

## Aplicación de pórtico estructural híbrido tipo “Skelsion” a una nave industrial.

### María del Mar GOBERNA PÉREZ

Arquitecta

GmasP Ingeniería y Arquitectura

Socia fundadora

[mgoberna@gmasp.es](mailto:mgoberna@gmasp.es)

### Gonzalo GOBERNA PÉREZ

Ingeniero Industrial

GmasP Ingeniería y Arquitectura

Socio fundador

[ggoberna@gmasp.es](mailto:ggoberna@gmasp.es)

### Diego VELAYOS LÓPEZ

Arquitecto

GmasP Ingeniería y Arquitectura

Arquitecto

[dvelayos@gmasp.es](mailto:dvelayos@gmasp.es)

### RESUMEN

La nave industrial desarrollada para Cica Scania es un edificio destinado a oficinas y talleres para camiones cuya envolvente cuenta con una geometría singular que se resolvió mediante un sistema de pórticos atirantados tipo “skelsion”. Este sistema combina el atirantamiento frente a acciones verticales y frente a acciones horizontales para obtener una estructura ligera y estéticamente atractiva.

**PALABRAS CLAVE:** Pórtico de acero híbrido, Skelsion, Optimización, Estructura ligera.

## 1. Introducción/Antecedentes

El proyecto de la nave industrial para camiones Scania, de la empresa Carrocerías Cica S.L. fue diseñado por los arquitectos *EOVASTUDIO* con una geometría singular, con grandes voladizos angulados y amplios espacios interiores. El edificio se sitúa en el Polígono Industrial Huelva Empresarial, Parcela 1.2 U.E-1, en la esquina entre la Avenida de la Gamba de Huelva y la Avenida del Jamón de Huelva. El proyecto se presentó en abril de 2016, y se prevé construirlo en verano 2017.

El encargo que se realizó a *GmasP Ingeniería y Arquitectura* conllevaba un estudio de optimización para encontrar una solución estéticamente atractiva a la par que económicamente asequible. Después de las reuniones iniciales, se concretó ofrecer distintas soluciones con el objetivo de comparar cuál de las propuestas convencía más en los aspectos económico y estético.

La nave industrial objeto de este proyecto es singular desde su nacimiento, ya que tanto la geometría como los cuidados acabados buscan generar un edificio singular como escaparate para la empresa promotora. La estructura es un elemento fundamental de la imagen arquitectónica del edificio que se destaca tanto en fachadas como en el interior.

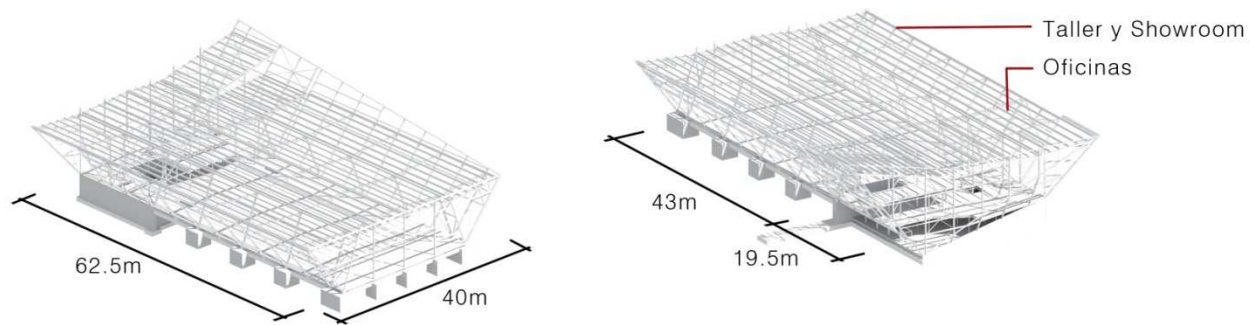
Se puede observar una rénder de la obra terminada en la Figura 1, cortesía de *EOVASTUDIO*.



Figura 1. Rénder de la obra una vez terminada. Foto cortesía de *EOVASTUDIO*

## 2. Descripción del proyecto

El proyecto consiste en dos partes bien diferenciadas, una dedicada a atención y oficinas, y otra dedicada a talleres. El proyecto está regularmente modulado longitudinalmente con crujías de 10m de longitud, las cuales en fachada se materializan mediante pares de puertas. Se puede ver una imagen general del edificio en la Figura 2



**Figura 2. Vista general del edificio**

Las tres primeras crujías están dedicadas a la zona de oficinas, cuya estructura se resuelve de manera convencional mediante pilares, vigas y arriostramientos disimulados en tabiques o vistos. En general, la estructura queda vista, por lo que los detalles de encuentros entre elementos estructurales deben ser muy cuidados para encajar con la arquitectura del conjunto.

