

La contribución de R.G. Boscovich al desarrollo de la teoría de cúpulas: el informe sobre la Biblioteca Cesarea de Viena

Gema López Manzanares

La Biblioteca Cesarea, actualmente Biblioteca Nacional de Viena, fue construida por Josef Emanuel, hijo de Johann Bernhard Fischer von Erlach, entre 1723 y 1735, a partir de la planta y alzado principal proyectado por éste. En 1763, la emperatriz M^a Teresa de Austria, ante la gravedad de los daños que se observaban en el edificio, especialmente, en la cúpula central, decidió consultar a varios expertos, entre ellos, Boscovich, que colaborará estrechamente con el arquitecto Niccola Paccassi (Buchowiecki 1957; Teichl 1949). Veinte años después de la polémica de 1743 sobre los daños de la cúpula de San Pedro, Boscovich, uno de los tres matemáticos autores del célebre *Parere*, emite de nuevo un informe sobre el estado y reparaciones a efectuar en una cúpula, oval en este caso y de menor tamaño. El esquema del informe, según el propio autor,¹ es similar al del *Parere*: descripción del edificio y de los daños, sistema general de los movimientos producidos, causas y remedios a adoptar y, aunque no incluye cálculos matemáticos, resulta de una claridad extraordinaria y refleja la profundidad de los conocimientos de Boscovich en relación con la construcción abovedada y su comportamiento estructural.²

DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

Según refiere Boscovich, la Biblioteca Cesarea se construyó sobre unas antiguas caballerizas abovedadas de planta muy alargada, gruesos muros y cimen-

tación profunda. La biblioteca propiamente dicha está pues, elevada sobre el terreno y su estructura



Figura 1. Retrato de R.G. Boscovich conservado en la Österreichische Nationalbibliothek, en Viena (Buchowiecki, 1957)

consiste en una bóveda de cañón que se interrumpe en una cúpula oval central. Ésta sobresale transversalmente en la dirección del eje mayor de la elipse, formando dos ábsides, sobre los que se apoya a modo de tambor y cuyos muros, paralelos a la fachada y achaflanados en el encuentro con la galería por la parte exterior, se prolongan hasta el terreno. Los ábsides están simplemente adosados a los muros antiguos de la base y transmiten su carga a cimientos nuevos, mientras que los muros longitudinales de la biblioteca se levantan sobre los de las caballerizas. La cúpula está perforada por ocho ventanas ovales y, en la parte de la entrada, presenta varios caballos apoyados sobre el arco del hueco central del ábside a

la altura del corredor interior de la cúpula. En cada uno de los brazos simétricos de la biblioteca, a una distancia de dos ventanas desde la cúpula, hay dos columnas que sostienen un arco, dividiendo de este modo la bóveda de cada tramo en dos partes; también hay escaleras para acceder a la galería elevada. Tanto la bóveda de los brazos como la cúpula central están protegidas por una cubierta de madera. La de la cúpula no tiene tirantes y se apoya sobre muros prácticamente verticales construidos por encima del arranque, sobre una planta octogonal de lados muy cortos en las diagonales. El eje mayor de la elipse interior mide 90 pies (28,45 m) y el menor 54 (17,07 m), según Naredi-Rainer (1993).³

Boscovich se encontró con un andamio de madera bajo la cúpula que no llegaba a tocarla, aunque sí



Figura 2.
Alzado de la Biblioteca Cesarea de Viena en 1737 según Kleiner. (Sedlmayr, 1976)

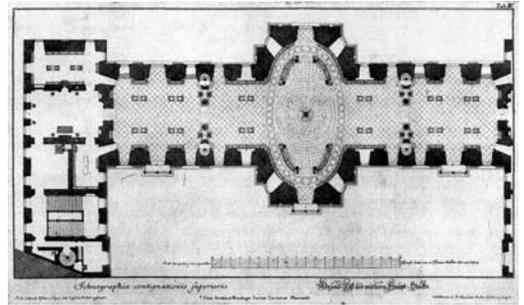


Figura 3.
Planta de la Biblioteca Cesarea de Viena en 1737 según Kleiner (Sedlmayr, 1976)

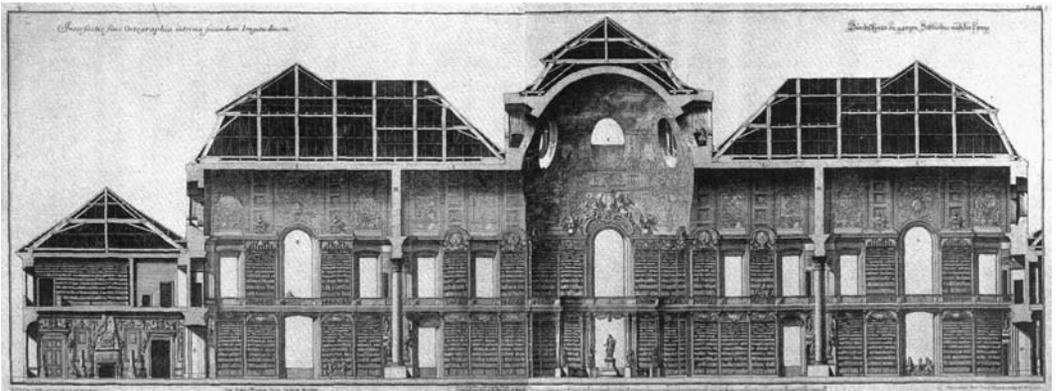


Figura 4.
Sección longitudinal de la Biblioteca Cesarea de Viena en 1737 según Kleiner (Sedlmayr, 1976)

