

# CÁSCARA DEL PALACIO DE LAS ARTES DE VALENCIA

**Manuel BIEDMA GARCÍA**

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

IBÉRICA DE ESTUDIOS E INGENIERÍA. IBERINSA

Jefe del Departamento de Estructuras Metálicas y Mixtas

mbiedmag@acciona.es

## Resumen

La Cáscara del Palacio de las Artes de Valencia envuelve la estructura del edificio que contiene por medio de dos grandes hojas orientadas al norte y al sur, con una longitud máxima de 172 m y una altura máxima de 58 m. En el centro de estas hojas se diseña un gran hueco romboidal cuyas diagonales horizontal y vertical miden 84 m y 52 m respectivamente, que deja ver la realidad del edificio que alberga en su interior. La singularidad de la estructura hizo necesario la realización de un modelo de túnel de viento que fue llevado a cabo por The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory de la Universidad Occidental de Ontario (UWO). En Iberinsa se realizó la tanto la definición estructural de la Cáscara, como el seguimiento del montaje de la estructura durante la ejecución de la misma.

**Palabras Clave:** edificio singular, montaje de estructura singular, ensayos de túnel de viento.

## 1. Introducción

La Ciudad de las Ciencias de Valencia alberga varios edificios singulares. De entre ellos destacan tres que están ubicados uno junto al otro de Este a Oeste: el Museo de las Ciencias de Valencia, L'Hemisphèric, y el Palacio de las Artes.

El Palacio de las Artes de Valencia es un espectacular edificio envuelto en una gran cáscara que abraza la estructura del mismo que queda en su interior, conformando en gran medida la personalidad del edificio, asignándole la expresividad de una gran escultura que habla su propio lenguaje desde distintos puntos de vista, desde perspectivas diferentes, con una sola voz.



*Fig. 1 Planta General de la Ciudad de las Ciencias*

## 2. Descripción estructural de la Cáscara

La Cáscara del Palacio de las Artes de Valencia es una cubierta singular, tanto por su diseño como por su definición geométrica. Está constituida por dos grandes hojas orientadas al norte y al sur, con una longitud máxima de 172 m y una altura máxima de 58 m. En el centro de estas hojas se diseña un gran hueco romboidal cuyas diagonales horizontal y vertical miden 84 m y 52 m respectivamente.



*Fig. 2 Vista general del Palacio de las Artes*

Dadas las condiciones de simetría de la Cáscara, queda completamente definida describiendo un cuarto de la estructura. Los elementos que definen esta singular estructura son los siguientes: el sándwich, las vigas de borde, los arbotantes, el balancín, la rótula, el trípode y la escalera.

El sándwich es el conjunto formado por dos chapas de 8 mm de espesor separadas 400 mm, que albergan en su interior un entramado de nervios (tubos de 400 x 200 x 10 y chapas de 400 x 10 mm) verticales y horizontales con separaciones variables.



*Fig. 3 Vista de conjunto de sándwich y de las vigas de borde superior e inferior antes de ser izada*

El sándwich, excepto en su parte inferior donde se encuentra el balancín y la escalera, está compuesto en su perímetro por unas vigas (tanto en el contorno exterior como en el interior que define el hueco central) denominadas vigas de borde, formadas por chapas de 15 y de 25 mm de espesor, que dan rigidez a los bordes que contornean la estructura definida por el sándwich. Estas vigas de borde se definen por secciones trapezoidales rigidizadas en su interior.

En las alineaciones 15, 17, 19, 21 y 23, como apoyo del sándwich, se han diseñado cinco arbotantes constituidos por secciones metálicas en cajón de ancho constante de 500 mm y longitud y altura variables de acuerdo con la definición de la Cáscara. Estos arbotantes rigidizan el sándwich en toda su altura, y transmiten las cargas al pórtico principal de hormigón por medio de un pilar.



*Fig. 4 Perspectiva de los arbotantes*

La Cáscara, en su parte más baja, apoya sobre el balancín, que es un elemento de hormigón con un tirante de pretensado en su parte superior, a la cota +0,34, que lleva 7 cables tesados a 215 t. El Balancín apoya en su parte inferior sobre una rótula esférica. Con el fin de evitar fisuraciones en la obra de hormigón, se realizó el tesado de la parte superior del Balancín, disponiendo una junta entre el conjunto Balancín-Cáscara y la estructura de hormigón de la Caja escénica, que posteriormente al tesado del Balancín y de la puesta en carga de la Cáscara, fue hormigonada.

