

Forma, construcción y estabilidad del cimborrio de la Seo de Zaragoza

Paula Fuentes
Javier Ibáñez
Luis Franco
Mariano Pemán
Santiago Huerta

Las obras de ampliación emprendidas en la catedral de Zaragoza en 1490 provocaron graves problemas estructurales a la vieja fábrica medieval. De hecho, la bóveda del segundo tramo de la antigua nave del Evangelio y uno de los pilares sobre los que se volteaba —aquel del que arrancaba el coro—, se vinieron abajo a comienzos de febrero de 1498, comprometiendo la supervivencia del cimborrio levantado por Mahoma Rami sobre la encrucijada del transepto entre 1403 y 1409. Las autoridades eclesiásticas convocaron una junta de maestros en 1500, y los profesionales reunidos, entre los que pudo encontrarse Enrique Egas, acordaron derribar el viejo cimborrio medieval. Sin embargo, el cimborrio no se tocó hasta comienzos del mes de noviembre de 1504, cuando Enrique Egas acudió a Zaragoza para ejecutar las decisiones tomadas en la reunión de maestros celebrada cuatro años antes.

Una vez acometidas, el maestro tuvo que abandonar Zaragoza para cumplir con sus compromisos profesionales con Fernando el Católico. No obstante, las obras siguieron su curso sin demasiadas complicaciones, lo que nos inclina a pensar que pudo dejar sentadas las bases para la construcción del nuevo lucernario. En todo caso, conviene advertir que su materialización última recaería en las manos de Juan Lucas Botero el Viejo, que lograría ejecutarlo desde la tradición constructiva local que utilizaba la rejola y el aljez —el ladrillo y el yeso— como materiales constructivos básicos, apoyándose en su propia experiencia profesional, en los consejos aportados por otros colegas consultados en algunos momentos pun-

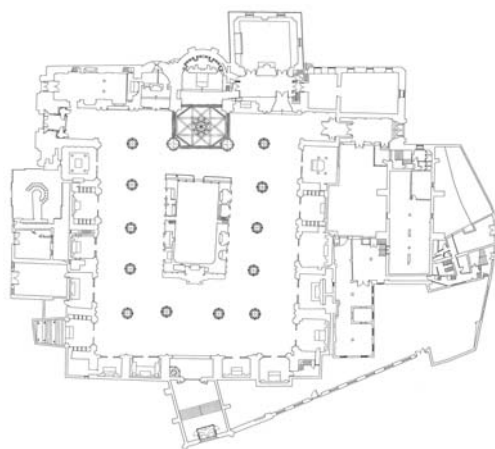


Figura 1
Planta de la Seo (dibujo de Francisco Fes)

tuales, pero también, en la observación y en la experimentación, que le llevarían a desarrollar una imaginativa —e inédita— solución estructural basada en la superposición de dos redes de arcos entrecruzados, que no se ultimaría hasta 1520.

Por todo ello, el cimborrio de la catedral de Zaragoza reflejaría la fusión de la larga tradición europea en la elevación de estructuras turriculares sobre los cruceros de los templos, que había sido reintroducida

en la Península Ibérica por maestros formados en el corazón del viejo continente como Simón de Colonia o Juan Guas, y que sería desarrollada por otros profesionales, como los hermanos Antón y Enrique Egas; con la tradición islámica, cuya huella cabría buscarla en la geometría —la scientia—, pero, sobre todo, en el ars, esto es, en la praxis constructiva, en la manera en la que se realizaron los trabajos y logró materializarse el proyecto (Ibáñez Fernández 2006; así como las revisiones planteadas en Ibáñez Fernández, 2009, e Ibáñez Fernández 2010). De este modo, tal y como ya señalara Lambert (1926), el cimborrio zaragozano y sus herederos inmediatos, los de las catedrales de Teruel y Tarazona, constituirían «la création la plus curieusement original de l'art hispanique, en la que s'est trouvée réalisée pour la dernière fois sous sa forme la plus complète cette synthèse de l'art chrétien occidental et de l'art islamique».

La traza de arcos entrecruzados del cimborrio es similar a las de la maqsura de la mezquita de Córdoba, aunque en este caso la planta es rectangular. El tambor octogonal, se cubre con una bóveda con ocho arcos apuntados que parten de los ángulos, dibujando otro octógono central en el que se eleva una linterna (figura 2). El origen y la forma geométrica de este tipo de bóvedas ha sido estudiado recientemente por uno de los autores (Fuentes 2009, 2010).

