

Láminas cilíndricas de vidrio moldeado para los lucernarios interiores de la Biblioteca del Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía de Madrid

Bellapart Engineering

Francesc Arbós Bellapart, *Ing.Ind.*

Albert Vidal Majoral, *Ing. Ind.*



Fig. 1. Vista de la lente central del Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía

1. Antecedentes

El estudio de arquitectura AJN-Architectures Jean Nouvel con sede en París ha proyectado la ampliación del Museo Nacional Centro de Arte Reina Sofía (MNCARS) de Madrid y dentro del mismo, en el espacio destinado a Biblioteca, se preveía disponer de unas estructuras ligeras que suspendidas del techo, justo por debajo de los lucernarios de vidrio en cubierta, tamizaran y difundieran la luz procedente del exterior jugando además un papel decorativo extremadamente singular: “*La biblioteca busca la luz y la sombra, luces cenitales difuminadas por unas cúpulas colgantes de vidrio grueso y tallado...*” [1]

Las láminas estructurales debían incorporar elementos cúbicos de vidrio moldeado de diseño especial.

En Noviembre del 2000 Bellapart Engineering fue contratado por AJN para desarrollar la viabilidad de estas estructuras así como otros sistemas de fachadas singulares del edificio.

Tanto la geometría considerada, como el material estructural previsto -aluminio- en los

inicios del estudio fueron variados en etapas de rediseño posteriores por razones de concepto, coste y plazo.

Finalmente, en Agosto del 2004 Bellapart SAU fue contratada para la realización del proyecto ejecutivo, fabricación y montaje de las 3 láminas cilíndricas que configuran las llamadas “lentes” de la Biblioteca del MNCARS cuya ingeniería y construcción se describen a continuación.

2. Descripción general

Una única geometría define las tres lentes que cuelgan del techo de la biblioteca. El origen de esta es la intersección de un cilindro de 53.3 m de radio con un cilindro de sección elíptica inscrito en un rectángulo de 23.4m x 11m.

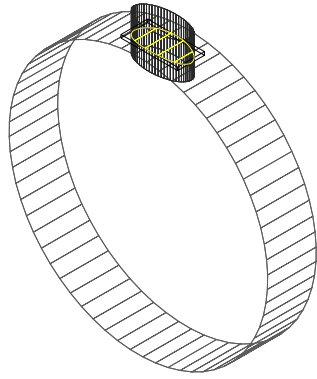


Fig. 2. Origen de la geometría de las lentes.

Directamente de esta superficie surge la lente central. Fig.2. Se eliminan los extremos para dar origen a las dos lentes laterales. Fig. 4.

Inicialmente se estudió una geometría con doble curvatura sustituyendo el cilindro de 53.3 m de radio por un volumen toroidal de 40 y 10 m de radios generatrices. El mayor porcentaje de trabajo a membrana de una geometría no desplegable proporcionaba un mejor comportamiento estructural. Fig. 3.

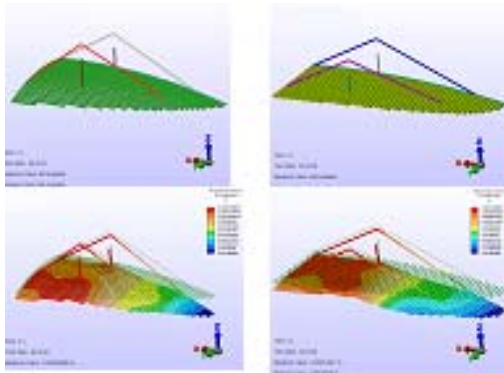


Fig. 3. Comparativa de deformaciones entre geometría toroidal y cilíndrica en fase de prediseño.

Finalmente se ha optado por la geometría con simple curvatura con la que el incremento de coste material debido a una sección de los perfiles ligeramente mayor compensa el incremento de coste en fabricación y montaje de la geometría de doble curvatura de mayor complejidad.

La solución constructiva seleccionada para generar la superficie descrita se basa en el uso de barras tubulares rectangulares de 120x40x2 en acero unidas a nudos tubulares cuadrados de 50x50x5 también en acero formando una retícula de 250 mm x 250 mm. Fig. 4.

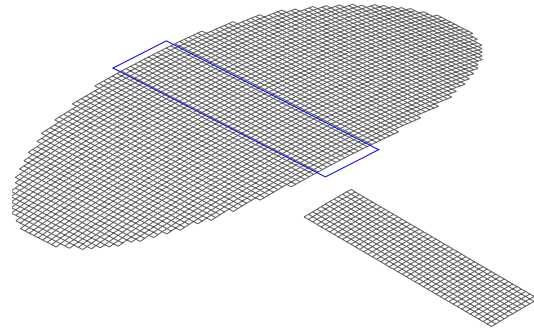


Fig. 4. Esquema alámbrico de las lentes y origen de las lentes laterales.