apuntalaba ligeramente los arcos torales de la emboadura de las naves laterales y los de las ventanas más bajas de aquella. Realmente había sido colocado para examinar los daños. Además observó varios tirantes de hierro en la biblioteca, algunos destensados y de sección muy reducida, 2 ft ~ fl, en pulgadas² (6,6 ~ 2, en cm²).⁴

DESCRIPCIÓN DE LOS DAÑOS

Boscovich describe los daños del edificio empezando por la cimentación y ascendiendo después hasta la cúpula. Esos daños aparecieron de repente nada más concluir la obra, el propio Boscovich afirma que ya estaban presentes durante la ejecución de los frescos.⁵ Después fueron creciendo hasta alcanzar una gravedad que obligó a apuntalar los arcos y las ventanas y colocar los tirantes de hierro mencionados.⁶

La cimentación

En la cimentación no había daños a considerar, aunque reconoce que no se podía acceder a algunas zonas por estar llenas de tierra. También comenta que algunos le habían dicho que la cimentación de los muros nuevos de los ábsides no era tan profunda como la de los muros del almacén o antiguas caballerizas y menciona la existencia de una canalización de agua junto al muro longitudinal en la parte opuesta a la entrada.

Planta de entrada

En la planta de entrada, Boscovich tampoco descubrió daños, ni en los muros, ni en las bóvedas del almacén. Pero entrando por el ábside sí observó que los muros nuevos de éste se habían separado de los antiguos del almacén con una grieta que se iba ensanchando hacia arriba y se continuaba por la bóveda del techo. En cuanto al ábside opuesto, al que no se podía acceder por la parte del almacén, observó el mismo tipo de separación por el exterior.

Boscovich comprobó además si al separarse los muros habían descendido uno respecto a otro. El resultado obtenido fue que ni en la base de las pilastras ni en la grieta de la entrada se apreciaban indicios de ese descenso relativo entre los ladrillos rotos.⁷

La biblioteca

Al nivel de la biblioteca se veían las mismas grietas de separación entre los muros del ábside y los longitudinales que, sin embargo, se iban reduciendo hasta desaparecer en la zona de los capiteles.

Los desplomes

Boscovich encargó que se midieran los desplomes tanto de los muros longitudinales de la biblioteca como de las pilastras de los ábsides, lo cual se hizo sólo en la parte opuesta a la entrada. Los desplomes medidos indicaban que todos los muros se habían inclinado hacia fuera, pero eran mayores en los de los ábsides que en los muros longitudinales y en algunas zonas llegaban a superar las 4–5 pulgadas en 35 pies (10–13 cm en 11 m, es decir, aproximadamente el 1%). Además, no solamente estaban desplomados los muros del ábside en la dirección del eje mayor de la elipse sino que también lo estaban en la dirección perpendicular, aunque algo menos, 1 pulgada en 35 pies (2,6 cm en 11 m).⁸

Por lo demás, Boscovich considera que los daños de las ventanas o los arquivates de los muros cortos no tenían más importancia. Sí estudia con más detalle los de las escaleras que permiten acceder al corredor de la biblioteca. El desplome del muro de fachada colindante a la escalera, medido por la parte interior, era de fl de pulgadas en 12 pies (2 cm en 3,8 m), mayor en la parte alta que en la base. Medido por la parte exterior era de 2 pulgadas en la más dañada y de 1 en la otra para 35 pies (5 y 2,5 cm en 11 m). Este desplome había partido en dos la escalera, separando la parte adosada a las contrapilastras de las columnas intermedias, de la adosada al muro de fachada. Sin embargo, los daños no habían evolucionado como pudo observar al comprobar que unos círculos dibujados sobre las grietas tres o cuatro años antes no se habían dilatado. Por último, también se tomaron niveles en el suelo del corredor alto que, en contra de lo que podría suponerse, estaba inclinado hacia la parte interior de la biblioteca.

Los daños en la zona central

Boscovich observó una pequeña fisura central en el tramo de bóveda situado entre la cúpula y las escale-

ras, fisuras que también aparecían en las ventanas próximas y llegaban a atravesar el grosor del muro.

Después, en el pavimento situado inmediatamente por debajo de la cúpula se podía ver claramente la separación de los ábsides respecto al resto del edificio. Es decir, las losas estaban separadas en la prolongación de los muros longitudinales, pero sin elevaciones ni descensos de unas zonas respecto a otras.