La linterna se cierra con una estructura exterior, levantada sobre una segunda red de arcos entrecruzados (figura 3). En este caso los arcos, partiendo de los vértices del mismo octógono, sólo se saltan un vértice, de manera que se obtiene un octógono más grande que el de la primera red de arcos, y aparece una gale-



Figura 2
Vista interior del cimborrio (Foto: P. Fuentes)



Figura 3
Red superior de arcos (Foto: P. Fuentes)

ría en la linterna. Este octógono define el giro de la linterna respecto del tambor (figura 4). Las claves colocadas en las intersecciones de los arcos evitan los complicados encuentros vistos en bóvedas anteriores.



Figura 4
Imagen exterior del cimborrio del Archivo Mas (Lambert 1926)

DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA

Las tareas de restauración realizadas por los arquitectos L. Franco y M. Pemán en la Seo de Zaragoza desde 1992 han llevado a un buen conocimiento de la geometría general de la Seo de Zaragoza (Franco y Pemán, 1999, 2000). Para el presente trabajo mediciones adicionales y dibujos han sido realizados por Francisco Fes. No obstante, con vistas al análisis de la estructura del cimborrio, se han tenido que hacer algunas suposiciones sobre la geometría que se explicarán a continuación. Estas suposiciones no afectan en gran medida a los resultados del análisis, sin embargo queda pendiente realizar un estudio más exhaustivo de la geometría de los nervios de la cúpula.

La planta del cimborrio no es exactamente un rectángulo, ya que los lados no son paralelos. Para el

análisis estructural se ha supuesto que la planta es un rectángulo.

Los nervios de la cúpula son arcos apuntados. La geometría de los arcos 1 (figura 6) se ha basado en la sección de Peropadre (1993). El resto de los arcos se han realizado con la misma curvatura. Esto crea ciertas incompatibilidades geométricas, es decir, que las directrices de los arcos no se cruzan en el espacio en todos los puntos de intersección (estos problemas de incompatibilidad geométrica de las cúpulas de arcos cruzados han sido estudiados por Fuentes y Huerta 2010). Al medir estas incompatibilidades se ha podido comprobar que no suponen más que un 3% de la luz de los arcos 3 y 4. Estas desviaciones de la geometría son del orden de los errores constructivos, por lo que se ha dado por válida esta hipótesis. De hecho existen ciertas imperfecciones geométricas en la intersección de los arcos, que se pueden observar desde arriba (Figura 7).

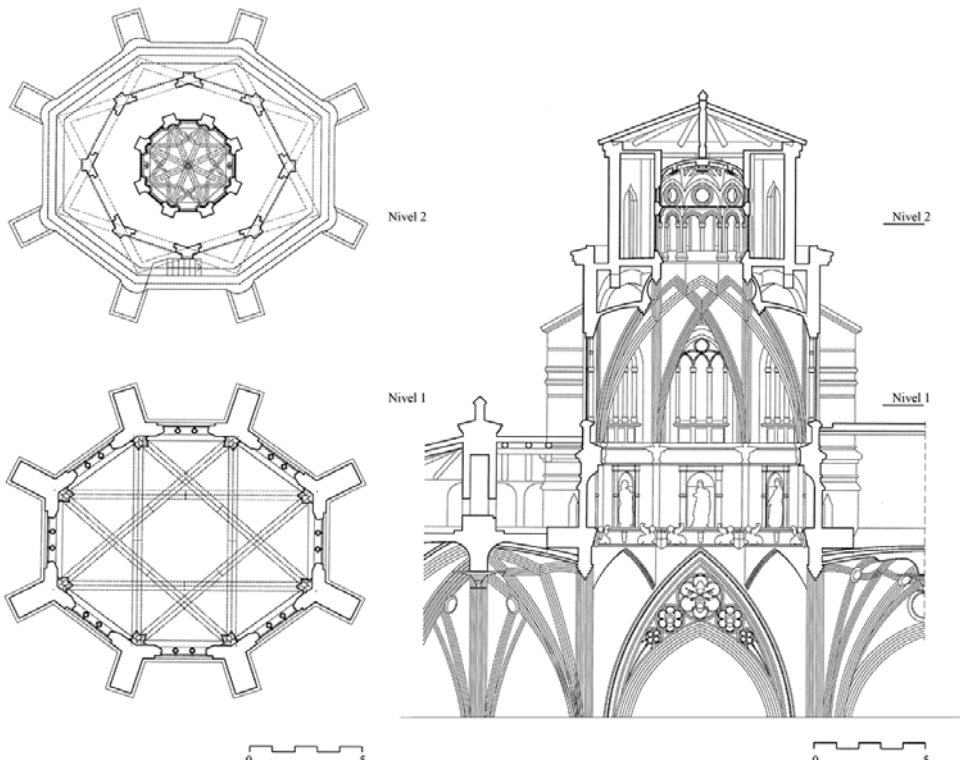


Figura 5
Planta y sección del cimborrio (dibujo de Francisco Fes)

