



## CUPULA DE MADERA DEL CENTRO COMERCIAL LAS ARENAS (BARCELONA)

Recientemente inaugurada, es una de las mayores de Europa

Miguel Nevado. Arquitecto. Consultor en estructuras

### RESEÑA HISTÓRICA

780.000 pesetas costó la Plaza de Toros de Las Arenas de Barcelona, una Barcelona de 539.000 almas en aquel año de Gracia de 1900, en que se inaugura. Desde entonces, hasta 1977, hubo tiempo para que Rafael El Gallo acuñara lo de que “más cornás da el hambre”, para que se batieran Belmonte y Joselito, para que Islero se llevara por delante a Manolete, para que Desertor le rajara la safena a Dominguín [senior], para que un [presunto] amante de Ava Gardner (el torero/actor catalán Mario Cabré) se marcara unos pases para pocas horas después triunfar como Don Juan Tenorio... todo ello salpicado con algún que otro espectáculo deportivo, cultural, político-erótico-festivo, etc... En fin, fue el caso que, tristemente, la Plaza no resistió el cambio de los tiempos en la [ejemplar] Transición Española, y en el 77 tiene lugar la última corrida. Languidece el coso hasta 1990, en que se cierra al público definitivamente. Tras una década de abandono, con sabrosas anécdotas de “okupación”, como no podía ser menos en una ciudad civilizada y mediterránea, lo que casi viene a ser lo mismo, en el 2000 se inicia el proyecto que terminaría, once años después con la apertura al público de un [so called] centro de ocio. Todo un signo de los tiempos: “aquél que tenga oídos para oír, oiga...”

### EL PROYECTO DE LA CUPULA

El proyecto de intervención optó por la conservación del “tambor” original en su misma posición: una triple atención, diría yo, a la memoria cultural de la ciudad y sus acrisoladas querencias taurinas, las tradiciones de la arquitectura historicista catalana, y el mantenimiento de los referentes urbanísticos esenciales para el inconsciente colectivo de una sociedad, vale decir, para que una sociedad, en cierta medida, “sea”. Esto obligó (se ejecutaron cinco niveles de sótano) a un notable esfuerzo tecnológico al tener que aparear las cuatro mil

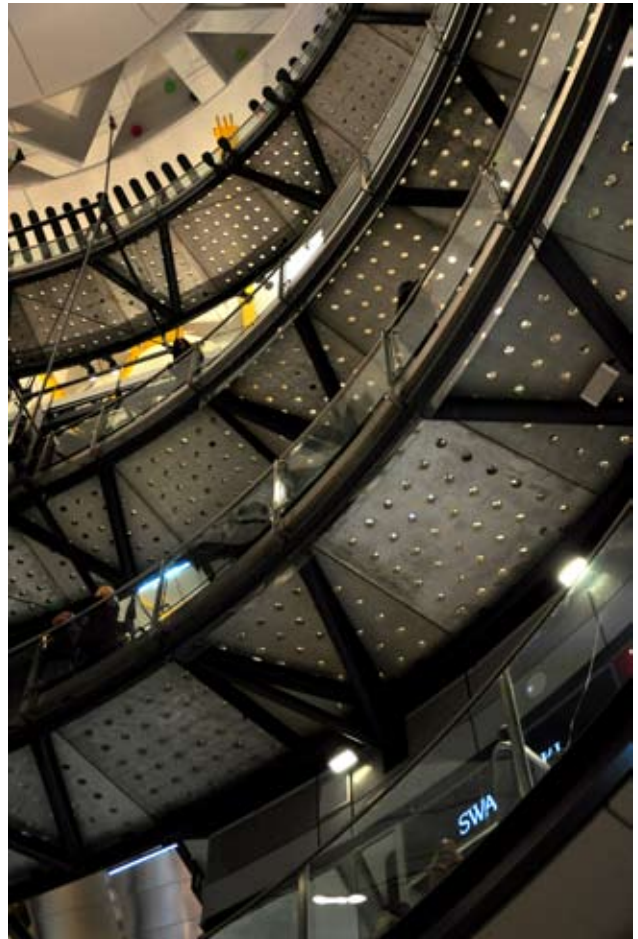
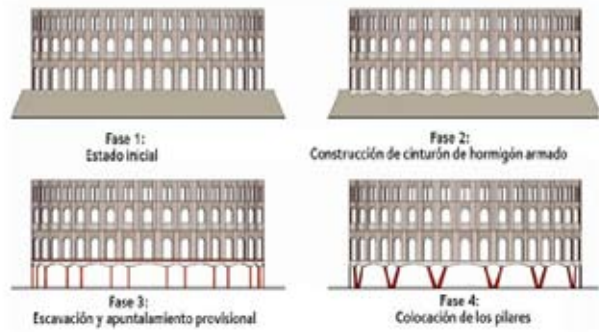
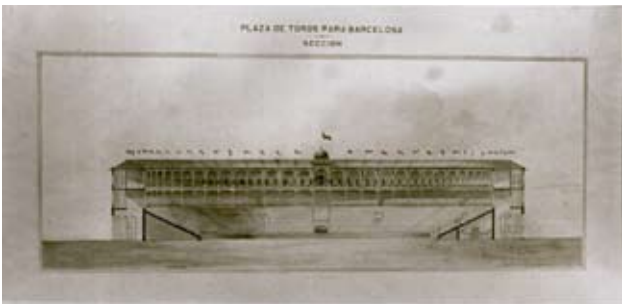
toneladas de fábrica... Y condujo (posiblemente casi forzó, en términos de análisis de costes) a que la mejor solución para cubrir el espacio creado fuera una cúpula de madera. Las siguientes observaciones de Luis Alonso (Alonso&Balaguer) dan las claves para la elección de la configuración material de la misma:

“Desde los primeros trazos del Proyecto, consideramos la posibilidad de incorporar un gran espacio abovedado multiusos, como complemento ideal al Centro Lúdico y Comercial de Las Arenas. Creímos firmemente que Barcelona precisaba de un nuevo espacio como el generado por la cúpula, muy especialmente dada la cercanía a la Fira de Barcelona, para eventos de muy variado formato.”

“Se estudiaron tres alternativas: hormigón, acero y madera laminada. El hormigón se desechó por el elevado peso propio y la frialdad de aspecto. El acero, por sus difíciles condiciones de protección antifuego, dado el uso público de tal espacio y sus estrictas normativas de aplicación. Finalmente fue la madera laminada la escogida por sus condiciones de calidad y calidez visual, así como su comportamiento antifuego y de peso ligero. Se estudiaron sus dimensiones para que pudiera albergar eventos de todo tipo (12 metros de altura en su centro) así como su impacto visual desde muy diferentes ángulos.”

“Es de remarcar el concepto estructural de la madera laminada, complementada por un revestimiento en sus intersticios de similar aspecto, lo que conforma el cálido espacio pretendido. Su disposición estructural permitió de forma lógica y sencilla, la aparición de lucernarios en su parte central y sus cuatro radios perpendiculares que dotan a tal espacio de una luminosidad, transparencia y reflejos hartamente sugerentes.”

Así, se opta por una cúpula reticular de madera laminada 77 m de diámetro, extraordinariamente plana: de unos 8.5 m de flecha, es decir, una relación flecha-luz de





1/9. El resultado arquitectónico es deslumbrante, tanto desde el interior como desde el exterior, enfatizando discretamente el edificio, pero sin llegar a disolver el protagonismo visual de la envolvente histórica. El precio tecnológico no es desdeñable: la relación flecha-luz habitual de este tipo de cúpulas suele moverse en el entorno de 1/5, y acercarse a 1/7 es ya buscarse respetables problemas. Por supuesto, hay ilustres antecedentes hacia los idus del pasado siglo XX, como el Mercado de Algeciras (E. Torroja) o el Palacio de los Deportes de Roma (P.L. Nervi), en hormigón armado... o las bóvedas planas que aparecen por doquier en El Escorial, ennoblecidas hijas de la tradición de la cantería bajomedieval española, que aún no hemos sabido superar.