Por lo que se refiere a la cúpula, Boscovich pudo examinarla adecuadamente gracias a los andamios colocados bajo ella, que también le permitieron observar el estado de los arcos torales. Las grietas más importantes de la cúpula se correspondían precisamente con el encuentro de los ábsides y los muros longitudinales, siendo muy visibles sobre las ventanas ovales de los ángulos. Estas cuatro ventanas no tenían ningún arco por encima, pero las piedras de la zona que correspondería a la clave amenazaban con caer. En cuanto a los arcos torales estaban bastante dañados y sus grietas se prolongaban por la cúpula. También estaban dañados los arcos situados sobre las ventanas del muro de los ábsides, sobre todo el que soportaba los caballos de la fachada.

Además de las grietas, Boscovich descubrió que en algunas había estucos e incluso cartón pegado sobre ellas en un estado perfecto. Sólo en un caso el estuco se había fisurado, posiblemente al secarse, pero no había indicios de descensos relativos entre las partes.

También habla de la calidad de la construcción de la cúpula, bastante mala, porque se había hecho con

ladrillos muy separados entre sí. Lo mismo se podía decir de los arcos torales, de poco espesor y sin un sobarco en la parte superior de la cúpula.

Para terminar Boscovich inspeccionó la cubierta de madera y el trasdós de las bóvedas. En los tramos longitudinales el madero horizontal forma parte de la bóveda y también hay elementos de hierro verticales de atirantado. En cuanto al trasdós de la cúpula, se veían las grietas diagonales correspondientes a las de los ábsides en su encuentro con los muros. Aquí la cubierta de madera, que carece de tirantes, se apoya sobre la cúpula y sobre el muro perimetral, que a su vez transmite el empuje sobre los arcos torales y los ábsides.

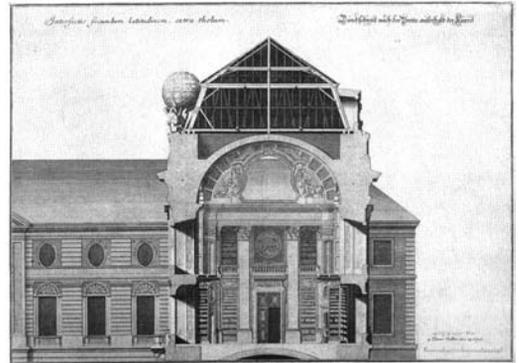


Figura 6.

Sección transversal por la bóveda de cañón lateral en 1737 según Kleiner (Sedlmayr, 1976)

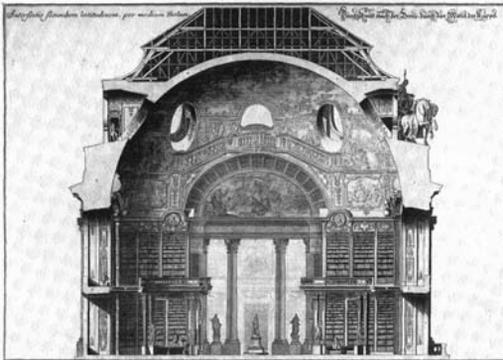


Figura 5.

Sección transversal por la cúpula oval de la Biblioteca Cesarea de Viena en 1737 según Kleiner (Sedlmayr, 1976)

EL SISTEMA GENERAL DE LOS MOVIMIENTOS

Boscovich dedica un apartado a relacionar los daños descritos. Es decir, éstos se producen como consecuencia de ciertos movimientos de la estructura. Así, los ábsides habían permanecido intactos pero se habían desplomado hacia fuera separándose del resto del edificio y arrastrando consigo a la cúpula y al tramo de bóveda más próximo a ella. Por su parte, los muros longitudinales también se habían desplomado, pero menos.

En cuanto a los ábsides, el desplome podría haberse producido acompañado de una inclinación de la base horizontal o de una compresión del muro en

la base de su cara exterior, permaneciendo dicha base perfectamente horizontal. La inclinación de esta base era difícil de medir porque los niveles, dice, no valen para distancias largas, como sí el hilo y la plomada.

También había observado Boscovich que el muro de los ábsides parecía curvado además de desplomado. Pero lo atribuye a un error de construcción o a una posible compresión de la fábrica.⁹ La grieta de separación se reducía en las partes altas porque los muros longitudinales se habían desplomado más en esa zona, esto es, se habían curvado en sentido contrario que los ábsides.

Por último, las escaleras habían cedido por el empuje de la bóveda y por el desplome del muro exterior. La inclinación hacia dentro del pavimento del corredor se explicaba porque trabajaba en voladizo.

Los daños no habían progresado como mostraban los estucos y cartón de papel intactos, o los círculos dibujados sobre las grietas del muro en la proximidad de la escalera, que no habían incrementado su diámetro. Los de la escalera sí habían evolucionado al quedar separado el muro interior del exterior y, por tanto, debilitado, pero eran locales.