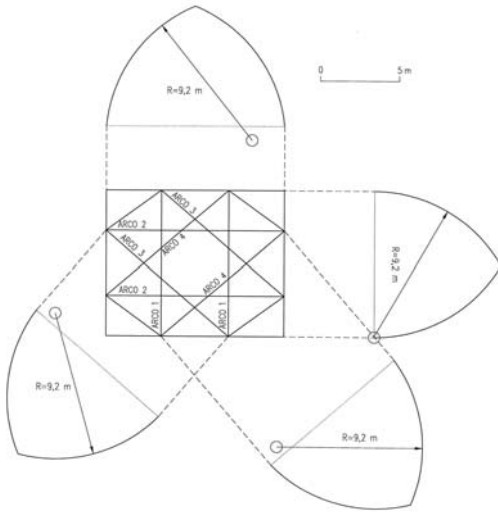


Figura 6 Geometría simplificada de los nervios de la cúpula (1ª red de arcos)



Figura 7 Vista de las intersecciones de los nervios de la parte superior del cimborrio (Foto: P. Fuentes)

Debido a la irregularidad de la planta, las claves de los arcos diagonales (3 y 4), no se encuentra en la mitad de la intersección con los otros arcos, sino que se desplaza hacia uno de los lados. Esta imperfección es inapreciable desde abajo, donde, al pintar el despiece, queda disimulada. Sin embargo sí que puede apreciarse desde arriba (figura 7).

Como hemos dicho, sobre el trasdós de esta cúpula se sitúa otra red de arcos. Estos arcos resultan difíciles de medir, por el espacio en el que se encuentran. Se han tomado in situ una serie de medidas como la flecha del arco y la distancia entre las intersecciones para poder dibujarlos. En la figura 8 se puede ver su geometría. La relación de los dos mallas de arcos puede verse en la figura 5.

El relleno de la bóveda se ha podido medir con respecto a la altura en la que se apoya el lucernario, suponiendo aproximadamente la mitad de la altura. Esto coincide con las reglas tradicionales de proyecto de las estructuras de fábrica (Huerta 2004).

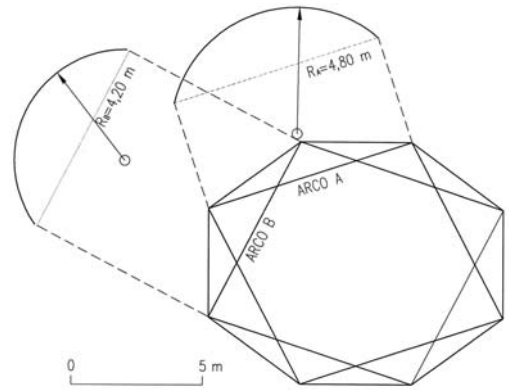


Figura 8 Geometría de la 2ª red de arcos

ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Esquema estructural

Para comprender mejor el sistema estructural del cimborrio se ha realizado un esquema con los distintos elementos, explicando cómo se apoyan unos en otros. El denominado volumen 1 (figura 9) apoya sobre la 1ª red de arcos. La plementería apoya también en estos arcos. El volumen 2, apoya en la segunda red de arcos. Todos los arcos empujan, a distintas alturas, sobre los estribos exteriores (figuras 9, 15).

Materiales e hipótesis de carga

Tanto la cúpula como los sistemas de contrarresto son de ladrillo. Para el ladrillo se ha considerado un