El resto del edificio (5 crujías) se dedican al espacio de talleres, de carácter diáfano y formado por calles transversales al edificio que lo cruzan, por lo que sus dos fachadas longitudinales disponen de puertas para entrada y salida de los camiones. Estas dos fachadas pueden estar totalmente abiertas o totalmente cerradas en función del uso.

La geometría de este pórtico tipo del taller, por lo tanto, está formada por dos pilares en V, cuyos elementos más exteriores forman parte de la fachada, mientras que los elementos interiores soportan la viga de cubierta. La viga de cubierta está quebrada para verter el agua en dos limahoyas longitudinales que coinciden con el punto de encuentro de las ramas interiores de los pilares en V.

La forma exterior del edificio está caracterizada por la inclinación hacia el exterior de las dos fachadas longitudinales en un ángulo agudo, cuyo vuelo varía de los 5 a los 8.5m, creando una línea oblicua tanto en los alzados longitudinales como en los transversales.

La estructura principal de todo el proyecto está realizada con acero S275, mientras que los atirantamientos se realizan con acero S460, y las uniones de éstos con acero S355. El hormigón utilizado en forjados, soleras muros y cimentaciones es HA25.

El proyecto y toda su documentación se realizó en BIM, obteniendo un control exhaustivo de la geometría de todo el edificio, con las ventajas que conlleva en modelado tridimensional de toda la estructura. Gracias a los planos obtenidos desde un modelo en tres dimensiones se pudieron descubrir una gran cantidad de detalles y encuentros dificultosos que requirieron detallar a una mayor profundidad que en los planos en dos dimensiones.

### 3. Elección del sistema

La solución usual para las naves de este rango de luces sería una viga acartelada, bien armada o mediante perfiles laminados, o una celosía de cubierta con el cordón superior siguiendo el contorno de la cubierta.

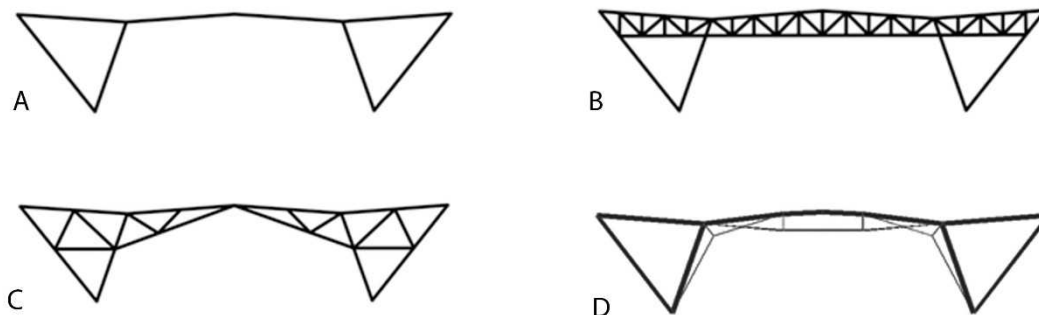
La búsqueda de un sistema que aunara estética y economía conllevó demostrar al cliente que una estructura de las características buscadas no debía ser necesariamente mas cara que una

tradicional, para lo cual se realizó un estudio comparativo de las diferentes soluciones estructurales aptas para resolver la singular geometría de la sección de la nave.

Las diferentes tipologías comparadas fueron:

- A. Pórtico de perfiles laminados: es la original del proyecto y consiste en pilares y vigas materializadas mediante perfiles IPE, HEB o Vigas de gran canto variable que trazan el contorno de la cubierta y la fachada, con los pilares inclinados hacia el centro, coincidiendo con las limahoyas de la cubierta
- B. Pórtico con celosía de cubierta: El pórtico consiste en pilares inclinados siguiendo el contorno de la fachada y pilares inclinados interiores. La cubierta está resuelta mediante una celosía cuyo cordón superior coincide con el trazado de la cubierta
- C. Pórtico en celosía triarticulado: Este pórtico consiste en la utilización de los espacios entre los pilares inclinados interiores y los pilares inclinados de fachada para generar un par de celosías que se encuentran en el punto central de la cubierta. Los cordones superiores de las celosías siguen el trazado de la cubierta.
- D. Pórtico atirantado tipo “skelsion”: Consistente en una serie de elementos trabajando a compresión y otros a tracción.