LA CAUSA DE LOS DAÑOS

La causa principal de los daños es «aquella, que ciertamente yo creo, ha sido la causa de todos los daños de la cúpula de San Pedro de Roma, esto es, el empuje lateral de esa cúpula»,¹⁰ incrementado en este caso por el que produce la cubierta de madera sin tirantes.¹¹

Boscovich explica que la mayor parte del empuje se estaba transmitiendo según la dirección del eje menor de la cúpula, es decir, sobre los brazos de la biblioteca, pero al encontrarse con las bóvedas y la cubierta laterales quedaba suficientemente contrarrestado. El empuje restante actuaba contra los muros de los ábsides empujándolos hacia fuera, ya que apenas había conexión entre la fábrica de los muros nuevos y los viejos que pudiera impedir el desplome.¹² Además la cúpula carece de contrafuertes, está perforada por muchas ventanas y su construcción es de mala calidad.¹³ Por otro lado, los muros desde el nivel del suelo de la biblioteca hacia arriba son demasiado esbeltos para soportarla y los arcos torales tenían un espesor insuficiente.

De este modo, los daños de la propia cúpula procedían de la dilatación de su perímetro por la inclinación de los ábsides y por eso se habían producido grietas, sobre todo en los ángulos. La dilatación afectaba también a los arcos torales o de las embocaduras de las bóvedas de las naves.

Causas secundarias de los daños

Entre las causas secundarias de los desplomes de los ábsides podría estar el agua que caía al terreno desde la cubierta, que habría ablandado éste provocando una compresión diferencial en las proximidades del perímetro de los muros. También podría haber ocurrido que, en lugar de inclinarse la base de los muros, ésta se hubiera mantenido horizontal y el agua hubiera ayudado a la fábrica del muro a comprimirse en su cara exterior.

Por lo que al desplome de los muros longitudinales se refiere éste habría sido efecto del primer asiento de la fábrica que después se habría detenido. Prueba de ello era la ausencia de agrietamientos considerables en la bóveda de los brazos de la biblioteca. Por otra parte, sólo se habían medido los desplomes en una de las fachadas, pero como la escalera del lado de la entrada estaba intacta, Boscovich deduce que el muro opuesto no se había desplomado. La explicación de esta asimetría en los desplomes estaría en el humedecimiento del terreno en el borde del muro trasero a causa de un conducto de agua que corría paralelo a él.¹⁴ Por último, las escaleras de la parte opuesta a la entrada se habían agrietado al ceder tanto el muro interior que Boscovich llama maestro como el de la fachada, cedimiento producido en parte por el empuje de la bóveda central y en parte por su proximidad a los ábsides.¹⁵

Para Boscovich quedaba demostrado así que no eran las obras recientes en la parte trasera las que habían agravado los daños, pues en la fachada de la entrada no se había producido ninguna alteración del terreno y el ábside se había desplomado igual que su simétrico. Si los daños se habían hecho más patentes en esa época era por alguna causa accidental, un disparo de cañón, un trueno, un terremoto o un golpe de viento, que una vez «perdido el equilibrio hacen crecer de un golpe los movimientos hasta que son frenados por una mayor resistencia.»¹⁶

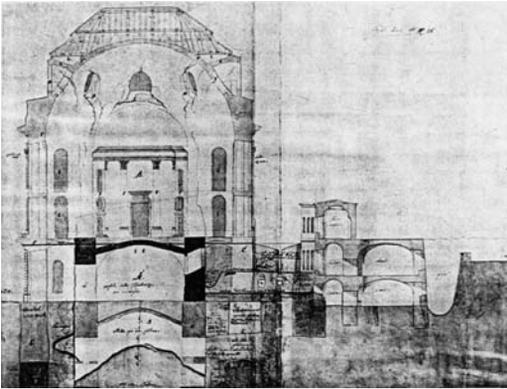


Figura 7.
Sección de la cúpula con los daños existentes en 1763 según N. Paccassi (Buchowiecki, 1957)

LOS REMEDIOS

En primer lugar, Boscovich dice que no era necesario demoler la cúpula ya que no se hallaba en un peligro de ruina inminente. Por tanto, los remedios a adoptar tendrían como fin «conservar fortalecido al enfermo sin destruirlo.»¹⁷

Zunchos

El refuerzo debía hacerse fundamentalmente en la zona de la cúpula, cuyo empuje era la causa principal de los daños, es decir, mantener unidos los ábsides para que no aumentase la separación entre ellos. Habría que colocar pues, varios tirantes y zunchos ovales de hierro, que ya habían sido propuestos por algunos para esta cúpula. También menciona los zunchos colocados por Poleni en la cúpula de San Pedro con la misma finalidad.¹⁸

El siguiente paso es concretar la sección de los tirantes y los zunchos, su localización y la forma de tensorlos.

La sección

Tanto los tirantes como los zunchos debían tener una sección rectangular de 2 fi ~ 3 fi en pulgadas≈ (6,6 ~ 9,2 en cm≈) o al menos de 2 ~ 3.