Dando respuesta a su objetivo final, en cada uno de los 3312 huecos de la retícula de la lente central y los 484 de cada una de las lentes laterales se aloja un dado de vidrio moldeado translúcido a través del cual se filtra la luz exterior .

La unión de la lente central a la estructura del edificio se realiza mediante seis puntales verticales en acero, Fig. 6. entre los cuales se disponen tirantes de arriostramiento en acero inoxidable para aumentar la estabilidad del conjunto ante cargas laterales. Longitudinalmente, doce tirantes inclinados en acero inoxidable que en su extremo inferior se dividen en varios tirantes de menor sección multiplican los puntos de soporte y en consecuencia, disminuyen los esfuerzos ejercidos sobre los nudos de anclaje de la lente. Fig. 7, 11 y 12.

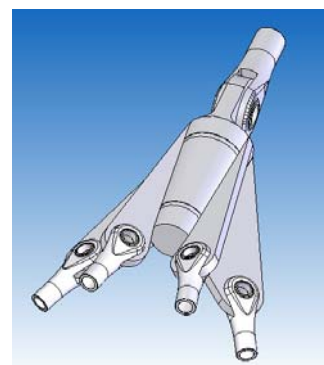


Fig. 5. Pieza encargada de transmitir los esfuerzos entre los tirantes de 24 mm de diam. y los de 16 mm de diam.

En el caso de las lentes laterales, su menor peso lleva a una solución mas simple en base a seis tirantes prácticamente verticales entre los cuales se disponen también tirantes de arriostramiento.

3. Estructura portante

El reto principal propuesto por la retícula tubular de las lentes consistía en desarrollar un sistema de montaje que, asegurando el correcto comportamiento estructural ante el peso propio de la estructura y el de los dados de vidrio moldeado que soporta, proporcionara el control dimensional necesario para montar las tres lentes con la curvatura diseñada de una forma rápida y eficaz.

Después de analizar distintas soluciones, se ha optado por una fabricación modular con la que se combinan las uniones atornilladas y las soldadas.

La lente central y las dos laterales se han dividido en 89 módulos de 30 tipos distintos y 32 módulos de 6 tipos distintos, respectivamente. Fig. 6.

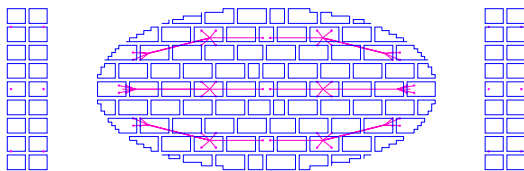


Fig. 6. Moduladado de las tres lentes.

Buscando una mayor elegancia y calidad de acabados, la soldadura de las barras sobre los nudos no se ha realizado sobre todo el perímetro de la barra sino que se ha dejado la arista inferior y los 20 mm inferiores de las aristas laterales sin soldar. Con esta soldadura parcial se ha conseguido que desde la perspectiva de los usuarios de la biblioteca se perciban tan solo cantos vivos.

La solución adoptada para generar la curvatura de la estructura ha consistido en fabricar una plantilla sobre la que se han soldado los 121 módulos que componen las tres lentes. Con este sistema y la aplicación de un riguroso control de calidad en la fase de fabricación de los módulos para asegurar que la retracción de los cordones de soldadura no alterara la geometría proporcionada por la plantilla, se ha conseguido generar con gran precisión la geometría cilíndrica buscada.



Fig. 7. Imagen de las lentes del MNCARS en la que se puede observar su curvatura.

Teniendo resuelta la unión de las distintas barras y nudos que forman los módulos, quedaba pendiente la unión en obra de los distintos módulos. En este caso se ha optado por uniones atornilladas que requieren de los siguientes elementos:

- Nudos especiales en el perímetro de los módulos. La modificación que incorporan estos nudos respecto los convencionales consiste en que estos disponen de dos tuercas embutidas M12 en 1 o 2 de sus caras en función de si, dentro del perímetro del módulo, el nudo se encuentra o no en una esquina.
- Barras especiales que ejercen de enlace entre dos módulos distintos. En estas barras se ha soldado en cada uno de sus extremos una pletina de 12 mm de espesor con dos taladros a través de los cuales se introducen los tornillos de anclaje. Fig. 8 y 9.

El montaje de estas barras es posible gracias a el mecanizado de dos orificios rectangulares en su cara interior, a través de los cuales se introduce el tornillo y la llave neumática para su apriete.

