rango de seguridad de 2,61 para un límite elástico de 250MPa de un acero dúctil. Los esfuerzos que se producen en la parte superior de la estructura no se ven alterados al modificar el material de aluminio a fibra de vidrio.

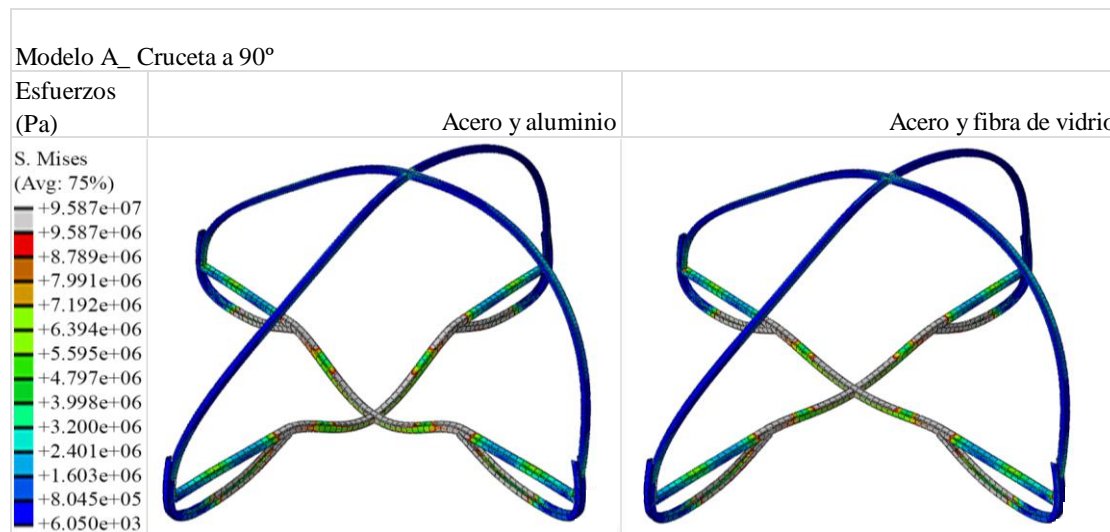


Figura 7. Modelo A. Esfuerzos de Von Mises.

En el modelo B con un *factor de forma* de 1,86 se alcanza un esfuerzo Von Mises de 104,40MPa (ver Figura 7) en la parte inferior de la estructura lo que da lugar a un rango de seguridad de 2,39 para un límite elástico de 250MPa de un acero dúctil; de igual manera, los esfuerzos que se producen en la parte superior de la estructura no se ven alterados al modificar el material de aluminio a fibra de vidrio.

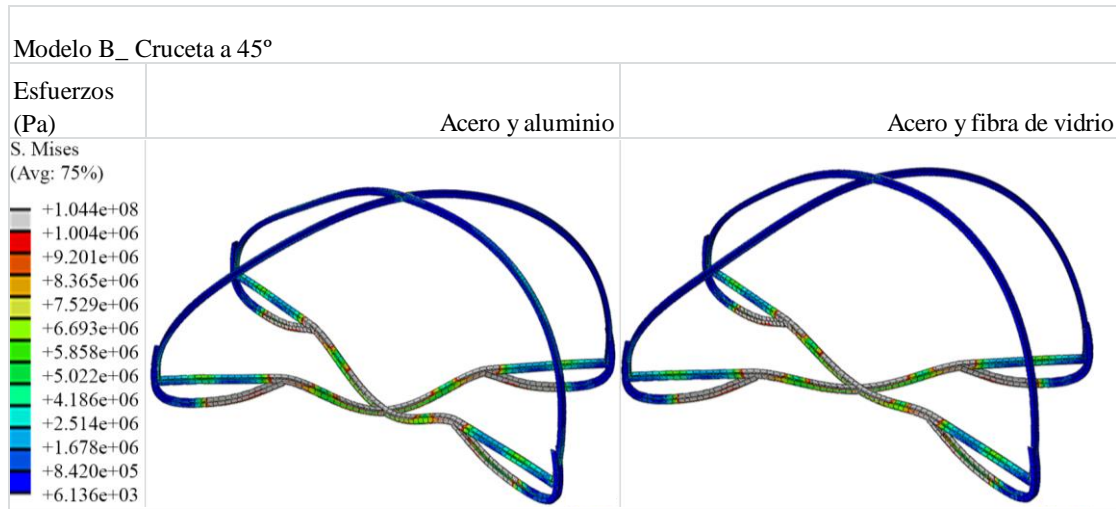


Figura 8. Modelo B. Esfuerzos de Von Mises.