La localización

Los tirantes se colocarían bajo el pavimento de la biblioteca entre los ábsides, dos en cada dirección de pilastra a pilastra. Después se colocarían otros cuatro tirantes en el remate de los muros que soportan la cúpula, para que no se vieran por el interior ni debilitasen los muros de los ábsides.¹⁹

En cuanto a los zunchos ovales serían dos, uno en la imposta de la cúpula en la posición más baja posible bajo las ventanas y otro sobre éstas. Sobre todo en el caso del zuncho más alto recomienda hacer una incisión en la fábrica de forma triangular para que el zuncho se apoyase y pudiera hacer fuerza, a la izquierda de la figura 8.²⁰

Detalles de los tirantes y zunchos

Tanto los tirantes como los zunchos habrían de prepararse a base de piezas más cortas. Al hablar de cómo reproducir la forma oval describe como se consiguió una circunferencia perfecta en los zunchos de la cúpula de San Pedro. Cada una de las piezas se elaboró en un horno de fundición donde se les dio su forma aproximada. Después se dibujaron sobre el pavimento de la gran plaza de Bernini las circunferencias correspondientes a los diversos niveles de la cúpula donde habrían de ser colocados los zunchos. Replanteando las piezas sobre cada circunferencia y con la ayuda de un pequeño horno provisional colocado al lado de la plaza se les dio la curvatura exacta.

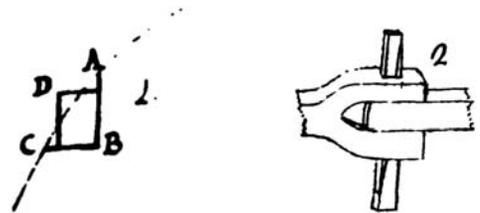


Figura 8.
Detalle de la incisión triangular a realizar en la fábrica de la cúpula de la Biblioteca Cesarea de Viena para la colocación de los zunchos y detalle del empalme de las piezas (Boscovich, 1763)

En cuanto al empalme de las piezas Boscovich propone el que Vanvitelli empleó en los zunchos de la cúpula de San Pedro, a la derecha de la figura 8. Las cuñas que atraviesan los orificios de los extremos se golpeaban hasta que empezaba a romperse la fábrica próxima. Realizando esta operación en cuatro empalmes del perímetro o en todos simultáneamente se conseguía una tensión inicial en los zunchos que no se lograba alcanzar con los empalmes usados en Viena.

Este tipo de empalme también se podía emplear en los extremos de los tirantes. Las cuñas tendrían que ser largas, anchas y gruesas para hacer toda la fuerza posible contra el muro.

Las herramientas

Boscovich también recomienda el tipo de herramientas a utilizar para la colocación de los elementos metálicos. Con el fin de no perturbar demasiado la fábrica las perforaciones debían hacerse con trépano en lugar de con cincel, y para esculpir la incisión triangular de los zunchos se utilizaría una pequeña sierra. En este caso también habría que perforar la fábrica por debajo para hacer sitio a las cuñas transversales de los empalmes, aunque sin hacer agujeros demasiados profundos.²¹

Refuerzo de los arcos torales

Boscovich juzga oportuna la propuesta de reforzar los arcos torales por el intradós, lo que llevaba consigo la construcción de pilastras para sostener el refuerzo. Estas pilastras habían de continuarse por el nivel de la entrada y cimentarlos al mismo nivel que los antiguos muros.

En cuanto al material del refuerzo era indiferente que se hiciera de piedra o ladrillo, el caso es que tuviera una dimensión adecuada y estuviera bien construido. Después del inevitable asiento habría que acuar bien los espacios intersticiales entre el refuerzo y los arcos.

Además habría que colocar un tirante a un tercio de la altura de los arcos desde el arranque, que debería atravesar los muros laterales sin dañar demasiado la fábrica. Ni éste tirante ni el refuerzo cree que perjudicarían la estética, es más, reforzarían la estructura en una zona especialmente sobrecargada.



Figura 9. Interior de la Biblioteca Cesarea de Viena, con la cúpula oval en primer plano (Lorenz, 1992)

Otros refuerzos

Boscovich también indica cómo reforzar el edificio en otras zonas menos importantes. Así, en la ventana que soportaba los caballos de la fachada aconseja o bien reforzarlo con gruesas barras de hierro en la clave o volver a hacer el arco con mayor grosor apuntalando temporalmente el peso de los caballos.

En cuanto a las ventanas ovales de la cúpula situadas en las diagonales no recomienda cegarlas ya que eso provocaría más perjuicios que beneficios. Como la fábrica nueva no ligaría bien con la vieja y su plano está inclinado habría que sostener la nueva en lugar de ayudar ella a soportar la vieja. Tampoco serviría de mucho construir un arco sobre ellas porque al no ser planos transmitirían mal la carga de la fábrica ya disgregada por encima, careciendo además del contrarresto adecuado por la parte inferior. En lugar de esto también habría que colocar barras de hierro

en la parte alta que sostendrían una especie de parrilla. Sobre ella se apoyaría la fábrica superior.

Para reforzar las escaleras Boscovich prescribe la colocación de un tirante que atravese la biblioteca de parte a parte y llegase hasta el muro exterior, con cuñas de tensado tanto sobre el muro exterior como el interior de la escalera. Además, en la escalera más dañada se colocaría un tirante más corto en la base para estabilizarla.

