

EDIFICIO ÁGORA. CIUDAD DE LAS ARTES Y LAS CIENCIAS. VALENCIA

Raúl RODRÍGUEZ FAJARDO

Ingeniero de Caminos

SANTIAGO CALATRAVA L.L.C.

Dpto. Ingeniería Estructural

pro.valencia@calatrava.com

Mario RANDO CAMPOS

Ingeniero Industrial

SANTIAGO CALATRAVA L.L.C.

Jefe Dpto. Ingeniería Estructural

pro.valencia@calatrava.com

Enrique GOBERNA PÉREZ

Ingeniero de Caminos

SANTIAGO CALATRAVA L.L.C.

Dpto. Ingeniería Estructural

pro.valencia@calatrava.com

Resumen

Ubicado en la Ciudad de las Artes y las Ciencias de Valencia, entre el Puente de Serrería y el Oceanográfico, el edificio Ágora constituye una gran plaza cubierta, diseñada por el arquitecto e ingeniero Santiago Calatrava. Se trata de un espacio diáfano multifuncional, de planta elíptica apuntada y dimensiones 100x65 m.

El elemento más característico del edificio es su cubierta móvil o “brise-soleil”, formado por 163 lamas metálicas, de 31 m de longitud en el caso de las lamas centrales, hasta los 15m de las lamas extremas. Esta cubierta móvil apoya sobre una estructura aporticada de acero, que soporta el cerramiento del edificio. La parte superior del mismo queda cubierta por un cerramiento de vidrio, estando la entrada de luz al interior regulada por la posición de apertura o cierre del “brise-soleil”. La altura del edificio es de 68 m, aunque las lamas centrales en posición abierta alcanzan una cota de 85 m.

Actualmente, los trabajos de cimentación y estructuras de hormigón de sótano ya están concluidos, la fabricación de la estructura de acero en taller se encuentra en un estado avanzado, y su montaje ha comenzado.

Palabras Clave: Santiago Calatrava, Agora, cubierta móvil, acero, arco, portico

1. Introducción y descripción arquitectónica

El edificio Ágora es una cubierta metálica que cubre un gran espacio interior diáfano, con una superficie de 4247 m², a nivel de los estanques y paseos adyacentes. En su zona sur existe un nivel de sótano para servicios, zona VIP y salas técnicas.

Se trata de una plaza cubierta multifuncional de grandes dimensiones, concebida para albergar congresos, exposiciones, eventos deportivos, etc.



Fig. 1 Infografía. Lamas en posición abierta

El revestimiento de la cubierta se realiza mediante paneles de vidrio laminado con tratamiento de protección solar en la parte superior, y en la zona inferior mediante cerramiento opaco formado por trencadís exterior recibido con mortero sobre chapa de acero, aislamiento térmico y revestimiento interior de paneles sandwich de acero perforado para mejorar las propiedades acústicas del recinto. En la parte superior de la cubierta se dispone una cubierta móvil de lamas, que a modo de alas se abren y cierran, lo que permite regular la protección solar como un “brise-soleil”.

PROYECTO: ÁGORA	
PROPIEDAD:	CAC / GENERALITAT VALENCIANA
PROYECTO Y DIRECCIÓN DE OBRA:	SANTIAGO CALATRAVA
CONTRATISTA:	UTE-ÁGORA (LUBASA / CYES / ROVER ALCISA)
CUANTÍA DE ACERO EN ESTRUCTURA FIJA:	5842 TON
CUANTÍA DE ACERO EN ESTRUCTURA MÓVIL:	1388 TON
HORMIGÓN EN CIMENTACIÓN Y SÓTANOS:	3400 M ³
PILOTES PREFABRICADOS (0.4x0.4 M):	5200 M