En la Figura 3 se pueden imágenes de los distintos tipos de estructuras.



**Figura 3. Diferentes estructuras comparadas**

El resultado del estudio comparativo se basa por un lado en la resistencia, y por el otro lado en las deformaciones, concluyendo que para todos los pórticos el condicionante crítico es la deformación horizontal. Como resultado del estudio, se establece que el pórtico skelsion podía resultar el de menor consumo de acero, consiguiendo una estructura muy ligera y de gran esbeltez, a la vez que dotaba de una imagen tecnológica e innovadora al interior de la nave.

Dado que el pórtico skelsion consta de dos partes bien diferenciadas, conformadas por los elementos a compresión y los elementos pretensados, se puede adaptar a la geometría singular del edificio, siguiendo el contorno inclinado de la cubierta y adaptándose a los pilares en V.

#### 4. El sistema skelsion

El sistema de pórtico atirantado Skelsion es un término que tiene su origen en la expresión inglesa de “skeleton in tension”. Este término fue acuñado por el reconocido ingeniero japonés Dr. Masao Saitoh del Departamento de Arquitectura de la “Nihon University” en Japón.

Esta tipología combina el efecto de un pórtico de vigas atirantas (dinteles con tirantes) y arriostramientos pretensados, en el que los elementos adquieren una gran esbeltez gracias a que

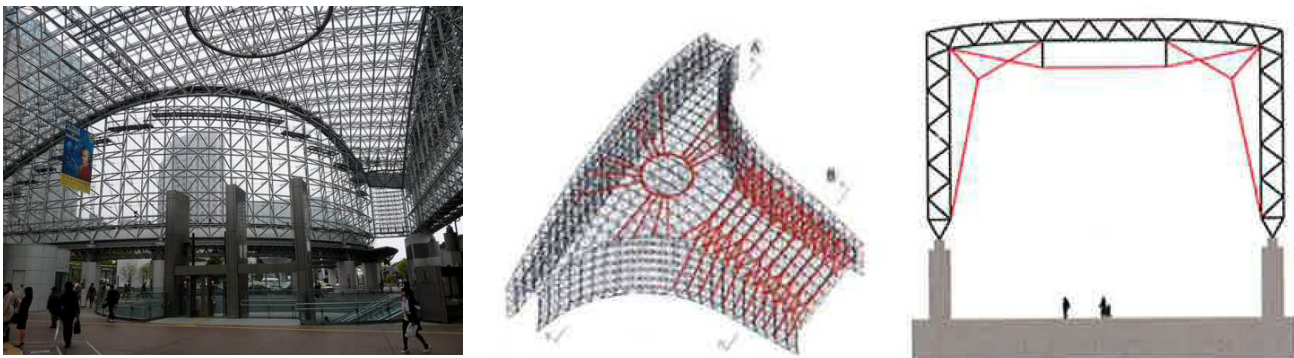
están diseñados para trabajar únicamente a tracción, con la capacidad de resistir tanto las acciones horizontales como las verticales mediante este sistema.

Referencia de este tipo de construcción son la Nihon university subway station (Figura 4) y la ligereza de su interior o la Motenashi dome Kanazawa station (figura 5) consistente en una cúpula de 90m de luz, ambos ejemplos de Masao Saitoh, En ellas se aprecia la ligereza y el aspecto tecnológico interior que se consigue.



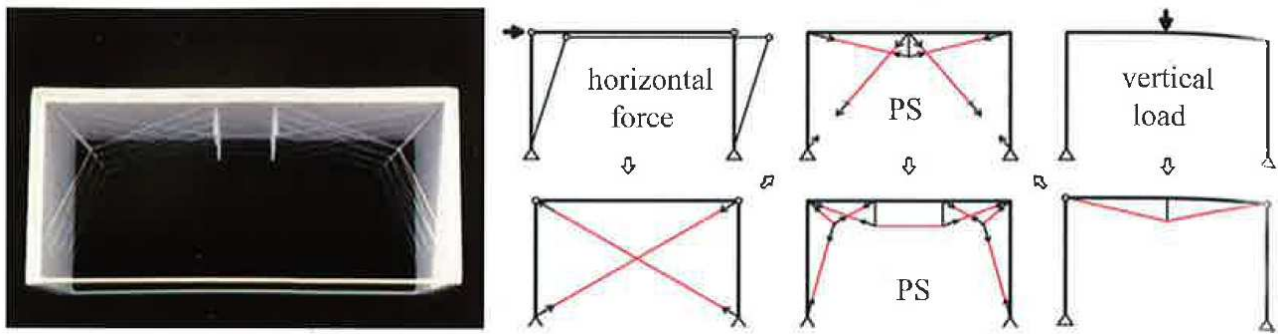
**Figura 4. Nihon university subway station (Referencia [1])**