La configuración final es una retícula de elementos de madera laminada, con panelado intermedio de madera microlaminada. La triangulación se estriba contra un anillo de tracción de acero, que descansa sobre pilares acodados. Para poner al lector en órdenes de magnitud, las barras estructurales de los paralelos oscilan entre 22/40 cm en el inferior y 22/32 cm en el penúltimo (el último es de acero). El resto de las barras oscilan entre 22/46 cm en el arranque y 22/38 cm en el ataque a la clave. Las longitudes de las barras de estribo inferiores son 9.4 m, y las de las barras de ataque a la clave 7.3 m. Un aspecto interesante del proyecto finalmente ejecutado es la optimización de clases resistentes utilizadas: GL32h en el anillo de madera inferior, GL28h en los demás anillos y en las barras de estribo inferior, y GL24h en el resto de las barras. Resulta un ejemplo de las posibilidades de control y ajuste presupuestario que permite el actual conocimiento sobre la fiabilidad del material. El consumo de madera se situó (limitándonos al entramado estructural) en torno a 0,08 m<sup>3</sup> madera/m<sup>2</sup> de superficie cubierta: una entidad sorprendentemente reducida. El anillo de estribo necesario fue un tubo de 46 cm de diámetro y un espesor de pared de 2 cm.

El sistema de uniones corresponde a un procedimiento con una dilatada trayectoria de aplicación: palastros conectados a la madera con pasadores metálicos de, que se unen a una pieza central de acero mediante tornillos métricos. Los palastros tienen un espesor oscilando entre 8 y 10 mm, con pasadores típicamente en el orden de los 12 mm de diámetro. Nada especial, ni en la configuración, ni en los nudos: de ahí su eficacia, de dónde su interés, vale decir (hablando de estructuras), su utilidad. La estrategia de control de la situación de incendio consiste en la protección de los herrajes con elementos de madera del suficiente espesor. Con esta disposición (de reducido coste comparativo) se asegura la estabilidad del entramado ante un incendio teóricamente generalizado de 60 minutos, sin que sea necesario ningún incremento de la sección. De hecho, dimensionada la estructura para el estado límite que gobierna el dimen-

sionado (la carga de mantenimiento, muy próxima al efecto de la nieve con un período de retorno de dos siglos), es, por defecto, capaz de la citada estabilidad a incendio sin incremento de las escuadrías.

## EL PROCESO DE MONTAJE

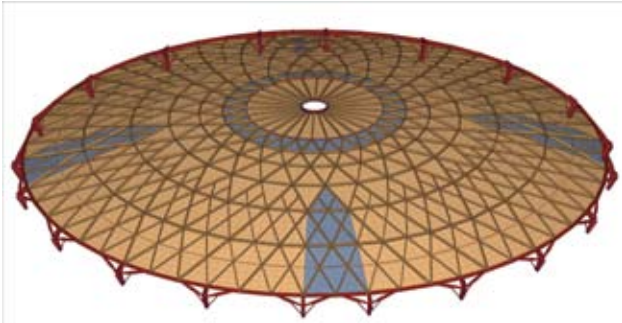
Se trató de un procedimiento análogo al de cualquier otro de los antecedentes del tipo estructural elegido. Cada barra perteneciente a un meridiano, se elevó a su posición con el correspondiente palastro alojado, para su posterior fijación a un cilindro central en el nodo teórico. Las líneas no horizontales, es decir, no pertenecientes a un meridiano, se interrumpen en su encuentro con el mismo, uniéndose parcialmente a pie de obra con pasadores, y, parcialmente, in situ, una vez posicionado el nodo (materializado como un cilindro de 6 cm de diámetro). Cada meridiano fue construyéndose debidamente apeado en los correspondientes nodos, para proceder al descimbrado final una vez colocado el (llamémosle) óculo. La flecha instantánea medida durante el descimbrado, sólo reveló unas desviaciones inferiores al entorno del 20% de las calculadas: todo un ejemplo de fiabilidad, dado el vano a salvar.