Fig. 2 Ficha técnica del proyecto del Ágora

2. Descripción estructural de la cubierta fija

2.1 Descripción de la geometría de la cubierta fija

La estructura fija del edificio (Fig 3 y 4) tiene, por una parte, una función de soporte del cerramiento del edificio y, por otra parte, sirve como apoyo de la cubierta móvil. Está formada por 49 pórticos triarticulados (apoyados en 2 rótulas en cimentación y una tercera rótula en la cúspide) con una separación de 2 m entre ellos, arriostrados longitudinalmente por 3 arcos a cada lado, lo que confiere una gran rigidez al conjunto. El pórtico mayor se sitúa en el eje central, salva una luz de 65 m y tiene una altura de 68 m, mientras que los pórticos extremos de luz 10 m alcanzan una altura de 14 m. La sección transversal de los mismos es en cajón, de 324 mm de ancho y canto variable, rematados por semitubos en todos sus bordes vistos interiores al edificio. Pese a que cada semipórtico es rígido, su geometría está claramente definida por 3 triángulos, lo que optimiza el comportamiento estructural del mismo gracias a la adecuada canalización de los esfuerzos axiales. Dentro de esta triangulación se debe destacar la pieza metálica de gran esbeltez (longitud de 42 m en el eje central) y sección transversal circular de diámetro variable (entre 750 y 324 mm), que se denomina tornapunta, y que, quedando exterior al cerramiento del edificio, marca en gran medida la estética exterior del Ágora.

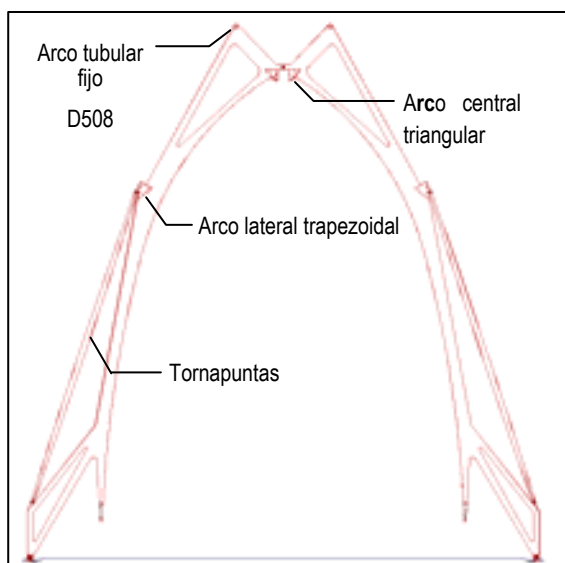


Fig. 3 Alzado del pórtico central



Fig. 4 Vista en perspectiva del modelo CAD de la estructura con la cubierta móvil cerrada



Fig. 5 Estado de la obra en Junio 2008

Los arcos que arriostran los pórticos se desarrollan de manera continua entre los extremos Norte y Sur del edificio, con una distancia de unos 100 m entre ambos extremos de apoyo. Se trata de grandes cajones de forma triangular y trapezoidal en el caso de 4 de ellos (de dimensiones aproximadas 1.5x1.5 m y 2.2x1.75 m respectivamente), y un tubo de diámetro 508 mm en el caso de los otros 2 arcos. Los 3 arcos de cada lado se unen en la base mediante una singular intersección (arranque de arcos), que apoya sobre una rótula esférica (Fig 6 y 7).

Los arcos cajón alojan en su interior buena parte de las luminarias del edificio, con objeto de alcanzar una solución de iluminación integrada en la estructura, lo que ha requerido de un esfuerzo extra de coordinación entre las partes implicadas en el diseño y fabricación del acero y las implicadas en las instalaciones.

En cuanto al arco tubular mencionado, además de desempeñar una función de atado de los pórticos, sirve de apoyo de las rótulas de giro de cada una de las lamas de la cubierta móvil.

Otros elementos de atado secundarios son una serie de perfiles IPE300, que atan los pórticos entre sí en la zona de cerramiento opaco, quedando por tanto como elementos no visibles.

En definitiva, la estructura fija del edificio se caracteriza por una importante rigidez estructural y gran complejidad geométrica. El montante total de acero requerido para la formación de la estructura metálica fija ha sido de 5842 ton.