En el modelo C con un *factor de forma* de 1,29 se alcanza un esfuerzo Von Mises de 74,52MPa y 85,04MPa (ver Figura8) en la parte inferior de la estructura con parte superior de aluminio y fibra de vidrio respectivamente lo que da lugar a rangos de seguridad de 3,35 y 2,94 respectivamente para un límite elástico de 250MPa de un acero dúctil; lo que demuestra sensiblemente que estructuras con menor *factor de forma* obtienen rangos de seguridad mayores.

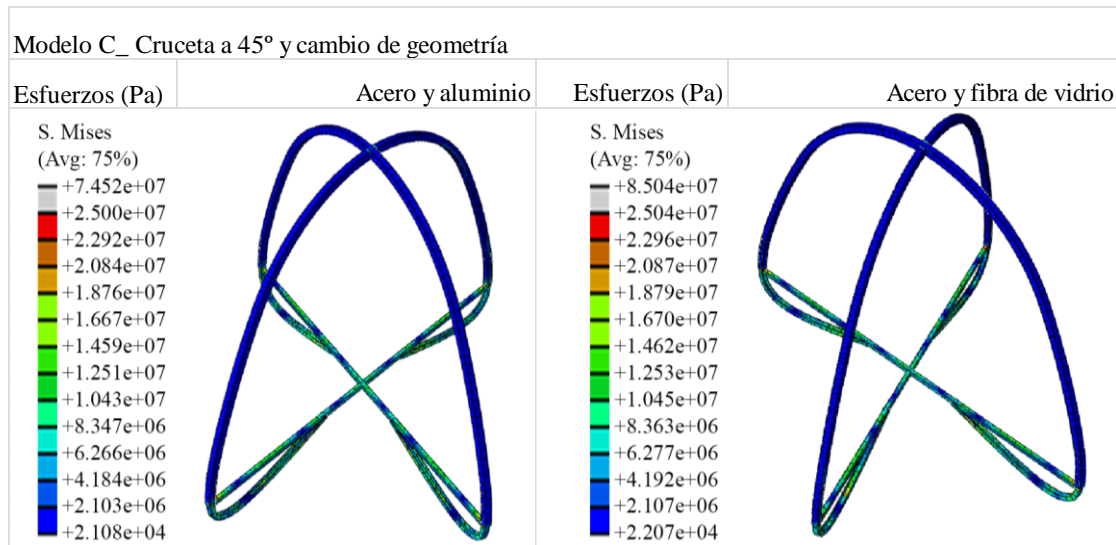


Figura 9. Modelo C. Esfuerzos de Von Mises.

## 4. Conclusiones

Una vez ejecutadas las simulaciones numéricas podemos concluir que al reducir la superficie exterior de los modelos variables definidos, los resultados constatados soportan mejor las solicitaciones de viento. Asimismo al aumentar el *factor de forma* utilizado se aumenta la resistencia mecánica de la estructura pasando de un rango de seguridad de 2,39 (modelo B) a otro de 3,35 (modelo C). Lo que proporciona desde un punto de vista material una mayor fiabilidad, seguridad y funcionalidad, aportando un incremento de condiciones de competitividad constructiva, en condiciones de utilidad y habitabilidad; obteniendo así un equilibrio optimizado entre requerimientos y prestaciones.

La resistencia mecánica de la parte superior aumenta al disminuir el área expuesta al viento, y la forma de cruceta a 45° aumenta la resistencia frente a las sobrecargas de uso.