## LA PARALIZACION DE LA OBRA

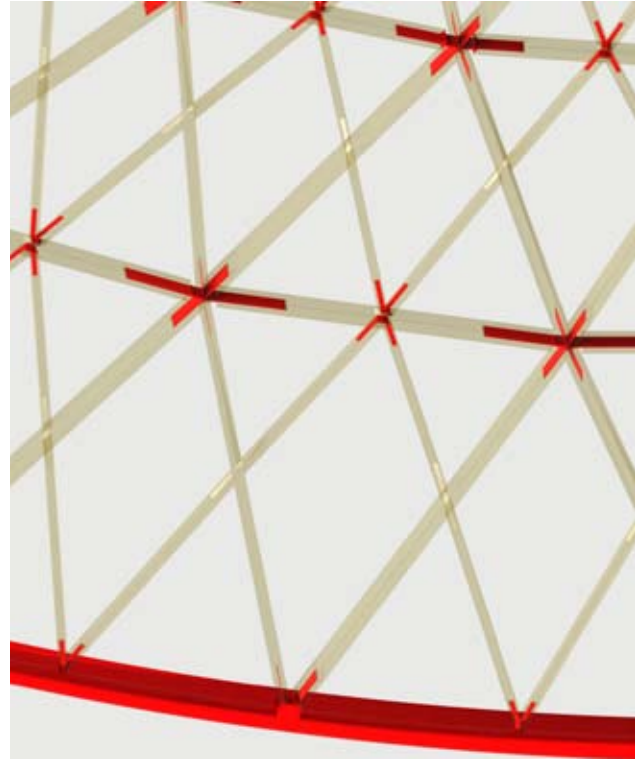
En la primavera de 2009, como uno más de los efectos colaterales de la profunda crisis económica en que estamos asentados, el montaje de la cúpula se paraliza con solo uno (dos en alguna sección) de los anillos meridianos de madera montados. Fruto de la infundada desconfianza del espectador del Sur de Europa hacia la madera, se crea una desproporcionada alarma sobre lo que podría ocurrir con una estructura de tales dimensiones en este material, dejada “a la mano de Dios”, a medio construir. De hecho, la alarma fue tal, que acabó saltando a la prensa, por así decir, no profesional. Quien esto escribe recibió la confianza de AiTiM, entidad a la que el contratista general se dirigió, para evaluar la situación. Honestamente, un trabajo no muy cansado: no había nada de qué preocuparse en un horizonte de pocos meses o años (incluso considerando el poco amable ambiente de Barcelona para la durabilidad de la madera en un exterior no protegido). Considerando la eventualidad de que la paralización se prolongara durante muchos años o algunas décadas, los “problemas” técnicos que se generarían (en relación con la seguridad de la estructura) se revelaron de una entidad económica comparativamente ridícula.

## EL ANALISIS ESTRUCTURAL

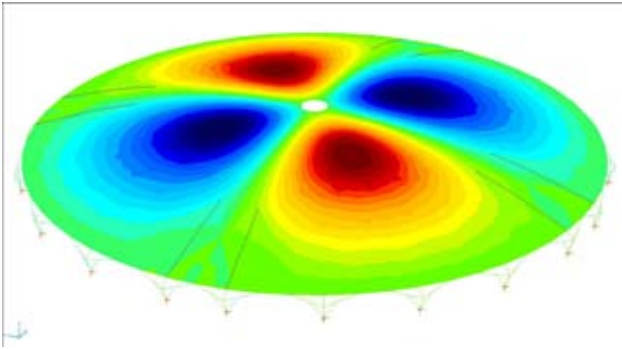
De acuerdo a un viejo adagio (en versión libre del autor): ningún arquitecto sabe al principio del proyecto lo que las instalaciones van a demandarle al final de