Fig. 6 Montaje de uno de los 4 arranques de arcos

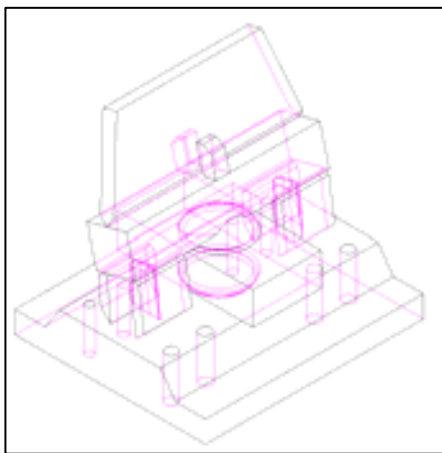


Fig. 7 Apoyo sobre rótula esférica del arranque de arcos. Dibujo y pieza montada.

2.2 Descripción del cálculo estructural de la cubierta fija

El análisis estructural del edificio se realizó en base a un modelo general de elementos finitos unidimensionales, construido con el software SAP 2000 (versiones 8 y 11), para las posiciones abierta y cerrada de la cubierta, así como para otras posiciones intermedias de la misma (Fig 8). Con ello, se pretendía evaluar, tanto el comportamiento estructural de la propia cubierta móvil en cada una de sus posiciones, como la variación de la reacción transmitida por esta cubierta sobre la estructura fija, en función de la posición.

En el caso de los elementos más singulares fue necesario su estudio de detalle, más allá de los resultados obtenidos con los modelos generales de cálculo. Entre ellos destaca el estudio mediante modelo local de elementos finitos "área" (bidimensionales) del arranque de los 3 arcos de cada lado (cajones triangular y trapezoidal, y arco tubular). Ver Fig 9.

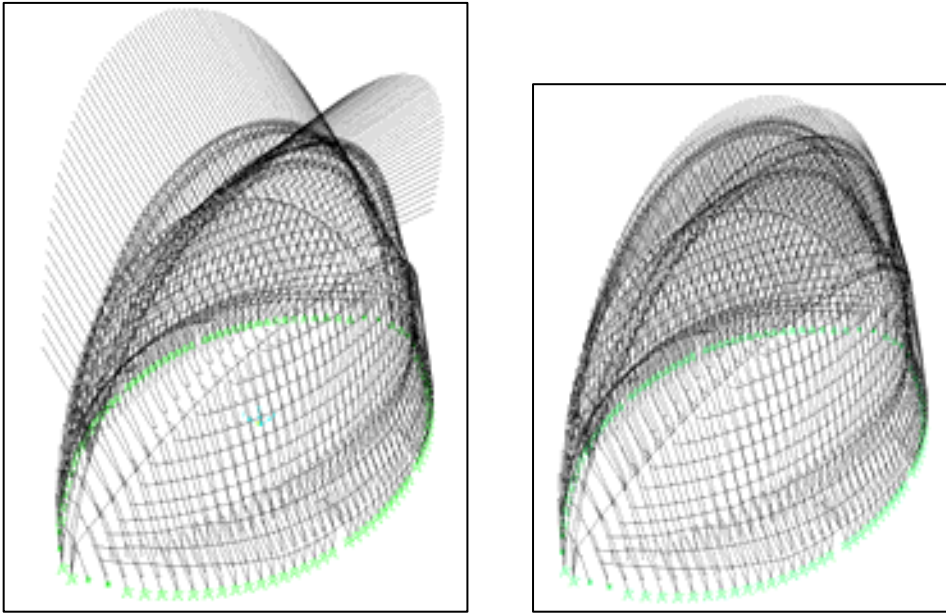


Fig. 8 Modelos generales de cálculo con la cubierta en las posiciones abierta y cerrada

Debido a los fuertes condicionantes geométricos del cerramiento, así como estéticos por quedar esta intersección claramente visible desde el interior del edificio, el resultado final fue una pieza de gran complejidad desde el punto de vista tanto de diseño como de fabricación. Interiamente la pieza se resuelve con una importante rigidización que permite canalizar los esfuerzos de los 3 arcos hacia el apoyo puntual sobre rótula esférica, que evita la transmisión de momentos a cimentación. La rótula funciona por contacto entre 2 superficies de acero de radio de curvatura ligeramente diferente para garantizar el contacto puntual, basando su comportamiento en la teoría de Hertz (Fig 7).