La unión entre el Balancín y la Cáscara se realiza mediante la Pieza de Transición, conformada por una estructura mixta acero-hormigón, que une ambos materiales de manera que se asegura la transmisión de rasante entre uno y otro. Para tal fin se disponen conectores en las caras interiores de la Pieza de Transición en contacto con el hormigón.

En la zona de mayor cota del sándwich, denominada Pieza de Clave, se unen los distintos cuartos de la estructura. La Pieza de Clave apoya en el Trípede, elemento constituido por tres patas (dos de ellas en un plano horizontal formando una V), que se empotra en el muro de hormigón de 0,6 m de espesor de la caja escénica.

Por otro lado, colgando de la parte inferior de la Cáscara, entre las cotas +0,34 y + 11,340, se define una escalera. Esta escalera, de 4,50 m de ancho, se resuelve por medio de ménsulas que quedan empotradas en la estructura inferior de la Cáscara.

En los extremos de la Cáscara se encuentran las Puntas, una al este y otra al oeste, que unen entre sí la Cáscara del lado norte con la del lado sur, con el fin de asegurar la transmisión de esfuerzos de viento entre ambos lados. En el extremo Oeste, la unión se realiza por medio de una viga en cajón de chapas de 30 mm de espesor. En el extremo Este, la unión se realiza por medio del aljibe diseñado para recoger el agua que discurre por la Pluma definida como el elemento del conjunto que conforma el Palacio de las Artes, conduciendo la misma desde el aljibe a la parte inferior de la Cáscara por medio de una tubería de desagüe ubicada para tal fin en el interior de la viga de borde inferior y de empotramiento de la escalera.

### 3. Cálculo de la Cáscara

Para el cálculo de la estructura se ha modelizado 1/4 de Cáscara con el programa de elementos finitos ANSYS. En el cálculo se ha analizado el comportamiento de la estructura en cada una de las fases de montaje y en el estado final de servicio, conociendo así las reacciones, los esfuerzos, las tensiones y deformaciones de cada elemento en cada una de las etapas que conforman el proceso constructivo de la estructura hasta su completa terminación.

El modelo incluye 1003 nudos y 2625 elementos, que representan el sándwich, las costillas verticales y horizontales, la escalera, las vigas de borde, los arbotantes y el balancín.

Las condiciones de contorno representan tanto las condiciones de simetría del modelo como los apoyos de la Cáscara, de forma que se ha tenido en cuenta que los apoyos de los arbotantes, al estar situados éstos sobre los voladizos del Pórtico Principal de la estructura del Edificio, son unos muelles, en cada uno de los cuales se obtuvo la rigidez elástica, que se tuvo en cuenta en el cálculo.