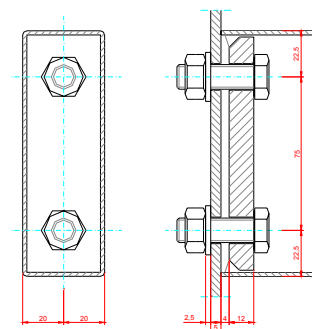


Fig. 8. Esquema de las uniones atornilladas utilizadas en las barras de unión de los módulos.

El correcto diseño de las barras de unión teniendo en cuenta la introducción de los utillajes de apriete en su interior ha sido de vital importancia a la hora de conseguir un tiempo de montaje suficientemente ajustado. 6 personas han ensamblado en obra los módulos de las tres estructuras en menos de dos meses.



Fig. 9. Imagen de la lente central del MNCARS en la que pueden observarse las barras de unión entre módulos.

Obviamente, estas ranuras se han considerado en el cálculo de la estructura. El método utilizado ha sido el modelado de las mismas en el modelo analizado por elementos finitos con métodos de cálculo no lineales. Fig. 10.

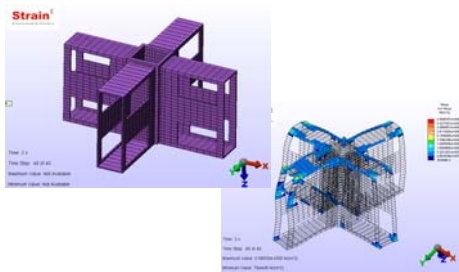


Fig. 10. Modelo de la unión entre módulos utilizado en el cálculo por elementos finitos.

Tanto los módulos como las barras de enlace y el resto de elementos estructurales, se han decapado y tratado con tricloro antes de ser pintados con pintura negra mate bicomponente rica en zinc.

4. Sistema de anclaje

En el diseño del sistema de anclaje de las lentes se ha buscado que este pasara lo mas desapercibido posible.

Con este objetivo se ha optado por el uso de 6 puntales de acero de 100 mm de diámetro y 5

mm de espesor en la parte central y 12 tirantes de 24 mm de diámetro dispuestos en sentido longitudinal abarcando toda la superficie de la lente.

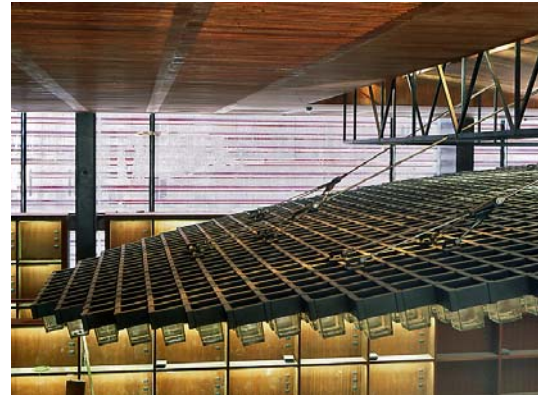


Fig. 11. Detalle de los tirantes de anclaje sobre una de las alas de la lente central.

Si bien estos 18 puntos de anclaje sobre la estructura del edificio son suficientes para sostener los 22500 Kg. de la lente central, el análisis por elementos finitos de las tensiones ejercidas por los anclajes sobre la superficie de la lámina, ha puesto de manifiesto la necesidad de buscar una distribución de tensiones mas homogénea. Este resultado se ha conseguido con la ramificación de los puntales y parte de los tirantes en 4 ramas de menor diámetro. Fig. 11 y 12.

El elemento encargado de transmitir los esfuerzos del tirante Ø24 a los 4 tirantes Ø16 se ha diseñado, siguiendo el mismo criterio de simplicidad estructural, buscando el encuentro en el espacio de las cinco líneas de fuerza. Fig. 5.

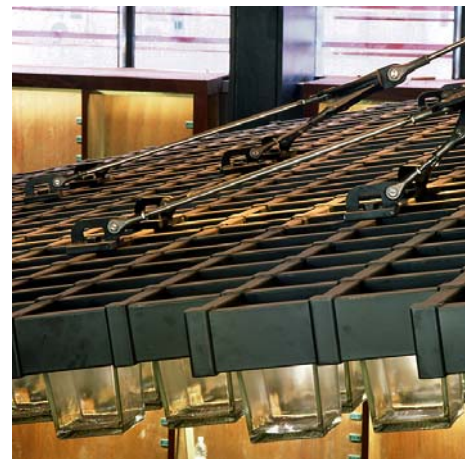


Fig. 12. Detalle de los tirantes de anclaje sobre una de las alas de la lente central

Contribuyendo también a la disminución de las tensiones sobre la estructura y garantizando la viabilidad del montaje, el anclaje se ha realizado mediante terminales de acero inoxidable articulados sobre placas de acero orientables.