Referencia: Motenashi dome Kanazawa station:



**Figura 5. Motenashi dome Kanazawa station (Referencia [1])**

El funcionamiento del Skelsion busca la resistencia de las cargas verticales y horizontales únicamente mediante elementos sometidos a tracción o compresión, minimizando los elementos flexionados. Por un lado, el atirantamiento del dintel trata de minimizar los momentos flectores de las cargas gravitatorias gracias al pretensado adecuado de los tirantes. Por otro lado el arriostramiento mediante tirantes pretensados, trata de dotar al pórtico de rigidez lateral en su plano frente a cargas horizontales. Esto permite obtener una estructura muy clara con las funciones bien diferenciadas. En la figura 6 se puede ver un esquema de la evolución de los distintos atirantamientos dirigidos a soportar cargas verticales u horizontales hacia el esquema híbrido del pórtico skelsion

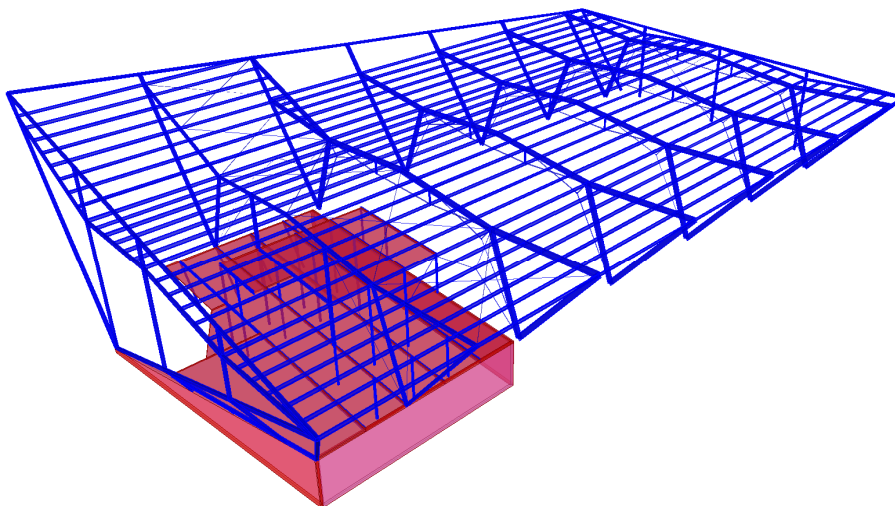


**Figura 6. Skelsion como combinación de viga atirantada y rigidización de pórtico (Referencia [1])**

Las fuerzas de pretensado de los distintos tirantes interactúan entre ellas, lo que convierte el modelo de fuerzas en un modelo combinado, donde la variación de las cargas de uno de los elementos afecta a las demás.

### 5. Cálculo y Aplicación a la nave industrial

La aplicación del modelo skelsion al pórtico tipo se realizó mediante un modelo tridimensional y no lineal conjunto de todo edificio, como se puede observar en la Figura 7. Este modelo de cálculo se utilizó para dimensionar todas las estructuras del proyecto, por lo que es sumamente detallado.



**Figura 7. Vista del modelo de cálculo tridimensional**

La singularidad de la geometría de la nave y de la posibilidad de la apertura total de las fachadas, obligó a un análisis simultáneo del edificio como edificio cerrado y como marquesina a la vez, ocasionando grandes esfuerzos de succión en la cubierta debidos a la posibilidad de tener una fachada abierta mientras la otra estaba cerrada. Estos esfuerzos de succión, que ocasionan inversión de las cargas gravitatorias, son perjudiciales dado que pueden llegar a anular la contribución en términos de rigidez y resistencia de los tirantes. De esta manera los tirantes se pretensaron para minimizar este efecto, a la vez que el modelo incluía la posibilidad de pandear estos elementos anulándolos en las peores combinaciones.