Por último, en la zona de los arquitrabes rotos de los extremos recomienda rehacerlos introduciendo un alma de hierro que se empotrara bien en los bordes y ayudase a contener el peso superior.



Figura 10. Interior de la cúpula oval con los frescos de Gran (Toman, 2004)

El control de los daños

Después de hacer todos estos refuerzos se podrían estucar todas las grietas de la cúpula y rehacer las pinturas, utilizando en lugar de los andamios que había, otros móviles más ligeros como los empleados en la basílica de San Pedro de Roma.

Otra alternativa era observar los daños durante dos o tres años antes de reparar las pinturas. Boscovich pondría varios testigos de mármol en cola de milano a través de las grietas y diferentes alturas. No le parecen tan recomendables los cartones encolados porque no son sensibles ante un movimiento muy pequeño, es decir, se deforman pero no se rompen como el mármol.

Ahora bien, si llegara a producirse una nueva grieta no cree que hubiera que asustarse. Podría ser debida a que los zunchos y tirantes colocados se dilatan hasta alcanzar una cierta tensión sobre todo si no se han pretensado bien. De todos modos, con los testigos de mármol se mediría la anchura de la grieta y su crecimiento. Si éste se produjera habría que hacer nuevos refuerzos pero sin temor a la ruina porque los tirantes y los zunchos tardan tiempo en romperse. Los refuerzos podrían consistir en:

- 1º Levantar la cubierta de la cúpula y cubrirla de plomo o cobre, cuidando de que las aguas de las cubiertas adyacentes no vertieran sobre esta zona. Eso reduciría mucho el empuje.
- 2º Si eso no bastase, construiría dos gruesos muros inclinados en los extremos de los ábsides, desde los cimientos hasta arriba. Y, si asentarán esos ábsides, haría más profunda su cimentación.

Pero Boscovich no creía necesario realizar estas operaciones, bastaba con los tirantes y los zunchos recomendados, que se podían colocar sin retirar los libros.

CONCLUSIÓN

La teoría científica de cúpulas se desarrolla fundamentalmente en el s. XVIII en un contexto práctico, es decir, con motivo de la publicación de informes de expertos sobre cúpulas de especial relevancia como la cúpula de San Pedro de Roma, Santa Genoveva de París o menos conocidas como la de la Biblioteca Cesarea de Viena.

Boscovich, científico de gran importancia en su época por sus aportaciones en diversos campos del saber, también ocupa un lugar de honor en el desarrollo de esa teoría. Su principal aportación es el análisis de la estabilidad de la cúpula de San Pedro de Roma, donde, junto a Le Seur y Jacquier, se aplicó por primera vez el principio de los Trabajos Virtuales al cálculo de una estructura real. Los informes posteriores de Boscovich, en solitario, confirman el papel protagonista de Boscovich en el *Parere*. En el de 1763, sobre la Biblioteca Cesarea de Viena, donde colabora con el arquitecto Paccassi, en calidad de matemático, demuestra un profundo conocimiento

práctico sobre las estructuras de fábrica. La ausencia de cálculos matemáticos es reflejo de la prioridad de la práctica sobre la teoría propia de la época, reflejada en la intervención de Poleni (1748) sobre la cúpula vaticana, que en todo momento reconoce dicha supremacía y, a pesar de confirmar la estabilidad de la cúpula, ordena colocar zunchos de refuerzo. El caso de la cúpula de San Pedro está presente durante toda la segunda mitad del siglo XVIII, y también en el informe sobre la Biblioteca Cesarea, incluso en las medidas de refuerzo, como la colocación y detalle de los zunchos que propone Boscovich.

Dos años más tarde, el mismo Boscovich deberá enfrentarse a un nuevo problema: la construcción de la aguja de remate sobre la cúpula del Tiburio de Milán. El enfoque aquí era diferente, puesto que se trataba de prever el comportamiento futuro de la cúpula cargada con el peso de la aguja y no de interpretar los daños y reforzar una ya existente. Boscovich realizará de nuevo un estudio de gran interés, donde incluye los cálculos matemáticos resultantes de aplicar

el principio de los trabajos virtuales a un posible mecanismo de colapso de la cúpula por deslizamiento hacia dentro de la aguja. Además, expone con gran claridad su teoría sobre bóvedas y cúpulas, adelantándose a Coulomb en el cálculo de la situación más desfavorable de las juntas de rotura.²²

Los tres informes de Boscovich representan verdaderos hitos en el desarrollo de la teoría de cúpulas y confirman el papel de los informes periciales como fuente principal de conocimiento sobre este tipo particular de estructuras de fábrica.