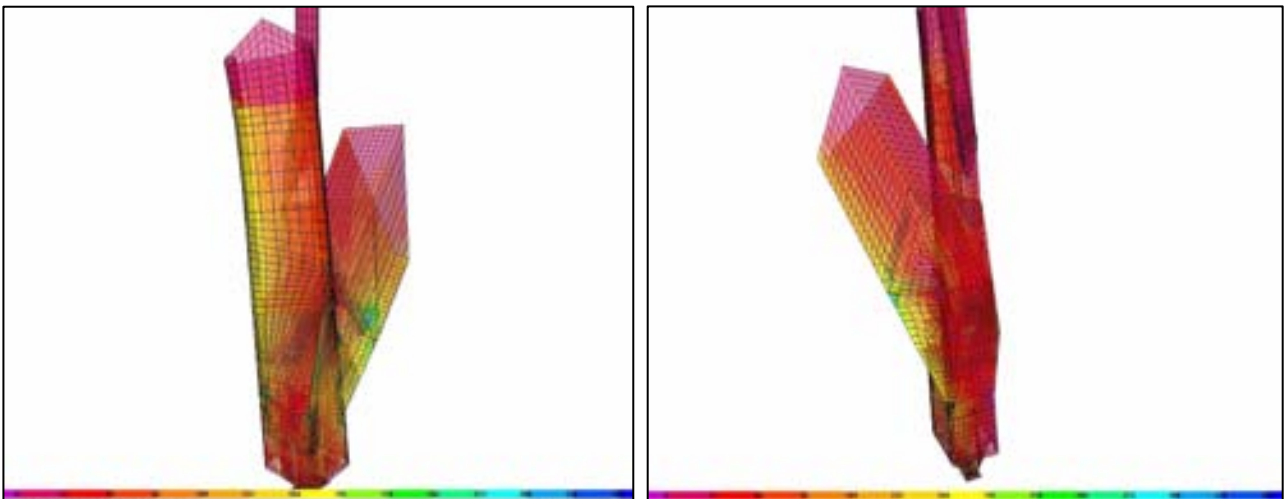


Fig. 9 Modelo de cálculo del arranque de los arcos. Resultados de la tensión de comparación. Vistas interior y exterior

También destaca el estudio de estabilidad realizado para los tornapuntas. Estos elementos se encuentran articulados en sus extremos y sus esfuerzo principal es el axil de compresión originado por la carga permanente del edificio y el viento este-oeste. Dado su diámetro variable y su esbeltez considerable, su estudio se realizó en base al eurocódigo 3 (ENV 1993-1-1:2005), analizando el elemento en 2º orden, con la imperfección inicial que especifica este código en función de las características de la pieza estructural.

Por último, el efecto de la acción del viento sobre el cerramiento de la estructura fija se estudió de manera pormenorizada mediante ensayo en túnel de viento en el laboratorio *The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory, Ontario, Canada (Alan G. Davenport Wind Engineering Group)*. Para ello, se construyó un modelo rígido, monitorizado

con tomas de presión sobre la piel exterior, y apoyado sobre balanza, lo cual permitió la medida directa de presiones en las tomas, así como la evaluación de la resultante global a través de la reacción en la balanza. En base a las conclusiones del estudio, se pudieron ajustar los valores de la acción de viento de diseño.

3. Descripción estructural de la cubierta móvil

3.1 Descripción de la geometría de la cubierta móvil

Cada una de las dos mitades de la cubierta móvil está formada por una estructura independiente, que apoya sobre la estructura fija anteriormente descrita. Esta cubierta está compuesta por 163 elementos lineales de acero denominados lamas (82 a un lado y 81 al otro), que en posición abierta apoyan en dos rótulas: una sobre la estructura fija y la otra sobre un arco tubular de diámetro 508 mm. Este último elemento se denomina arco móvil, y constituye uno de los elementos más singulares del edificio, ya que gobierna el movimiento del conjunto de lamas, siendo un elemento estructural crítico por su esbeltez (la distancia entre apoyos es 82 m), que ha requerido un estudio analítico de su estabilidad muy profundo (Fig 10 y 11).