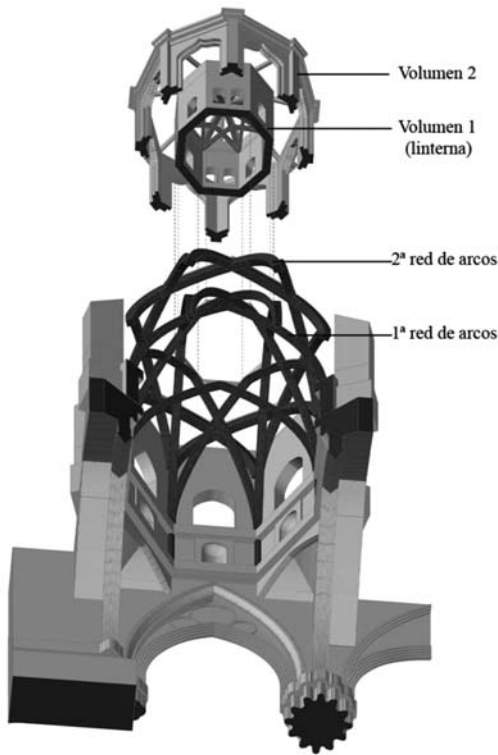


Figura 9
Esquema estructural del cimborrio (dibujo de Francisco Fes)

peso específico de 16 kN/m^3 . La plementería, también de ladrillo, es tabicada de dos hojas, y se ha tomado un peso propio de $0,8 \text{ kN/m}^2$. Para la cubierta de madera se ha tomado un valor de $1,5 \text{ kN/m}^2$. El peso de la plementería se reparte entre los ocho arcos, y, para facilitar el cálculo, se ha convertido en cargas puntuales. En cuanto al relleno, se ha tomado la hipótesis a favor de seguridad de que existe (de manera que sirve de vía para las fuerzas) pero no pesa. En la tabla 1 se dan algunos de los pesos utilizados para el análisis.

Marco teórico

Para realizar el estudio se ha aplicado la teoría del Análisis Límite de Estructuras de Fábrica, tal y como la ha desarrollado fundamentalmente Heyman en los últimos años (Heyman 1995; 1999).

Consideraremos la estructura formada por un material rígido-unilateral, que resiste compresiones pero no resiste tracciones. Es decir, imaginamos la fábrica como un conjunto de bloques indeformables en contacto seco y directo que se sostienen por su propio peso. Supondremos también que las tensiones son bajas, no habiendo peligro de fallo por resistencia, y que el rozamiento entre las piedras es suficientemente alto como para impedir su deslizamiento. Estas tres hipótesis dan lugar a los Principios del Análisis Límite de las Fábricas: la fábrica presenta una resistencia a compresión infinita, no resiste las tracciones y el fallo por deslizamiento es imposible.

Estas hipótesis nos llevan a que el problema de las estructuras de fábrica, no son las tensiones, sino el equilibrio. La condición de estabilidad de una fábrica que cumpla los principios anteriores exige que la trayectoria de las fuerzas, la «línea de empujes», esté contenida dentro de la estructura; esto es, para cada sección hipotética de la estructura la resultante de las fuerzas debe estar contenida en su interior; sólo de esta manera se puede conseguir un equilibrio en régimen de compresiones exclusivamente.

El Teorema de la Seguridad (del Límite Inferior) del Análisis Límite, nos dice que dada una estructura, si es posible encontrar una situación de equilibrio compatible con las cargas que no viole la condición de límite del material la estructura no colapsará. Aplicado a las fábricas esto quiere decir que si es posible dibujar un conjunto de líneas de empujes en equilibrio con las cargas contenida dentro de la estructura la estructura no se hundirá. La potencia del Teorema radica en que el conjunto de líneas de empujes, es decir, la situación de equilibrio, puede ser

| Elemento | Linterna (volumen 1) | Cubierta linterna | Volumen 2 | Cubierta madera red de arcos | Plementería entre la 1.ª | 1ª red de arcos | 2ª red de arcos | Estribo |
|-----------|----------------------|-------------------|-----------|------------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------|---------|
| Peso (kN) | 320 | 35,8 | 670 | 81,6 | 13,5 | 530 | 511 | 800 |

Tabla 1
Peso de los elementos utilizados para el análisis

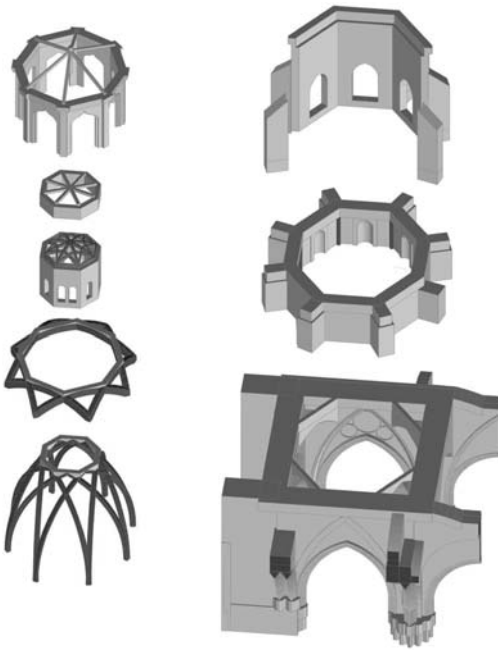


Figura 10
Despiece de los elementos (dibujo de Francisco Fes)