NOTAS

Gema M. López Manzanares es Profesora Titular en el Área de Construcciones Arquitectónicas. Estructuras de Edificación, Universidad de Alcalá de Henares

1. Boscovich (1763, fol. 2r, art. 2). Agradezco al Profesor D. Santiago Huerta Fernández, de la ETS Arquitectura de Madrid y director de mi tesis doctoral, la información relativa a la existencia del informe sobre la cúpula de la Biblioteca Cesarea de Viena escrito por Boscovich. Sobre cúpulas de fábrica ovales ver Huerta (1990, 2002, 2004) y Huerta y López (2001).
2. Al comienzo del informe Boscovich (1763, fol. 2r, art. 1) habla de que ha realizado numerosas visitas al edificio, ha leído los diversos informes emitidos y recogido información verbal. También explica que ha estudiado los planos del edificio y que ha hecho medir desplomes y niveles.
3. Hemos deducido las medidas de las figuras que llevan una escala gráfica en pies. Según Parsons ([1939] 1976, 628), el pie en Viena equivalía a 0,3161 m.
4. Boscovich (1763, fol. 3v, art. 21). Según Parsons ([1939] 1976, 628), la pulgada, que es la doceava parte del pie, será igual a 2,6 cm.
5. Boscovich (1763, fol. 4r, art.28 y fol. 6r, art.46).
6. Boscovich (1763, fol. 4r, art. 28). El agravamiento de los daños coincidió al parecer con movimientos en el terreno próximo y algunos atribuían a esto la causa de su aparición.
7. Boscovich (1763, fol. 3r, art. 12) dice que en la grieta de la entrada, donde se bifurca en dos, la fábrica sí ha descendido pero por falta de apoyo lateral, no porque el muro nuevo haya descendido respecto al viejo.
8. Según dice Boscovich (1763, fol. 3r, art. 15) tenía dos tablas con los resultados de la medición de los desplomes. Una de ellas se elaboró con más precisión para comprobar si, como le había parecido a simple vista, una de las pilastras del ábside se había curvado además de desplomarse hacia fuera.



Figura 11. Detalle de la entrada principal de la Biblioteca Cesarea (Lorenz, 1992)

9. Boscovich (1763, fol. 5r, art. 36) habla de la compresión de las fábricas que no se pueden realmente considerar como elementos rígidos e inflexibles: «...y como la fuerza elástica crece con la compresión y la dilatación, los males no siguen creciendo y con frecuencia se detienen por sí mismos después de los primeros movimientos.» (...e come la forza elastica cresce colla compressione, e dilatazione; i mali non sieguono sempre a crescere, e spesso si arrestano da se dopo i primi movimenti).
10. «...quella, che certamente io credo, essere stata la cagione di tutti i danni della cupola di S. Pietro di Roma, cioè la spinta laterale di essa cupola.» Boscovich (1763, fol. 7r, art. 52).
11. Según Boscovich (1763, fol. 7r, arts. 52-3), la elevada flecha de las cúpulas impide colocar esos elementos de contrarresto horizontal a no ser que se eleven los muros laterales hasta la altura de la clave. Por esa razón las cúpulas no se suelen recubrir con tejados sino con plomo o cobre. Además, la existencia de un tejado con fuerte pendiente incrementa la acción del viento, que según el autor, puede provocar deformaciones asimétricas y separar los apoyos de manera que la cúpula descienda aumentando el empuje y el agrietamiento.
12. Según Boscovich (1763, fol. 7r, art. 54), aunque ese empuje también actúa contra el extremo del muro longitudinal éste se desploma menos que los ábsides porque la bóveda de los brazos y la cubierta ayuda a contrarrestarlo.
13. Boscovich (1763, fol. 8r, art. 57) señala que no se ha cuidado la ligazón entre los ladrillos de la cúpula, demasiado delgados.
14. Al parecer en esta zona la cimentación estaba socavada pero en una zona muy pequeña que el resto de la fábrica era capaz de sostener. Boscovich (1763, fol. 6, arts. 48-9).
15. La ventana superior del ábside de la entrada estaba agrietada por el gran tamaño de los caballos que tenía que soportar y los arquivitres de los extremos también se habían fracturado por el excesivo peso. Boscovich (1763, fol. 7v, arts. 59 y 61).
16. «...tolto l' equilibrio, fanno crescere tutto in un tratto i movimenti, finche sieno arrestati da qualche maggiore resistenza.» Boscovich (1763, fol. 6r, art. 46). No había descensos relativos como hubieran debido producirse por un desplazamiento lateral del terreno bajo la cimentación. Tampoco influye la menor profundidad de los nuevos cimientos ya que se fía del saber del arquitecto.
17. «...conservare fortificato l' inferno senza distruggerlo.» Boscovich (1763, fol. 8r, art. 63). Prueba de que la cúpula no corría peligro es que no estaba realmente apuntalada y que los tirantes estaban densados.
18. Resulta interesante conocer la opinión de Boscovich acerca de la intervención de Poleni en la cúpula de San Pedro. Según él, Poleni negó en un principio que fuera el empuje el causante de los daños por motivos políticos, pero cuando hubo inspeccionado la cúpula no tuvo más remedio que prescribir la colocación de zunchos para frenarlo, incluso aunque esto disgustase a los que defendían la estabilidad de la cúpula. Boscovich destaca el hecho de que, cuando Poleni ya había impreso los libros de su *Memorie* se descubriera roto uno de los antiguos zunchos, que hubo que reemplazar. También dice que desde 1748 hasta su partida de Roma, quince años después, se siguieron produciendo movimientos en la cúpula. Boscovich (1763, fol. 8, art. 67).
19. Se refiere a un plano de otro experto y nombra las pilastras entre las que se colocarían los tirantes respecto a él. No hemos podido consultar dicho plano.
20. Recomienda que no sea muy profunda para no dañar la fábrica. Boscovich (1763, fol. 8v, art. 72).
21. Boscovich (1763, fol. 9r, art. 75).
22. Sobre el desarrollo de la teoría de cúpulas, ver Huerta (1990, 2004) y López (1998, 1998b, 2001).