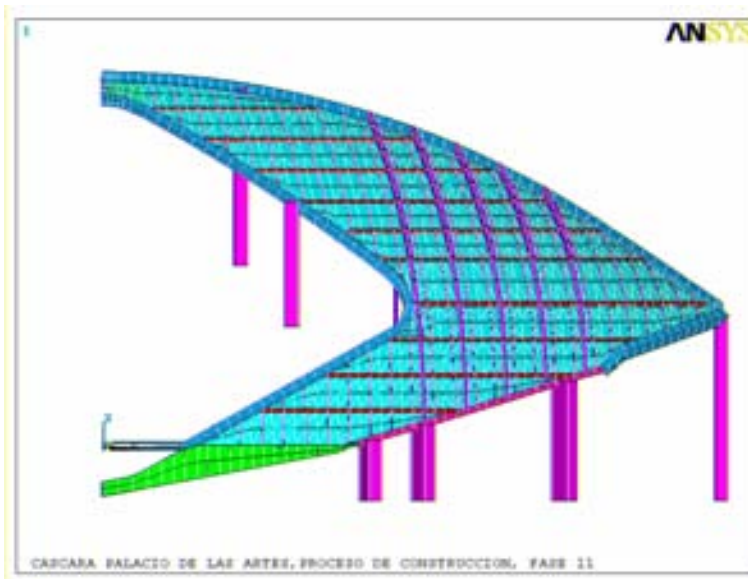


Fig.5 Perspectiva del modelo de cálculo

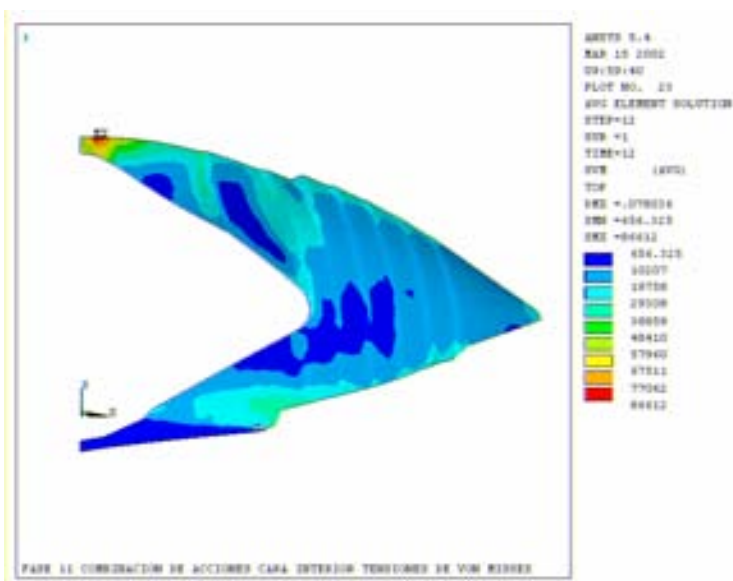


Fig. 6 Tensiones de Von Mises sobre la cara interior del sándwich en una de las fases del proceso constructivo

Durante el montaje de la estructura fueron necesarios unos castilletes provisionales para apoyo de las diferentes piezas que conforman el conjunto de la Cáscara. Estos castilletes, con sus características mecánicas reales, fueron también modelizados en las fases que definen el montaje de la estructura.

Las cargas introducidas en el modelo fueron las correspondientes a peso propio, carga muerta, sobrecargas, acciones de viento (teniendo en cuenta los resultados del ensayo de túnel de viento), y las acciones térmicas.

Además, como la Cáscara fue montada sobre unos castilletes provisionales, fue preciso analizar el proceso de puesta en carga de la misma.

Con el fin de pasar gradualmente las cargas desde estos castilletes a los apoyos definitivos (arbotantes, rótula del balancín y trípode), se calculó el descenso simultáneo de la Cáscara apoyada sobre un gato hidráulico por cada castillete, en tres escalones de carga, obteniendo un descenso total máximo de 27 mm.

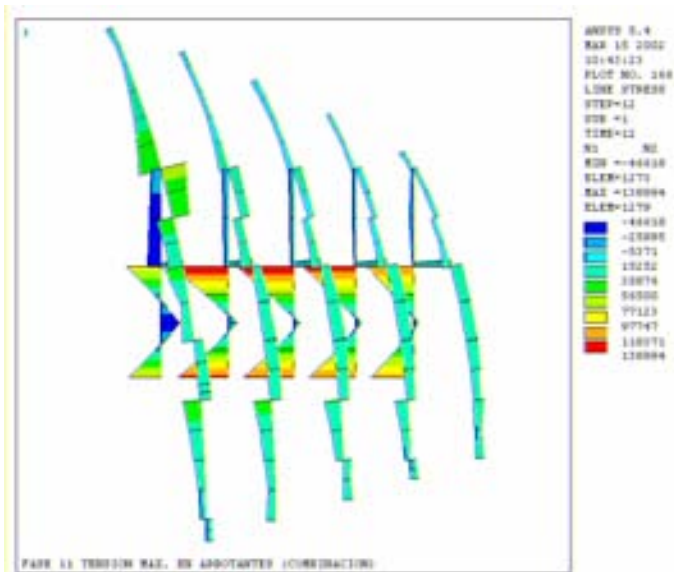


Fig. 7 Tensiones máximas en los arbotantes

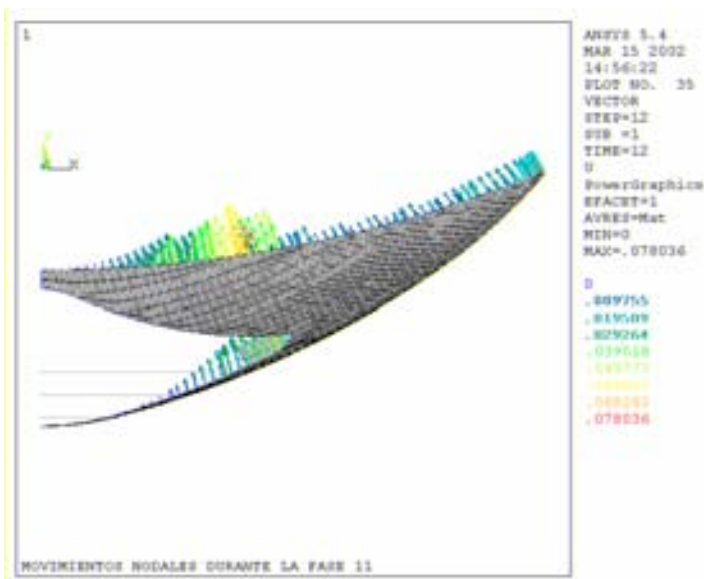


Fig. 8 Deformaciones en una de las fases del proceso constructivo

#### 4. Ensayos de túnel de viento

El modelo de túnel de viento fue llevado a cabo por The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory de la Universidad Occidental de Ontario (UWO).