elegida libremente. Elegida una solución de equilibrio a compresión (sistema de líneas de empujes), podremos aplicar las condiciones de seguridad a cada una de las secciones y obtener, de esta forma, un límite inferior para el coeficiente de seguridad geométrico.

Este «enfoque del equilibrio», que se deduce del Teorema de la Seguridad, es la base de cualquier análisis de estructuras de fábrica. Este teorema constituye, en palabras del profesor Heyman (2001), «la roca sobre la que se cimenta hoy día toda la teoría del cálculo de estructuras». El enfoque del equilibrio está implícito en las reglas geométricas de los maestros antiguos y fue empleado por los grandes ingenieros de los siglos XVIII y XIX (Huerta 2004).

El cómo se manejen las ecuaciones de equilibrio (métodos gráficos, analíticos, programación lineal, cálculo manual o por ordenador, etc.) es irrelevante, pues no afecta a los principios básicos de la teoría (Huerta 2005, Heyman 2010).

Análisis de la bóveda

Analizamos por separado la primera red de arcos y la segunda, que como hemos dicho transmiten dos empujes al estribo. En todos los casos se ha dibujado la línea de mínimo empuje, o muy cercana a ella. Obtenemos así unos empujes menores para el estribo. Por otro lado, en el caso de que los estribos hubieran cedido ligeramente, al agrietarse los arcos, es esta línea la que tendríamos. Se ha analizado uno de los estribos (figura 15).

En los arcos de la primera red apoya el volumen 1 (la linterna). El peso calculado de este volumen es de 356 kN (incluida la cúpula de la linterna). Este peso

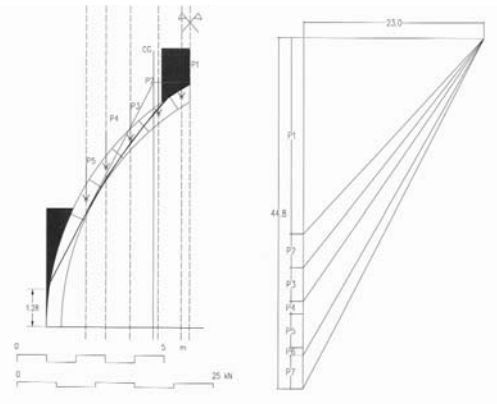


Figura 11
Línea de empujes del arco 1

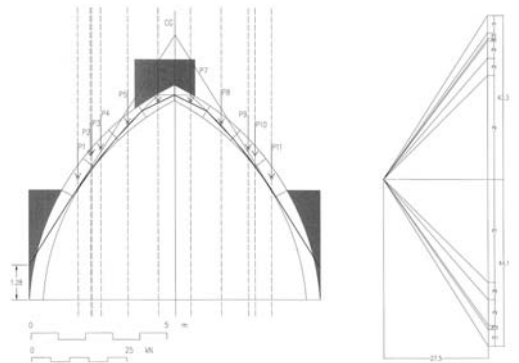


Figura 12
Línea de empujes de los arcos 3 y 4

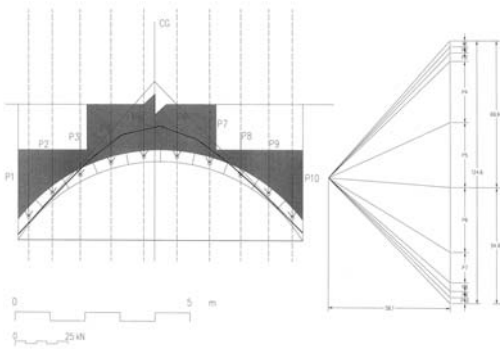


Figura 13
Línea de empujes de los arcos A

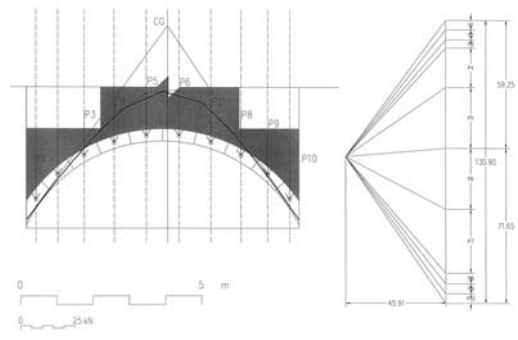


Figura 14
Línea de empujes de los arcos B

se reparte entre los ocho arcos, lo que supondría una carga de 44,5 kN por arco. Hemos supuesto una carga puntual en el centro de gravedad de las dos primeras dovelas para simplificar el cálculo. Sobre este arco apoya también parte de la plementería.