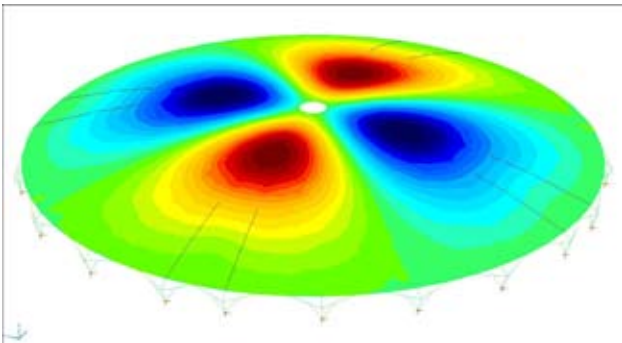
Modelo de cálculo



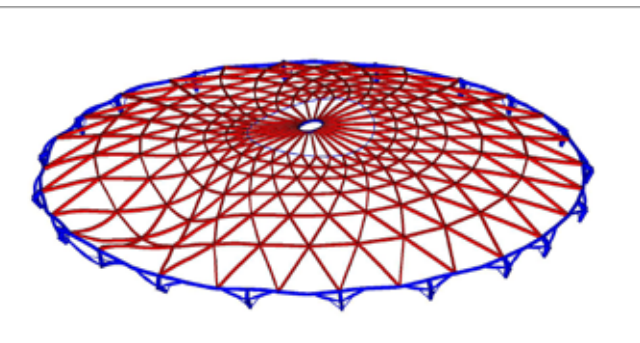
Detalle de los herrajes de los nodos y anillo de estribo



Vibraciones. Modo fundamental 1



Vibraciones. Modo fundamental 2



Dformación bajo viento



Detalle del estribo de tracción (un anillo de 46 cm de diámetro y 2 cm de espesor) que descansa sobre pilares acodados



la obra. Bien, fue el caso que al final de la obra, y, ante la eventual aparición de nuevas cargas insuficientemente determinadas en el proyecto original (porque, simplemente, no habría sido posible), el contratista general, Dragados SA, propone al autor de este artículo la realización de un chequeo externo del análisis de la estructura. Requeridas las oportunas precisiones al responsable de cálculo de la estructura ejecutada (Finn Forest – Merck), la diferencia entre mi análisis y sus conclusiones se mantenían en valores irrelevantes, a considerar tan sólo en el tercer dígito significativo (dígito por el que el abajo firmante no se jugaría una cena, en semejante tour de force).

El comportamiento dinámico de la estructura, si bien se manifestaba muy condicionado por el descenso de los apoyos (véanse los diagramas que ilustran el primer y segundo modo de vibración fundamentales), se reveló muy satisfactorio. La respuesta sísmica de la cúpula, conducía a irrelevantes tensiones internas, así como a esfuerzos de los apoyos de muy poca entidad.

Los análisis no lineales realizados, particularmente para el caso del viento (véase la representación del estado de deformación correspondiente inserto en este artículo, notablemente escalado), muestran una “confortable” carencia de sensibilidad del sistema ante los efectos de segundo orden, habida cuenta de la mínima curvatura de la cúpula, ya citada.

## POR ÚLTIMO (Y NO MENOS IMPORTANTE): LA ROBUSTEZ

Un aspecto clave del resultado del estudio del entramado fue la consideración de su robustez estructural. Este concepto aún no se encuentra plenamente incorporado en el cuerpo normativo de obligado cumplimiento en España (excepción hecha del incendio y el riesgo sísmico). Sin embargo, a corto o medio plazo será inevitablemente incorporado: es un simple problema de civilización. En el texto actual del Eurocódigo 0, la idea se expresa así: “[una estructura] deberá estar diseñada de modo que no se vea dañada por eventos como el fuego, explosiones, impacto o consecuencias de errores humanos, en una medida desproporcionada a la causa original”. Se trata de un concepto con drásticas implicaciones económicas en el dimensionamiento la estructura. A título de ejemplo, una de las de formulaciones que se barajan (de hecho, más o menos en aplicación desde hace años en el Reino Unido) es el exigir que pueda eliminarse aleatoriamente cualquier elemento vertical de transferencia de carga, sin que el edificio sufra daños cuya reparación sea de un coste tal que justifique su demolición total o parcial (es decir, se dé un “colapso desproporcionado”). No es necesario hacerle notar al avisado lector las implicaciones que esto tiene en estructuras intrínsecamente pesadas como