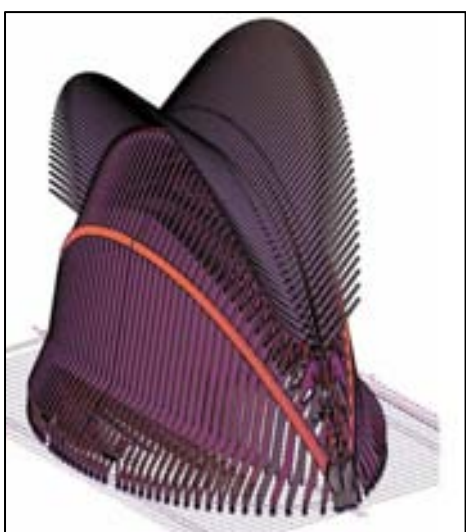


Fig. 10 Vista en perspectiva del modelo CAD de la estructura con la cubierta móvil abierta

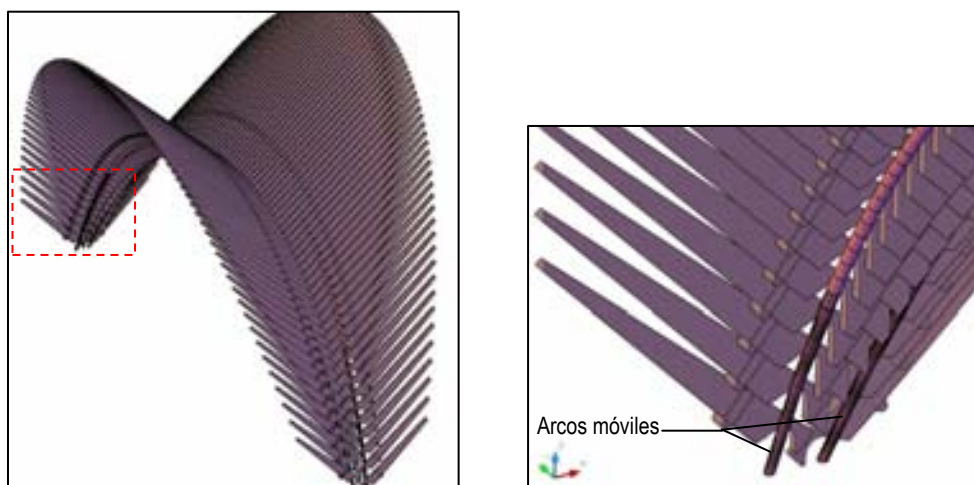


Fig. 11 Vista en perspectiva del modelo CAD de la estructura móvil abierta. Detalle de apoyo de lamas sobre arco móvil

La configuración estructural de la cubierta móvil viene condicionada por su geometría del movimiento, puesto que el movimiento de traslación de los 2 arcos móviles, generado por sendos pistones hidráulicos situados en sus extremos de

apoyo, origina un movimiento de rotación compatible en todas las lamas (Fig 12 y 13). Cada apoyo de arco móvil se resuelve con 2 cilindros hidráulicos, cuyo movimiento se restringe a una traslación circular gracias a un elemento metálico móvil, denominado guía.

Con objeto de reducir al mínimo la carga sobre el arco móvil, cada una de las lamas se contrapesa mediante un volumen de hormigón determinado alojado en su parte trasera. La sección transversal de las lamas es trapezoidal de ancho inferior constante de 600 mm y ancho superior 200 mm, siendo el canto variable entre 2500 mm en la parte trasera hasta 300 mm en la punta. Cuando la cubierta se cierra, las lamas también apoyan en su extremo, sobre un apoyo combinado de compresión y antilevantamiento, para evitar vibraciones y ruidos en esta posición cerrada de la cubierta.

La cubierta móvil está formada por un total de acero de 1388 ton.