Como se puede observar en la figura 11, la línea de empujes sobresale del arco en la parte superior. Esto no supone ningún problema, puesto que tenemos el macizo de fábrica de la linterna. El peso total sobre el arco 1 (incluyendo el peso propio) es 89,6 kN (en la figura se ha dibujado la mitad del arco). El empuje obtenido es 23 kN.

En la figura 12 se ha dibujado la línea de empujes de los arcos 3 y 4 (el arco 4 es el simétrico del 3) El peso total sobre estos arcos es de 87,4 kN, y el empuje obtenido es de 27,5 kN.

En ambos casos se ha dibujado la línea de empujes partiendo de la misma altura (1,28 metros sobre la base del arco) para facilitar la composición de las fuerzas al llegar al estribo.

A continuación se plantea el análisis de la segunda red de arcos. En ella apoya el denominado volumen 2 (figura 9). Este volumen tiene un peso total de 752 kN (incluida la techumbre de madera). Si repartimos el peso entre los ocho arcos, les corresponden una carga de 94 kN. Tenemos cómo hemos visto dos arcos distintos, el A y el B (figura 8). Sobre ellos apoyan también unos muretes de fábrica de las enjutas (figura 3). El peso total del arco A es de 124,6 kN y el empuje es de 58,1 kN. El peso del arco B es de 130,9 kN, y el empuje es de 45,9 kN. De nuevo en estos arcos se aprovecha el macizo de fábrica superior para que la línea de empujes pueda

acomodarse fácilmente, sin suponer un empuje excesivo para el estribo.

Estabilidad de los estribos

El estribo es compuesto, como puede apreciarse en la foto de la figura 4 y en la figura 15, derecha. Los arcos de las ventanas descargan el peso del muro superior sobre la parte interior de los contrafuertes, de manera que puede suponerse, dada la ausencia de grietas, que todo el peso se moviliza para resistir los empujes de las dos redes de arcos (para un estudio detallado de la estabilidad de los estribos simples o compuestos, véase Huerta 2010). El peso total del estribo es de unos 800 kN (hay pequeñas diferencias entre unos estribos y otros por la irregularidad de la planta).

A cada estribo acometen cuatro arcos en distintas direcciones. En el estribo analizado acometen los arcos 1 y 3, de la 1ª red de arcos, y los arcos A y B de la 2ª red de arcos. Para realizar el cálculo, se descomponen los empujes de cada arco en dos componentes, una en la dirección del eje del estribo, y otra en la dirección perpendicular (Figura 15). Las fuerzas en el estribo se han recogido en la tabla 2.

| | <i>H (kN)</i> | <i>HX (kN)</i> | <i>HY (kN)</i> | <i>V (kN)</i> |
|--------|---------------|----------------|----------------|---------------|
| Arco A | 58,1 | 41,6 | 40,4 | 55 |
| Arco B | 45,9 | -36,8 | 27,4 | 71,6 |
| Arco 1 | 23 | 7,2 | 21,9 | 44,8 |
| Arco 3 | 27,5 | -13,9 | 23,7 | 43,3 |