Se realizó un modelo a escala 1/200 que reproducía la geometría de la estructura, con la equivalencia de propiedades elásticas y de masas respecto de la estructural real, de manera que el modelo aeroelástico equivalente simulaba las propiedades mecánicas de la estructura en su principales modos de vibración. El edificio interior, no instrumentado en el estudio, también fue modelado.

La distribución de gradientes de las velocidades de viento fue desarrollado a partir de los datos meteorológicos del área de Valencia.

Las cargas y respuestas inducidas por el viento medidas en el túnel fueron combinadas con la distribución probable de diseño para pronosticar los valores extremos para varios periodos de retorno.

Las medidas tomadas en intervalos de 10° hasta completar el rango de giro de 360°, fueron tomadas en 504 puntos. En principio se probaron ocho velocidades de viento en un rango que va desde el 80 % al 180 % de la velocidad de viento en 50 años, y cerca de las velocidades de viento de máxima respuesta se ensayaron 29 incrementos de velocidades, en un rango del 10 % al 140 % de los datos de 50 años.

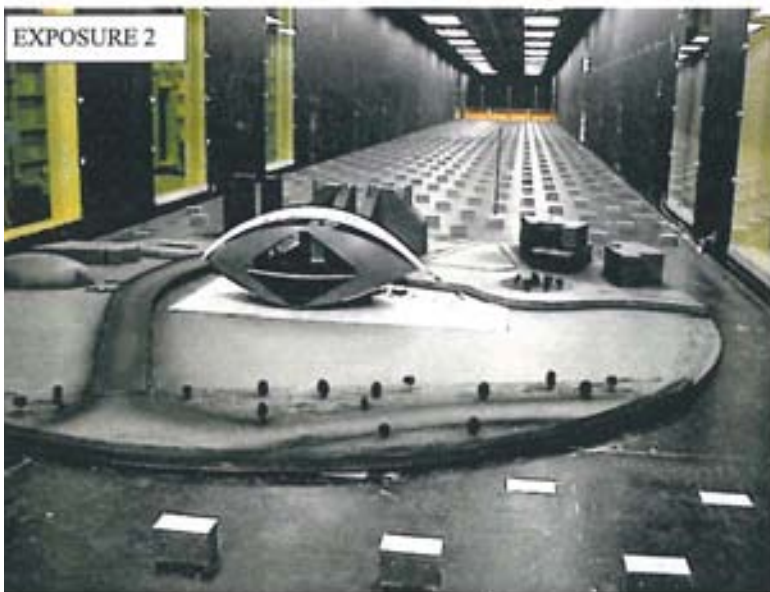
La velocidad de viento para un periodo de retorno de 50 años obtenido en el modelo de BLWTL es de 40,4 m/s, que es muy similar a la obtenida en los cálculos realizados anteriormente a los ensayos del túnel de viento, en los que se tomó una velocidad de viento de 40 m/s. El estudio de viento en este aspecto no ofreció cambios sustanciales sobre lo previsto. Sin embargo, sí se vio que variaba la direccionalidad del viento, con vientos predominantes del oeste, donde se obtuvieron las mayores velocidades.

Se comprobó que la distribución de presiones estaba fuertemente condicionada por el ángulo de incidencia del viento.

Los máximos valores puntales de presión y de succión observados se encuentran en el cuadrante sudeste, siendo los valores de 220 kg/m<sup>2</sup> de succión y de 150 kg/m<sup>2</sup> de presión. Estos valores se obtienen en puntos de medida ubicados en la viga de borde interior.

Los máximos valores de presiones obtenidos, no influenciados por efectos de borde, se encuentran en el cuadrante sobre los que inciden los vientos dominantes del oeste.

El cálculo de viento sobre la Cáscara se ha realizado teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos de túnel de viento.



*Fig. 9 Modelo realizado para el ensayo de túnel de viento*

## 5. Ejecución y Montaje

La estructura ha sido calculada no sólo en su fase final, sino como una estructura evolutiva construida por fases, en función de los elementos que se van montando sucesivamente hasta llegar a tener la estructura completa.

La estructura del lado norte y la del lado sur se construyeron y pusieron en carga independientemente, la una de la otra. Para cada uno de estos lados, el montaje de los elementos se hizo de forma simétrica.