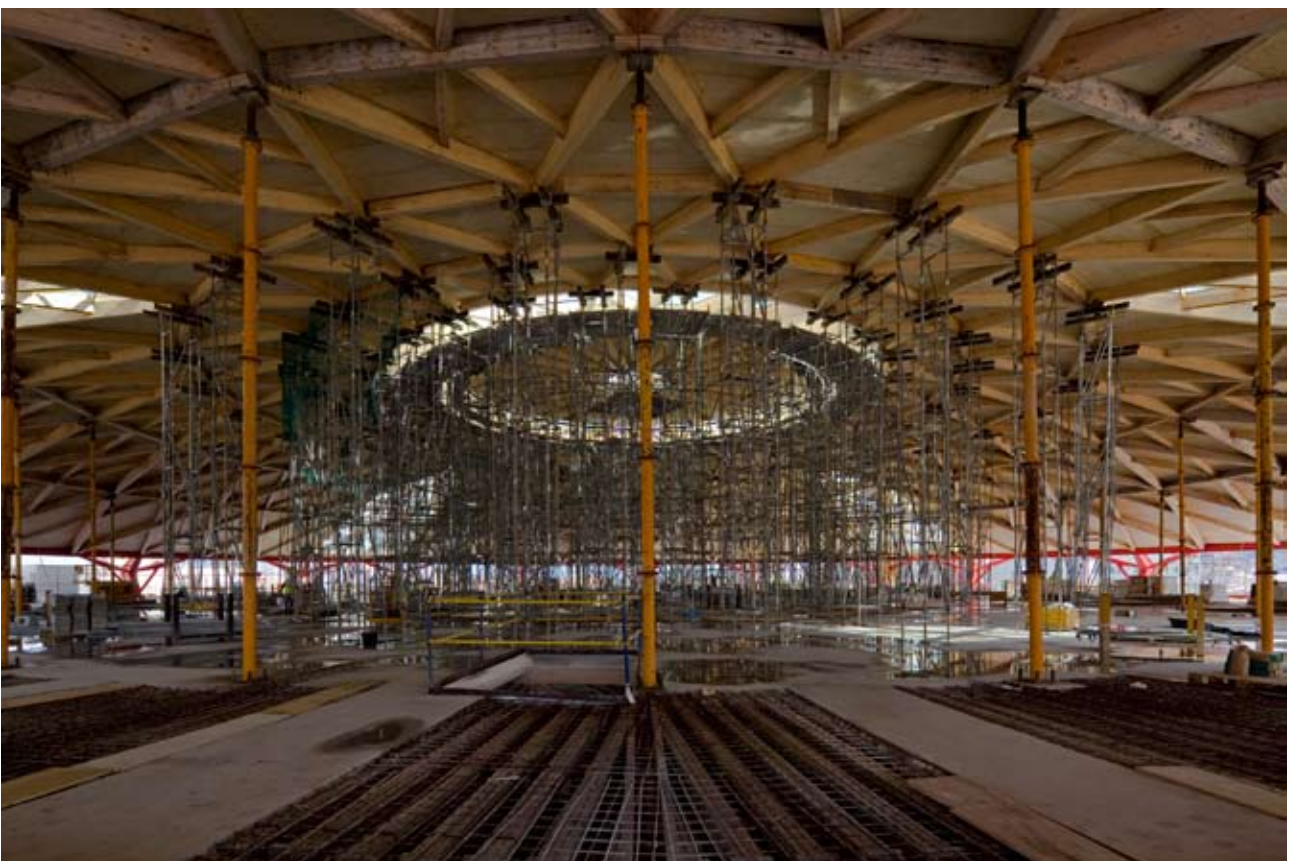
las que utilizamos en el 85 al 95% (¿quizá ya menos?) de la construcción.

Por las características de uso de la cúpula, verifiqué (además de la estabilidad ante 60 minutos de incendio, y el comportamiento en sismo) cuatro supuestos de carácter fortuito, o relacionados con posibles deficiencias del conocimiento (o de definición del nivel de incertidumbre que la sociedad está dispuesta a aceptar) de las solicitaciones futuras:

- El descenso de los apoyos de la cúpula, en una magnitud que duplicase el valor prevista en proyecto (p.ej., por defectos de cálculo o ejecución, o disfunciones de cimentación). Ante este análisis, el análisis concluía que era necesario cuadruplicar los descensos de apoyos considerados en las hipótesis de partida, para que la disfunción que éstos provocasen en la cúpula tuviera consecuencias importantes.
- El funcionamiento defectuoso de la climatización de los restaurantes, que pudiera llevar la humedad de equilibrio de la madera a valores del 5%, con el consiguiente riesgo de inhabilitación de una línea de pasadores, por acumulación de tensiones perpendiculares a la fibra. El propio dimensionamiento de las uniones de pasadores, por su margen de seguridad adicional, absorbía sin problemas el posible incidente; de hecho, sería un evento accidental que ni siquiera requeriría intervención, sensu stricto. Sí se consideró conveniente la incorporación al Libro del Edificio de determinados protocolos de actuación en el caso de aparición de fendas de extremadas dimensiones (fundamentalmente consistentes en la aplicación en el “valle” de la fenda de masillas ocultas ignífugas que mantengan en todo caso la protección del metal en hipótesis de incendio).
- La desaparición de una sección completa de cubierta por explosión accidental en una zona de cocina de un restaurante. Véase el resultado del análisis no lineal efectuado: se daría un dramático descenso del orden de 35 cm en el punto más desfavorable, pero sin rebasarse ningún estado límite último. De hecho, por el tipo de cobertura considerada (lámina plástica sobre aislamiento), ni siquiera es verosímil que el deterioro llegase a ser relevante en términos de coste.
- Desviación de las hipótesis de las cargas. La distribución de la carga de nieve considerada en las normas vigentes en los países desarrollados es un aspecto que diferentes estudios europeos recientes sobre fallos estructurales están poniendo en tela de juicio. Ello es así particularmente cuando puede darse la combinación de temperaturas no muy bajas (es decir, nieve no helada, y potencialmente poco compactada) combinada con fuertes vientos. Para entendernos: el litoral mediterráneo de España y Francia sería un perfecto candidato. La estructura propuesta reveló una clara capacidad de soportar eventos de estas características, más allá de lo



Estado de la estructura durante su paralización donde se aprecian los herrajes en los nodos de la malla triangulada



Avance de las obras hasta el cierre de la cúpula



sugerido en la interpretación literal de la interpretación española de las indicaciones del Eurocódigo 1, “sintonizadas” sobre los sucesivos ajustes de nuestra venerable NBE-AE. Respecto al viento, se revisaron las series históricas registradas en el aeropuerto de El Prat, para comprobar que los valores que el CTE recomendaba eran razonablemente consistentes con un período de retorno de dos siglos (que sería el sensato para edificios de tan notable carácter patrimonial como el que nos ocupa).

La casi irrelevante incidencia en la seguridad estructural de la paralización arriba descrita, sería otro buen ejemplo de robustez del sistema estructural y el material elegidos. Finalizaré añadiendo aún una cara más al poliédrico concepto de robustez (sea el sexto, o, quizá, el primero): la “robustez presupuestaria”. Nuevamente en palabras de Luis Alonso, arquitecto del proyecto: “Hemos de significar que todo el proceso de proyecto, incluyendo todo tipo de detalles y de posterior ejecución resultó harto gratificante por las mínimas incidencias sorprendidas, ya fueran presupuestarias o de diseño. La solución final, pues, creemos es un buen ejemplo de resolución y de sinergia entre su proyecto, fabricación y puesta en obra, incluyendo un plazo de ejecución ajustado, a pesar de haberse visto alterado por una inoportuna paralización de obra, dada la crisis y su incidencia.”

En fin, estamos ante una estructura de referencia internacional, brillante en su resolución arquitectónica e ingenieril en todos los aspectos. Pero, aún más: es una obra que ejemplifica hasta qué punto los arquitectos pueden confiar hoy en la madera como material predecible desde el punto de vista de los costes, intrínsecamente poco problemático (sobre todo) cuando de estructuras complejas se trata, y... robusto, muy robusto.

miguel.nevado@enmadera.info

## FICHA DE LA ESTRUCTURA

Promotor: Metrovacesa.

Arquitectura: Alonso & Balaguer en asociación con Rogers, Stirk, Harbour & Patners.

Ingeniería estructural del edificio: Boma SA.

Contratista general: Dragados SA.

Cálculo y ejecución de estructura: Finn Forest – Merck.

Supervisión externa de estructura: Miguel Nevado (AiTiM).