Tabla 2
Fuerzas aplicadas en el estribo

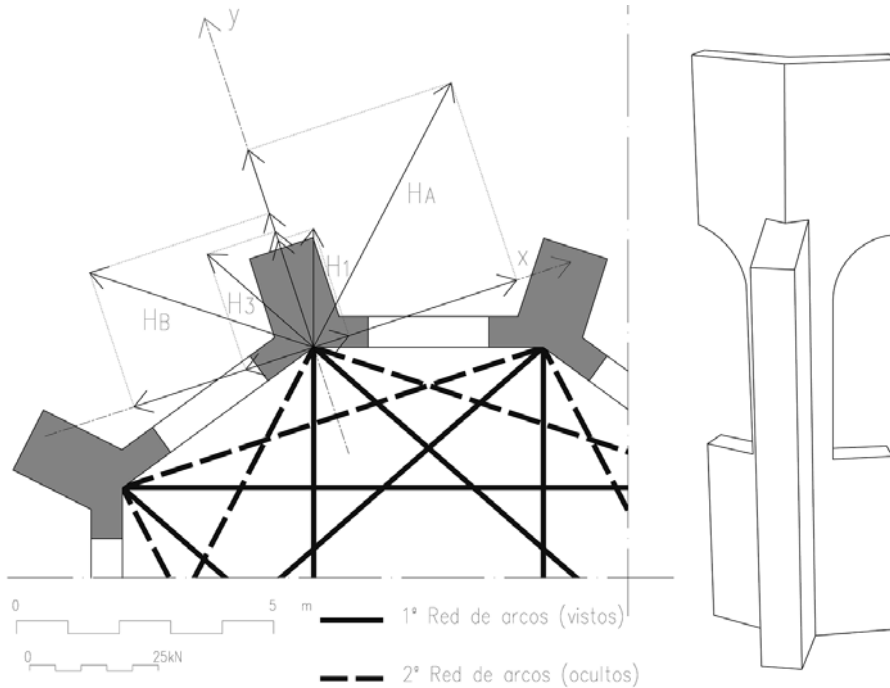


Figura 15
 Izquierda: Composición de las fuerzas en el estribo; derecha: Volumen considerado para el contrarresto

Para estimar la seguridad del estribo, comprobamos la estabilidad en las dos direcciones (figura 16):

Dirección x:

$$(H_{Ax} + H_{Bx}) \times 9,2 + (H_{1x} + H_{3x}) \times 6,3 = (V_A + V_B + V_1 + V_3) \times x$$

de donde, $x = 0,002 \text{ m} = 2 \text{ mm}$. La desviación en sentido del eje x es inapreciable.

La resultante se desplaza menos de 2 mm debido a la componente de las fuerzas en la dirección perpendicular al muro.

Dirección y:

$$(H_{Ay} + H_{By}) \times 9,2 + (H_{1y} + H_{3y}) \times 6,3 + P_e \times 0,47 = (V_A + V_B + V_1 + V_3 + P_e) \times y$$

de donde, $y = 1,26 \text{ m}$.

El coeficiente geométrico de seguridad se define como la relación entre la mitad del diámetro de la sección considerado (determinado por la dirección de vuelco) y la distancia del centro de empuje al centro de la sección (Huerta 2004, 106), figura 16. Mide la desviación de la resultante del centro de la sección. En el caso de los estribos su valor es mucho más restrictivo que en el de los arcos, pues se debe reducir lo más posible la inclinación del estribo, para evitar grandes incrementos de la luz de los arcos (Huerta 2010). Los valores usuales calculados en edificios existentes están por encima de 4, mientras que un valor usual para arcos y bóvedas es 2.

En este caso, $d = 2,30 \text{ m}$ y $c = (d/2) - y = 1,26 - 1,15 = 0,09$. El coeficiente geométrico de seguridad vale $(1,15/0,09) = 10,4$. Sabemos, por el Teorema de la Seguridad, que el estribo tiene una seguridad al menos de 10.

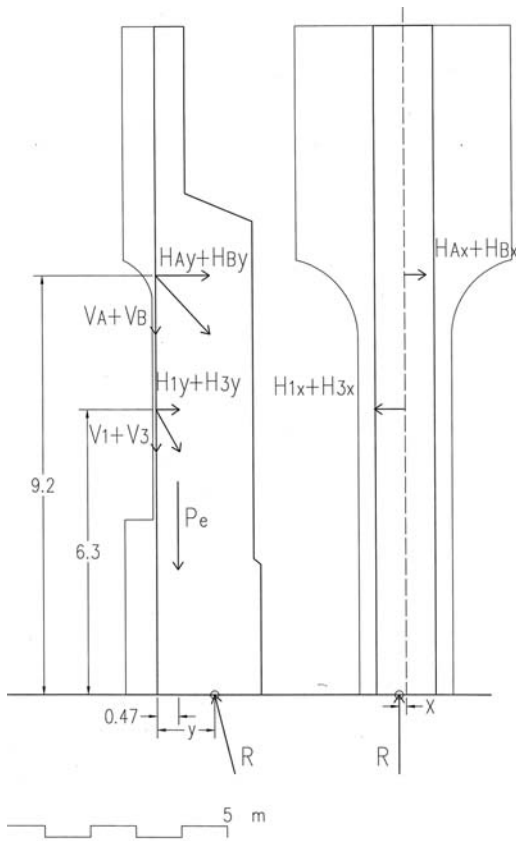


Figura 16
Composición de fuerzas en el estribo (izquierda: dirección y; derecha: dirección x)