LISTA DE REFERENCIAS

- «Boscovich». En *Enciclopedia universal ilustrada europeo-americana*, 225–227. Madrid: Espasa-Calpe, 1991.
- Boscovich, R. G. 1763. «Scrittura sulli danni osservati nell' edificio della Biblioteca Cesarea di Vienna e loro riparazione, composta in esecuzione de' Sovrani commandi di Sua Maestà l' Imperatrice Regina Maria Teresa, e umiliata a' suoi piedi.» MS., cod. n.º 13989, Österreichischen Nationalbibliothek, Viena, 10 fols., 2 figs.
- Boscovich, R. G. 1765. «Sentimento sulla solidità della nuova Guglia del Duomo di Milano o si consideri in se stessa, o rispetto al rimanente del vasto Tempio, esposto a richiesta del Nobilissimo e Vigilantissimo Capitolo que soprintende alla sua grande fabbrica». En *Relazione dei restauri intrapresi alla gran guglia del Duomo di Milano*, de A. Nava, 53–64. Milán: Tipografía Valentini E.C., 1845.
- Boscovich, R. G.; F. Jacquier y T. Le Seur. 1743. *Parere di tre Matematici sopra i danni che si sono trovati nella Cupola di S. Pietro sul fine dell' anno 1742*. Roma: s.l.
- Buchowiecki, Walther. 1957. *Der Barockbau der ehemaligen Hofbibliothek in Wien, ein Werk J.B. Fischers von Erlach*. Wien: George Prachner Verlag.
- Huerta Fernández, Santiago. 1990. *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España, ca. 1500–ca. 1800*. Tesis doctoral. Madrid: ETS Arquitectura, UPM.
- Huerta Fernández, Santiago. 2002. *Informe sobre la estabilidad de la cúpula interior de la Basílica de los Desamparados de Valencia*. Departamento de Estructuras de la ETSAM. Generalitat Valenciana. Conselleria de Cultura, Educació i Ciencia. Direcció General de Promoció Cultural y Patrimonio Artístico.

- Huerta Fernández, Santiago. 2004. *Arcos, bóvedas y cúpulas*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Huerta Fernández, S. y G. López Manzanares. 2001. *Estudios estructurales previos a la restauración de la iglesia de Santo Tomás de Villanueva («La Mantería») de Zaragoza*. Departamento de Estructuras de la ETSAM. Instituto de Patrimonio Histórico Español.
- Kleiner, S. 1724–1737. *Vera et accurata delineatio . . .*, 4 Bde. Augsburg.
- López Manzanares, Gema M. 1998. *Estabilidad y construcción de cúpulas de fábrica: El nacimiento de la teoría y su relación con la práctica*. Tesis doctoral dirigida por D. Santiago Huerta Fernández. Madrid: ETS Arquitectura, UPM.
- López Manzanares, Gema M. 1998b. La estabilidad de la cúpula de S. Pedro: el informe de los tres matemáticos. En *Actas del Segundo Congreso Nacional de Historia de la construcción*, 285–294. Madrid: CEHOPU, Instituto Juan de Herrera, Universidade da Coruña.
- López Manzanares, Gema M. 2001. Teoría de estructuras y restauración en el s. XVIII: la cúpula de S. Pedro de Roma. *Obra Pública: Ingeniería y Territorio* 3, 57: 48–59.
- Lorenz, Hellmut. 1992. *Johann Bernhard Fischer von Erlach*. Zürich: Artemis Verlag-AG.
- Naredi-Rainer, Paul. 1993. Johann Bernhard Fischer von Erlach und Johann Joseph Fux. Beziehungen zwischen Architektur und Musik im österreichischen Barock. *Kunst-historisches Jahrbuch*, 275–290.
- Parsons, W. B. [1939] 1976. *Engineers and Engineering in the Renaissance*. Cambridge, Mass.: MIT Press.
- Poleni, G. 1748. *Memorie istoriche della gran cupola del tempio vaticano*. Padua: Stamperia del Seminario.
- Sedlmayr, Hans. 1976. *Johann Bernhard Fischer von Erlach*. Viena: Herold Durek.
- Teichl, Robert. 1949. *Die Rettung des Prunksaales der Wiener Hofbibliothek durch Nicolas v. Paccassi*. Wien, 615–626.
- Toman, Rolf, ed. 2004. *El Barroco. Arquitectura, Escultura y Pintura*. Barcelona: Könemann.