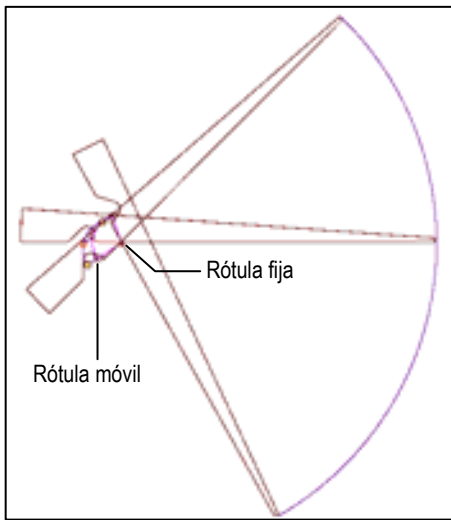


Fig. 12 Descripción del movimiento de las lamas

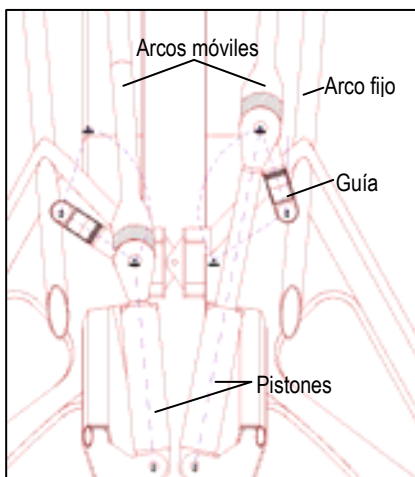


Fig. 13 Esquema del movimiento de los mecanismos. Apoyo del arco móvil sobre pistones y guía

3.2 Descripción del cálculo estructural de la cubierta móvil

Se ha realizado un ajuste del contrapeso de las lamas, de manera que el centro de gravedad de las mismas en posición horizontal se sitúe en la vertical del apoyo sobre la rótula fija, y así minimizar la carga introducida en el arco móvil. Sin embargo, debido al giro de las lamas, fuera de su posición horizontal, el centro de gravedad quedará ligeramente desplazado respecto a la rótula fija, con lo que será inevitable solicitar el arco móvil bajo peso propio. Por otra parte, la

acción del viento también originará esfuerzos en el arco móvil, aunque limitados, pues la apertura de la cubierta sólo se permitirá bajo la acción de vientos moderados.

El arco móvil es un elemento solicitado esencialmente a axil de compresión, en la posición abierta de las lamas, y de tracción, para las posiciones próximas al cierre de la cubierta. Así, en posición abierta el centro de gravedad de las lamas queda desplazado ligeramente hacia su parte trasera respecto a la rótula fija, por lo que se introducen cargas hacia abajo sobre el arco móvil. En la posición casi cerrada, ocurre al revés, y las cargas sobre el arco móvil resultan hacia arriba (Fig 12).

Teniendo en cuenta la gran esbeltez del arco móvil (diámetro 508 mm frente a una distancia entre apoyos de 82 m), su capacidad para absorber axiles se explica gracias a la perfecta "simbiosis" entre lamas y arco. Efectivamente, las lamas en posición abierta se apoyan sobre el arco, mientras que el arco es estable gracias al arriostramiento que le proporcionan las lamas, así como a la coacción a momento que también le proporcionan en 2 direcciones (las que no corresponden a la dirección del obligado eje de giro). Para que esto sea posible, ha sido necesario dotar al tramo de lama entre las rótulas fija y móvil de una rigidez importante, estando el resto de la lama formada por chapas de espesor mínimo (5 mm) para reducir la reacción transmitida.

A modo de ejemplo, la Fig 14 muestra uno de los resultados del análisis de estabilidad de la cubierta móvil.