La utilización del pretensado en los tirantes del pórtico requirió de un cálculo iterativo para obtener cuales eran los valores de pretensado idóneos, distinguiendo dos sistemas de atirantamiento: los laterales, cuya principal finalidad es resistir los esfuerzos horizontales, y el superior, dirigido principalmente a las cargas gravitatorias de la cubierta.

Los elementos de atirantamiento laterales, por su disposición simétrica están sometidos a esfuerzos de signo contrario frente a acciones laterales, por lo que cuentan con un pretensado destinado a evitar la compresión de los mismos excepto para los casos más críticos. La entrada en compresión de un elemento de arriostramiento supone la eliminación del mismo del cálculo, lo que implica la reducción drástica de la rigidez de la estructura, por lo que el pretensado es una cuestión a estudiar en detalle.

Mientras tanto, los elementos de atirantamiento superiores, están sometidos a tracción siempre frente a las cargas gravitatorias, pero pueden verse sometidos a compresión también cuando el viento genera una componente global vertical positiva. Esto también se evita mediante el pretensado.

La interacción de ambos pretensados es complicada ya que el pretensado de los elementos de arriostramiento laterales genera unas fuerzas externas que desplazan verticalmente hacia abajo los anclajes de los tirantes contra la viga, incrementando las tracciones en el sistema de atirantado superior. A su vez, el pretensado del atirantamiento superior tracciona más los elementos laterales, generándose una interacción en bucle que converge a unos valores de pretensado promedio que permiten partir de una deformación nula en la cubierta (minimización de los momentos flectores en los dinteles, por lo tanto eficiencia estructural) y ausencia de compresiones en los elementos de atirantamiento laterales frente a cargas horizontales.

Los elementos de pretensado juegan un papel crítico en la rigidez del pórtico frente a las acciones laterales, independiente de la carga última de rotura de cada elemento. Ello obliga, siendo que la deformación lateral es el elemento crítico de dimensionado, a un sobredimensionado de las barras pretensadas, debido únicamente a la necesidad de rigidez lateral.

Para asegurar que los valores de pretensado eran los deseados en la construcción final, se estableció una construcción por fases, con la introducción del pretensado progresiva, considerando que el pretensado de los elementos colocados posteriormente afecta a los ya colocados. De manera que se estableció un pretensado inicial para los elementos superiores a una tensión inferior a la objetivo, para posteriormente con el pretensado de los elementos laterales, incrementar su valor colateralmente al objetivo. En la figura 8 se puede ver un plano de fases constructivas como ejemplo.

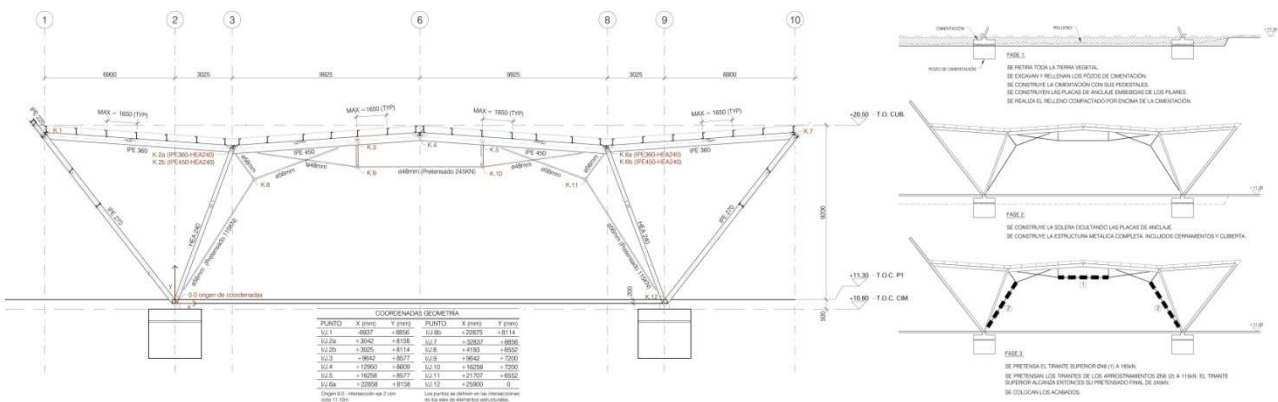


Figura 8. Plano con las fases de montaje

Se estudiaron distintas maneras de introducir el pretensado, utilizando sistemas alternativos a los gatos. La idea consistía en introducir una predeformación a la estructura antes de colocar los tirantes para que al recuperar su forma estos tuvieran el pretensado objetivo. Esa pre deformación