*Fig. 10 Montaje de la Pieza de Clave en taller*

Antes del montaje de la estructura metálica sobre los castilletes fue ejecutado el balancín y tesados los siete cables de pretensado del tirante del mismo. Una vez tesados los tendones hasta alcanzar el 70% de la carga de rotura fueron inyectadas las vainas.

Las diferentes fases de montaje de la estructura sobre castilletes en cada lado (norte y sur), han sido las siguientes:

- Fase 1.- Montaje del trípode.
- Fase 2.- Montaje de la escalera, apoyando sobre los castilletes.



*Fig. 11 Perspectiva del montaje de la pieza de clave en obra*

- Fase 3.- Montaje de la pieza de clave, apoyada sobre el trípode.
- Fase 4.- Montaje del sándwich que se une a la pieza de clave, apoyándose sobre ésta y en dos castilletes en su extremos opuestos.
- Fase 5.- Colocación del sándwich que se une en la parte inferior de la Cáscara al Balancín por medio de la pieza de transición.
- Fase 6.- Colocación del sándwich continuación del colocado en la Fase 4, apoyado sobre los castilletes montados en la Fase 4 y en otros dos nuevos castilletes provisionales montados en los extremos de la pieza.
- Fase 7.- Colocación del primero de los arbotantes (eje 5). Una vez unidas las piezas ya colocadas al arbotante, se eliminan los castilletes colocados durante la fase anterior.
- Fase 8.- Colocación del arbotante nº 2 (eje 17).
- Fase 9.- Colocación del arbotante nº 3 (eje 19).
- Fase 10.- Colocación del arbotante nº 4 (eje 21).
- Fase 11.- Colocación del arbotante nº 5 (eje 23).



*Fig. 12 Vista general del montaje de la Cáscara*

- Fase 12.- Colocación de la pieza del extremo, denominada Punta
- Fase 13.- Construida la mitad Sur de la Cáscara, se procedió al descenso de los apoyos provisionales sobre los castilletes. Este descenso se realizó en tres fases.

Sobre cada uno de los apoyos provisionales se colocaron gatos de 5000 KN, como elementos que recogen las cargas de la Cáscara sobre los castilletes.

Posteriormente se descendieron simultáneamente todos los gatos correspondientes a la mitad sur a la vez, en tres escalones de descenso y, por tanto, de puesta en carga.

Durante la ejecución del descenso de apoyos se auscultó la Cáscara tomando medidas de los parámetros más significativos (temperaturas, presiones, desplazamientos y tensiones) por medio de instrumentos (transductores de presión, bandas extensométricas lineales, sondas de temperatura y aparatos de medida topográficos) que permitieron realizar un análisis del comportamiento real de la estructura y su comparación con el comportamiento teórico de proyecto.

En todos los casos, el comportamiento estructural de la Cáscara fue el previsto en los cálculos de proyecto.



Se pudo comprobar, como estaba previsto en el proyecto, que durante el proceso de montaje, antes de poner en carga la Cáscara, los castilletes provisionales recogen el 40 % de la carga vertical de peso propio, los arbotantes el 51%, el trípode el 6 % y el balancín el 3 %. En la última fase, al poner en carga la Cáscara, el 40 % de la carga que era recogida por los castilletes provisionales se reparte entre los otros elementos de apoyo, de manera que un 22% va hacia los arbotantes, un 7 % al trípode, y un 11% al balancín, siendo el reparto final de reacciones como sigue:

Arbotantes:	73%
Trípode:	13%
Balancín:	14%

Posteriormente a la puesta en carga de la mitad sur, se puso en carga la mitad norte, siguiendo el mismo proceso ya descrito.



*Fig. 13 Perspectiva del montaje de la Cáscara*



*Fig. 14 Detalle del montaje de la Cáscara sobre los castilletes*

## 6. Asistencia a la obra durante la ejecución

IBERINSA ha actuado, aparte de como proyectista de la Cáscara del Palacio de las Artes de Valencia, como Asistencia técnica al Contratista (UTE Acciona – Dragados). La mayor parte de la Asistencia técnica ha consistido en la definición de todas las fases del proceso constructivo de la Cáscara, y de todos los elementos estructurales auxiliares necesarios para el montaje de la estructura. Dada la singularidad del edificio, fue imprescindible un diálogo continuo con la obra, con el fin de que la definición del proceso constructivo fuera compatible con los diferentes tajos a ejecutar durante la construcción del edificio del Palacio de las Artes.



*Fig. 15 Vista del montaje de conjuntos de la Cáscara sobre los castilletes*



*Fig. 16 Vista general de la Cáscara durante su construcción*