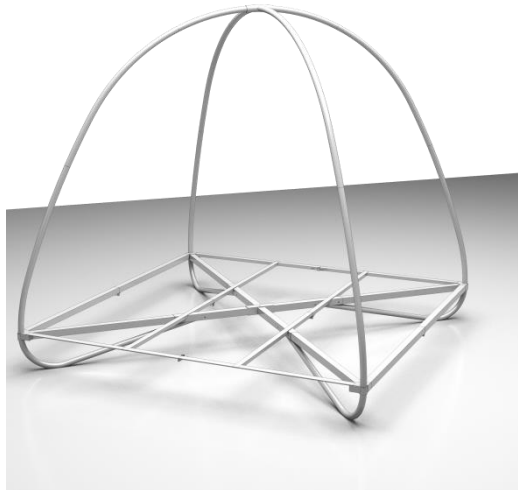


Figura 10. Modelización geométrica de la mejor solución obtenida

Se muestra que las solicitaciones de uso y de viento son las más desfavorables. Se puede corroborar que aún no se supera el límite elástico del acero (300MPa) ni del aluminio (150MPa) en ninguno de los modelos lo que conllevaría a establecer una sección transversal de sección más reducida dando lugar a un coste mínimo de material.

Se corrobora mediante las simulaciones numéricas que las estructuras con la parte superior aluminio e inferior acero y la estructura con la parte superior de fibra de vidrio y la inferior en acero soportan sobradamente las solicitaciones de cargas impuestas con factores de seguridad de diseño bastante fiables y seguros.

Se verifica que los desplazamientos de los tres modelos con las solicitaciones aplicadas son mínimos cumpliendo con los valores esperados de fiabilidad según normativas de servicio.

Se comprueba además que las deformaciones de la estructura cumplen dentro de los rangos establecidos de seguridad, al estar muy por debajo de las zonas de deformaciones plásticas de los materiales o de tensión de rotura de los mismos.

Se puede deducir de todo lo expuesto que las presiones del viento a barlovento y sotavento y el efecto coriolis, supuestas para un viento de 75 km/h, así como las solicitaciones

de carga, tipos de uniones, geometrías y materiales elegidos no afectan la deformada y los desplazamiento del modelo de la estructura ya que en todos los modelos simulados los resultados arrojan valores de los mismos dentro de los rangos de seguridad y habitabilidad aceptables .

Se verifica finalmente que los modelos propuestos, con estructura superior de aluminio o fibra de vidrio y estructura inferior de acero, cumplen con las condiciones de diseño óptimo de acuerdo a variables geométricas bajo las solicitaciones impuestas, ofreciendo mejores resultados de consumo material, el modelo con menor *factor de forma*.

La seguridad alcanzada en la mejor solución obtenida (ver Figura 9) garantiza, que bajo desviaciones aleatorias de los requerimientos previstos, poder mantener un margen adicional de prestaciones muy por encima de las mínimas estrictamente necesarias.

## Referencias

- [1] HAMROCK, B. *Diseño de elementos de máquinas*, pág 56, McGraw-Hill, 2000.
- [2] DRUET, L.; BUCANEGRA, M<sup>a</sup> C.; ORDOÑEZ, N. y VILLAR, J.S. *Guía de Edificios residenciales de alta calificación energética e integración de energías renovables*, pág 145-146, Fundación Habitec, 2011.
- [3] RIDRUEJO, A.; GONZÁLEZ, C. y LLORCA, J. *Simulación Numérica del Comportamiento a Tracción de un fieltro de fibra de vidrio*, *Análisis de Mecánica de la Fractura 26*, Vol2, Pág 395, 2009.
- [4] KARLSSON, S. *Abaqus theory manual. 6.4.ed. Ed. Pawtucket*, pág 76, Providence, USA 2004.
- [5] KUSHAWAHA, R.; SHEN, J. *Finite Element analysis of dynamic interaction between soil and tillage tool*. Transactions of the ASAE. Vol 37. pág 1315-1319, 1995.

### Sobre los autores:

*Nombre:* Juan Manuel Ros García  
*Correo Electrónico:* jmros.eps@ceu.es  
*Institución:* Universidad San Pablo-CEU, Madrid, España.

*Nombre:* Roberto Alonso González Lezcano  
*Correo Electrónico:* rgonzalezcano@ceu.es  
*Institución:* Universidad San Pablo-CEU, Madrid, España.

*Nombre:* Susana Hormigos Jiménez  
*Correo Electrónico:* s.hormigos@usp.ceu.es  
*Institución:* Universidad San Pablo-CEU, Madrid, España.