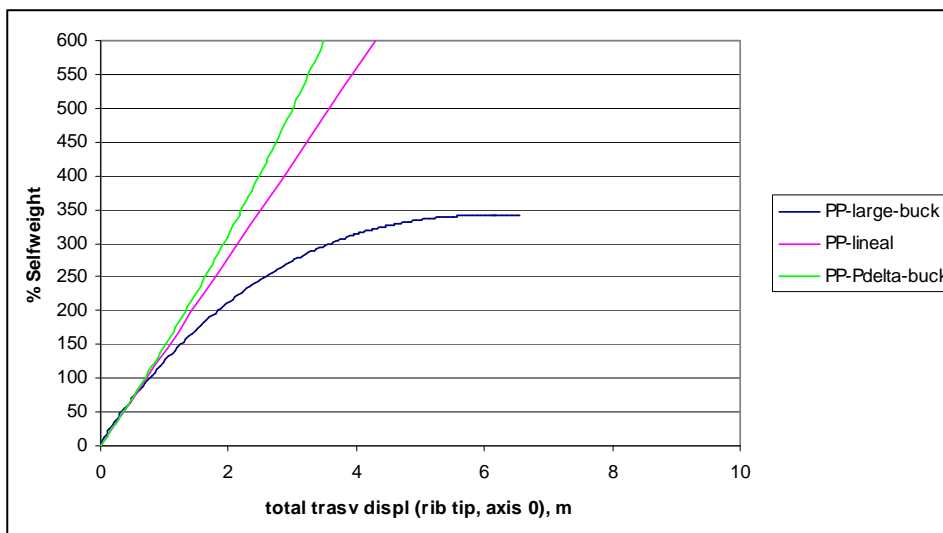


Fig. 14 Análisis de la estabilidad de la cubierta móvil bajo peso propio en la posición casi cerrada

Otro análisis de la cubierta móvil que merece destacarse ha sido el estudio de los esfuerzos introducidos en el sistema durante el cierre de la misma. Determinados factores, como la acción del viento o las variaciones de temperatura del arco móvil, llevan asociados desplazamientos de la punta de las lamas, que provocan que algunas lamas apoyen en su extremo antes que otras durante el cierre. Los esfuerzos internos que se introducen al cerrar la cubierta en las situaciones extremas fueron evaluados analíticamente, con objeto de garantizar que todas las lamas apoyen y que el cierre de la misma es viable en cualquier situación.

De gran complejidad resultó también la definición de la estructura fija de apoyo de los mecanismos (cilindros hidráulicos y guías). Esta estructura debía aportar espacio y capacidad de soporte suficiente para los mecanismos, a la vez que quedar integrada dentro de los condicionantes que imponen los acabados del edificio (Fig 13).

El mismo laboratorio de ensayos de túnel de viento referido para la estructura fija (*The Boundary Layer Wind Tunnel Laboratory*) analizó también el comportamiento aerodinámico de la cubierta móvil y realizó una estimación de las cargas de viento sobre la estructura. Se realizaron ensayos sobre 2 modelos diferentes para valorar la respuesta de la cubierta en las posiciones extremas que mayores dudas suscitaban en cuanto a su respuesta aerodinámica, esto es, la posición abierta y la posición un instante anterior al cierre de las lamas. Se construyó un modelo aeroelástico que incorporaba las propiedades elásticas tanto de las lamas como del arco móvil, disponiéndose las lamas en las 2 posiciones descritas, lo que permitió descartar las posibles inestabilidades aerodinámicas. Durante estos ensayos, también se midieron las reacciones en los modelos aeroelásticos que originaba la acción del viento, con lo que se pudo ajustar los valores de las cargas de viento de diseño.

4. Cimentación

La cimentación de la estructura es de tipo profunda y consiste básicamente en un encepado anular que transmite las cargas procedentes de los pórticos a una serie de pilotes prefabricados e hincados unos 24 m hasta llegar a un estrato de gravas arenosas desde el que poder movilizar todo el tope estructural de los pilotes (Fig 15).

El encepado anular está atado horizontalmente mediante una losa que no sólo sirve para llevar las cargas exteriores al terreno sino que recoge la componente horizontal de la reacción de los pórticos metálicos articulados.

Para transmitir cargas horizontales de la estructura, debidas al viento y al sismo, se cuenta con la rigidez horizontal de los pilotes, inclinándose los perimetrales exteriores unos 15° para aumentar este efecto. Se cuenta también con el rozamiento y los empujes pasivos de la losa y de los elementos enterrados.

Como característica singular cabe mencionar la existencia de un aliviadero enterrado de aguas pluviales que atraviesa en diagonal la parcela. Este colector se ha puentado debidamente para que no se viera afectado lo que ha supuesto grandes retos para las fases de diseño y de ejecución.

El volumen de hormigón utilizado en la ejecución de la losa, encepado y estructura de las salas soterradas es de 3400 m³, y en cuanto al pilotaje se han dispuesto 5200 m de pilotes prefabricados de sección cuadrada de 0.4x0.4 m.