se podría conseguir lastrando el pórtico hasta el punto en el que los tirantes se pueden instalar en su longitud inicial, de manera que al quitar el lastre los tirantes adquieran la tensión deseada preestablecida. Finalmente se descartó el sistema de lastres por resultar algo tedioso, acudiendo a un sistema estándar de gatos de tesado.

Con el objetivo de mantener la precisión necesaria, se desarrollaron todos los planos en 2D a partir del modelo de BIM en 3D, haciendo hincapié en el posicionamiento exacto de los puntos críticos de la estructura mediante un sistema de coordenadas

Al comportamiento del pórtico como tipo skelsion hay que añadir la necesidad de inercia tanto en los nudos como en la distancia entre puntales de separación con respecto al atirantamiento para soportar las cargas verticales, por lo que la viga de cubierta se diseñó con un perfil de tipo IPE, que aunaba la capacidad de resistir flexiones y compresiones.

El resto del edificio se resolvió con estructura de acero más tradicional, pero con la particularidad de que los detalles estaban muy vinculados a la imagen arquitectónica a la que debían servir, ya que la mayoría de los pilares y vigas iban a quedar vistas.

La cimentación se resolvió con zapatas aisladas de hormigón, variando la tipología en función de la zona en que se ubicaban, ya que el estudio geotécnico detectó arcillas expansivas en el terreno. La recomendación para resolver la cimentación sobre este tipo de terreno consistía en salvar la capa activa de arcillas expansivas, definida en 3m. Se vio que económicamente, para la zona de talleres era más viable realizar cimentaciones sobre pozos de hormigón ciclópeo, mientras que en la zona de oficinas, aprovechando que contaba con un sótano, era más viable realizar una sustitución del terreno, realizando un relleno estructural capaz de soportar la cimentación del edificio de oficinas.

## **6. Conclusión**

El resultado es una nave de una gran ligereza, con vigas de gran esbeltez que, gracias al sistema de atirantamiento y arriostramiento, proporcionan al esqueleto principal la rigidez necesaria para soportar todas las fuerzas, tanto horizontales como verticales que solicitan a la estructura. Se consigue lo que Masao Saitoh llamaba Arch-Neering Design, que consiste en aportar la impronta de la ingeniería en la obra arquitectónica consiguiendo de esta manera una obra con valor añadido.

En la Figura 9 se puede observar la calidad de espacio interior obtenido con los detalles estructurales de los tirantes pretensados, que le dan un aspecto tecnológico al espacio interior del edificio.





**Figura 9. Vista detalle del pórtico skelsion**

Se consigue así el objetivo que se perseguía de encontrar un sistema estructural que cumpliera las necesidades estructurales, estéticas y funcionales, pero con un gasto en acero reducido.

Esta estructura ahonda en un sistema estructural muy poco utilizado, si no inexistente en la arquitectura industrial en España. Se demuestra así que la tipología de pórticos tipo skelsion tiene un nicho en edificios de luces medianas, y con requerimientos de aspecto estructural estético elevados, resultando a la vez la opción más económica resultado de un estudio comparativo.

### **Agradecimientos**

Queremos expresar nuestro agradecimiento por el trabajo y colaboración de los arquitectos proyectistas *EOVASTUDIO* que confiaron en *GmasP Ingeniería y Arquitectura* para el diseño estructural del singular edificio objeto de este texto.

Agradecemos también al ingeniero *Enrique Goberna*, su consejo y guía, así como el impulso recibido para ahondar en el estudio de tipologías estructurales inéditas en este campo.

Agradecemos a todo el equipo de *GmasP* por su colaboración, su energía y entusiasmo para realizar este proyecto.

### **Referencias**

- [1] Ihsan Mungan, John Fredrick Abel, International Association for Shell and Spatial Structures (IASS), 2011. Fifty Years of Progress for Shell and Spatial Structures
- [2] Masao Saitoh, Akira Okada, Study on structural Concept and Characteristics of SKELSION
- [3] M, Saitoh. Role of String: aesthetics and technology of tension structures. 1998