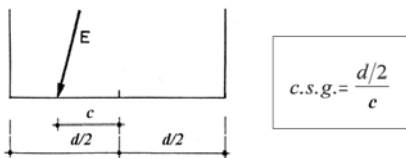


Figura 17
Coeficiente geométrico de seguridad en una sección de un estribo

CONCLUSIONES

El cimborrio de la catedral de Zaragoza supone un hito en la construcción de los cimborrios del siglo XVI. El sistema estructural con dos mallas de arcos en los que apoyan distintos elementos es una solución completamente original de la que, por lo que sabemos, no existe precedente alguno. El mismo Bote-ro empleó este sistema en el cimborrio de la Catedral de Tarazona, donde vuelven a aparecer al exterior dos prismas octogonales girados. Tras los múltiples fracasos de cimborrios, tanto en ésta como en otras catedrales, el cimborrio de Zaragoza tiene una gran seguridad, y marca un hito en la historia de la construcción abovedada. Este tipo se abandonó en España tras el siglo XVI, pero fue recuperado en el siglo XVII por Guarino Guarini que lo empleó en la iglesia de San Lorenzo de Turín y en numerosos proyectos no construidos.

LISTA DE REFERENCIAS

Pemán, Mariano y Luis Franco. Proyectos de restauración (1993-1998).

Pemán, Mariano y Luis Franco. 1999. «La Seo de Zaragoza, 20 años de reformas». *Ars Sacra*, n.º 9: 15-30.

Pemán, Mariano y Luis Franco. 2000. «Reconstruir la memoria: la restauración de la Seo de Zaragoza». En: *La Seo del Salvador, Zaragoza*, Librería General: 111-122.

Fuentes González, Paula. 2009. «Las cúpulas de arcos cruzados: origen y desarrollo de un tipo único de abovedamiento entre los siglos X-XVI». *Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Valencia, 21-24 de Octubre de 2009*. Madrid: Instituto Juan de Herrera: 511-522.

Fuentes González, Paula y Santiago Huerta. 2010. «Islamic domes of crossed-arches: Origin, geometry and structural behavior». En: *Arch' 10. 6th International Conference on Arch Bridges, 11-13, October, 2010*. Fuzhou, China: College of Civil Engineering: 346-353.

Heyman, Jacques 1995. *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Colección de ensayos*. Ed. por S. Huerta. Madrid: Instituto Juan de Herrera

Heyman, Jacques 1999. *El esqueleto de piedra*. Madrid: Instituto Juan de Herrera

Heyman, Jacques. 2001. *La ciencia de las estructuras* Madrid: Instituto Juan de Herrera.

Heyman, Jacques. 2011. *Teoría básica de estructuras*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.

- Huerta, Santiago. 2004. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Huerta, Santiago. 2005. «Mecánica de las bóvedas de fábrica: el enfoque del equilibrio». *Informes de la Construcción*, 56: 73-89.
- Huerta, Santiago. 2010. «The safety of masonry buttresses». *Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Engineering History and Heritage*, 163: 3-24.
- Ibáñez Fernández, Javier 2006. *Los cimborrios aragoneses en el siglo XVI*. Tarazona: Centro de Estudios Turiasonenses de la Institución Fernando el Católico.
- Ibáñez Fernández, J. 2009. «I cimborrios aragonesi del Cinquecento», *Lexicon. Storie e architettura in Sicilia e nel Mediterraneo*, 9: 13-22.
- Ibáñez Fernández, J. 2010. «Gothique, tradition constructive locale et 'masques al romano'». En: *Le Gothique de la Renaissance. L'architecture gothique du XVIe siècle, Actes des IVes Rencontres d'architecture européenne (Paris 2007)*, M. Chatenet, K. De Jonge, M. Kavalery N. Nussbaum (eds.). París, Picard: 151-167.
- Lambert, Elie 1926. «La Première Renaissance Espagnole et ses Cimborrios». *La revue de l'art ancienne et moderne*: 193-204, 282-292.
- Peropadre Muniesa, Ángel. 1993. *En torno a Guarino Guarini (Discurso de ingreso en Real Academia de Nobles y Bellas Artes de San Luis)*. Zaragoza: Real Academia de Nobles y Bellas Artes de San Luis.