Paralelamente a los elementos descritos encargados de soportar las fuerzas gravitacionales, se han dispuesto dos líneas de tirantes de 12 mm de diámetro en sentido transversal. La misión de estos consiste en arriostrar la estructura ante cargas transversales ejercidas tanto durante la fase de montaje como durante posibles trabajos futuros de mantenimiento.

5. Elementos de vidrio

Sin duda alguna, dentro de esta estructura singular, las 4280 piezas de vidrio moldeado de 190 mm x 190 mm de base por 200 mm de alto que se repiten matricialmente por toda su superficie constituyen su principal atractivo.

Una de las características más destacadas de estas piezas, es el texturado piramidal de su base, encargado de dispersar los rayos de luz que pasan por su interior. Fig. 13 y 14.

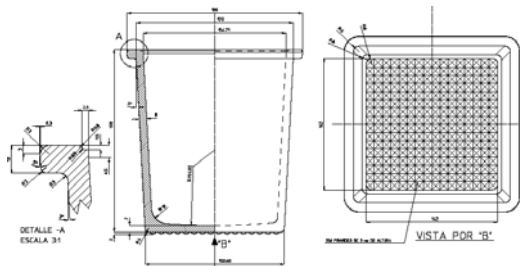


Fig. 13. Sección de la pieza de vidrio moldeado

La sujeción de los dados de vidrio moldeado sobre la estructura se ha resuelto mediante la inserción de dos pasadores de acero inoxidable en cada una de las barras. Con el objetivo de eliminar el contacto vidrio-metal, se ha montado un recubrimiento plástico en el extremo de los pasadores.

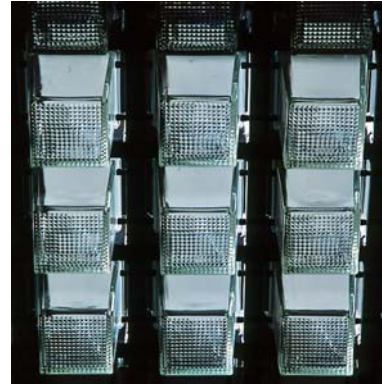


Fig. 14. Detalle de los dados de vidrio moldeado

Pensando en el mantenimiento futuro de las lentes, para el cual la propiedad ha construido una pasarela sobre la lente, se ha fijado y sellado sobre los dados una pieza de vidrio extraclaro de 6 mm de espesor, evitando la acumulación de partículas de polvo en su interior.

6. Conclusión

La aparente sencillez de las lentes esconde, como se ve reflejado en este escrito, un trabajo de ingeniería estructural y de producción muy notables.

El reto se resuelve mediante una aproximación a la vez creativa y rigurosa en la que intervienen de forma igualmente importante desde los ingenieros hasta los operarios de montaje.

La construcción de estructuras ligeras permite también la obtención de un trabajo de calidad en el que no es el tonelaje el objetivo sino el detalle minucioso.

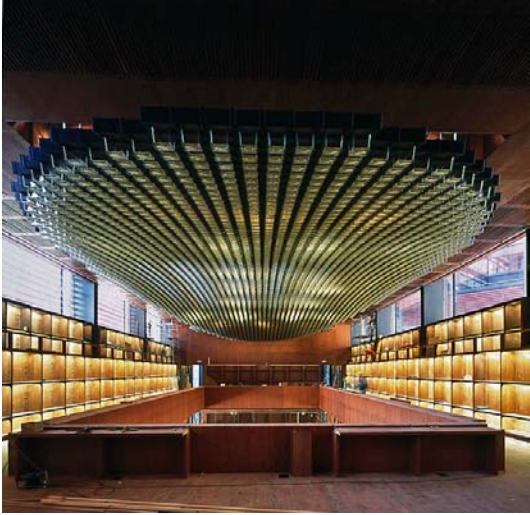


Fig. 15. Vista de la lente central

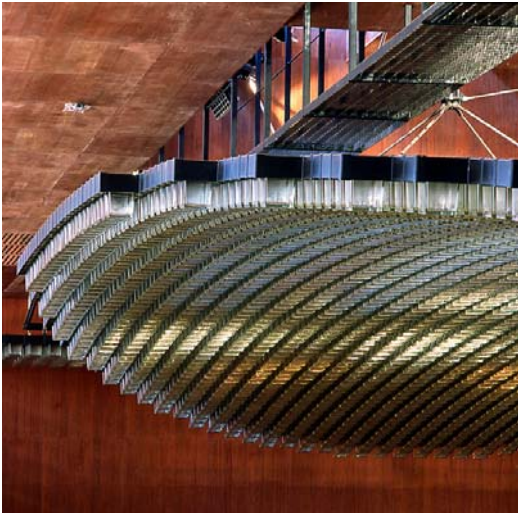


Fig. 16. Vista de la lente central

Referencias

[1] Revista El Croquis , Jean Nouvel 1994-2002
numero doble 112/113