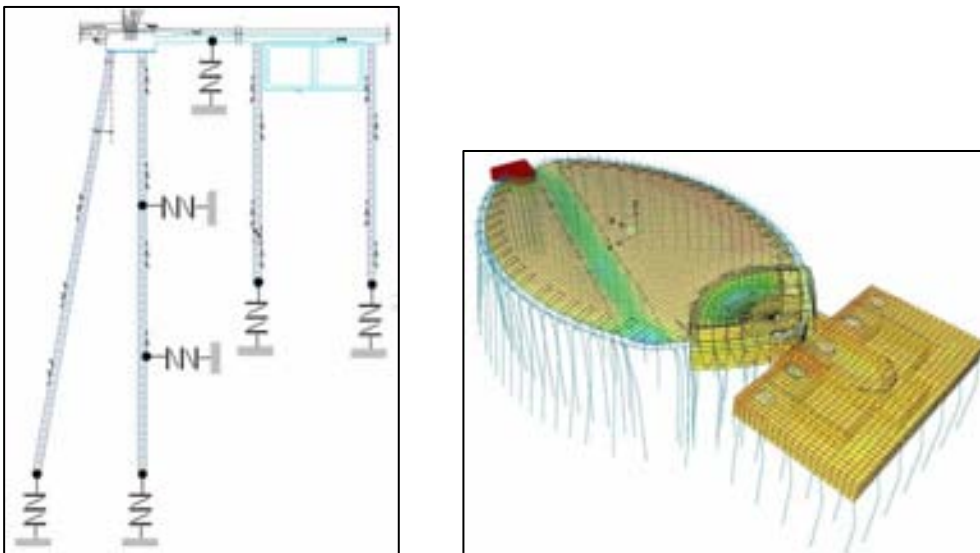


Fig. 15 Esquema estático de la cimentación y modelo de cálculo

5. Procedimiento Constructivo

Los arcos y pórticos se han descompuesto en piezas de fabricación en taller del máximo tamaño transportable, con objeto de simplificar las labores de montaje.

El montaje de la estructura fija avanza desde 2 frentes, norte y sur. Se avanza por delante con los tramos de los arcos laterales apoyados sobre torres de apeo, lo que permite el montaje de las piezas inferiores de los pórticos que apoyan sobre estos arcos y en cimentación, requiriéndose apeos adicionales para algunos de los pórticos (Fig 5). Por detrás, se avanza con los arcos centrales, también apeados sobre torres, y que permiten el montaje de las piezas superiores de los pórticos, directamente apoyadas sobre estos arcos .

Tras el desapeo de la estructura fija, se procede al montaje de la cubierta móvil. Las lamas se transportan a obra de una pieza, mientras que los arcos móviles se transportan en tramos que se ensamblan en su posición definitiva.

6. Conclusión

La espectacularidad del edificio diseñado por Santiago Calatrava se basa en buena medida en la importancia de la estructura desde la propia concepción de la obra. La estructura aporticada fija que soporta el cerramiento del edificio,

vista en su mayor parte, nos “enseña” claramente los caminos de bajada de carga hasta cimentación, tanto a través de los pórticos transversales como de los arcos longitudinales.

La forma de las piezas juega un papel importante en la estética y optimización estructural del edificio. Es el caso de los tornapuntas, los cuales nos muestran con su forma (aumento del diámetro en las secciones centrales) donde los efectos de pandeo incrementan los momentos, y por tanto se requiere una mayor inercia, lo que confiere sensación de robustez pese a la gran esbeltez de estos elementos.

La cubierta móvil es quizá el elemento más singular del edificio. Adicionalmente a la gran vistosidad de la misma, esta cubierta debe su movimiento a un sistema de mecanismos ingenioso. Calatrava ha buscado un sistema basado en el menor número posible de elementos de impulsión, de manera que el movimiento inducido en los extremos de los dos arcos móviles fuera capaz de originar un movimiento conjunto de 163 lamas.

La cubierta móvil constituye un reto desde su mismo diseño, hasta su ingeniería de detalle y posterior ejecución, para la que se ha requerido una importante coordinación interdisciplinar, con grandes dosis de ingeniería estructural y mecánica.