

Artículo Técnico

Bóvedas de ladrillo por hojas en la cuenca mediterránea. Historia y práctica

Ana López Mozo, Universidad Politécnica de Madrid
Rafael Marín Sánchez, Universitat Politècnica de València

Existen tres formas básicas de disponer los ladrillos para construir una bóveda de cañón. El ladrillo puede estar colocado con su tabla alineada con el eje de la bóveda; en el intradós veremos hiladas rectas horizontales y paralelas de sogas o tizones (fig. 1, izq.). El ladrillo puede también formar una bóveda tabicada, con su tabla alineada con el intradós (fig. 1, centro). Finalmente, el ladrillo puede formar una bóveda por hojas, con su tabla vertical o ligeramente inclinada, formando arcos delgados que por el intradós mostrarán sogas o tizones (fig. 1, dcha.). Tanto la bóveda tabicada como la bóveda por hojas se construyen sin cimbra, pero en la primera debe emplearse yeso como aglomerante mientras que la segunda se construye fundamentalmente con cal e incluso arcilla.

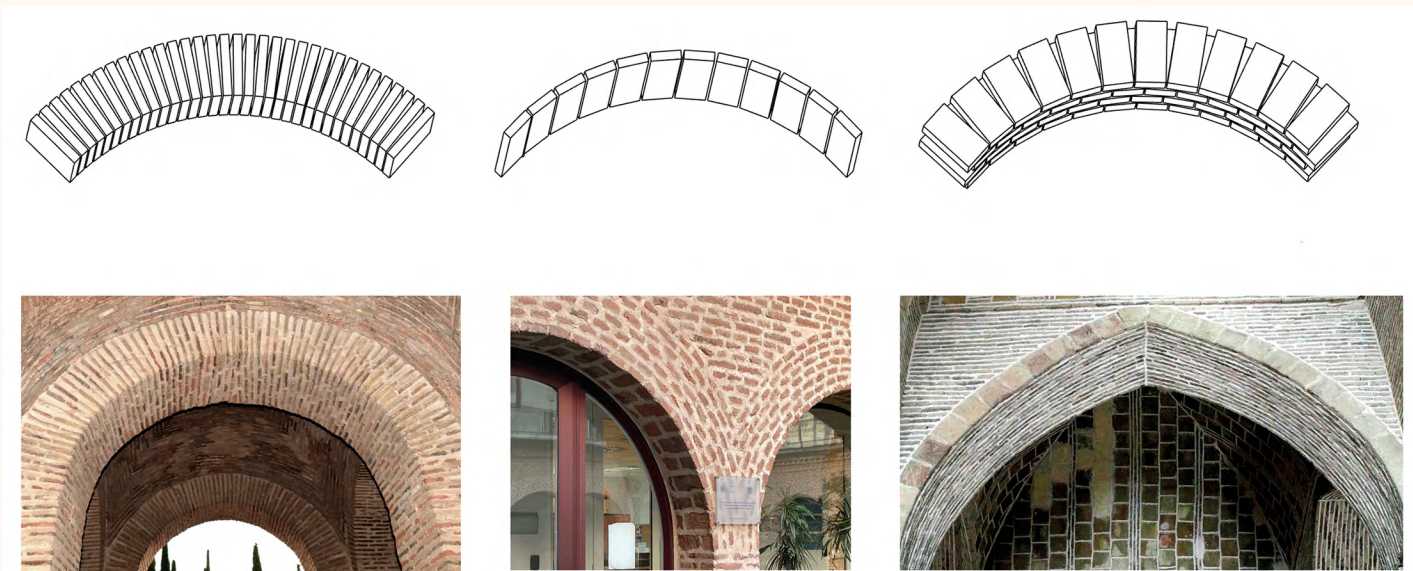


Figura 1. Disposiciones básicas de ladrillo en una bóveda de cañón (dibujo de los autores).

Este artículo aborda la descripción de la técnica histórica de construcción de bóvedas de ladrillo por hojas sin cimbra en la cuenca mediterránea y las posibilidades de recuperación de algunas variantes en la práctica actual de la construcción, pretendiendo sintetizar los trabajos realizados en el marco de un proyecto de investigación sobre este tema¹.

El hecho de que un ladrillo macizo, con un peso de entre 1,6 y 2,2 kg, se mantenga adherido con un mortero de cal y arena, sin otro apoyo, incluso en posición vertical, es el aspecto más llamativo de la ejecución de la bóveda por hojas. Además, un maestro experimentado es capaz de tender entre 6 y 8 m² de superficie abovedada al día, con la ayuda de un peón (Rabasa 2024, 339-344). Ambos aspectos avalan la amplia expansión geográfica, pervivencia en el tiempo y la recurrente experimentación con la disposición de sus aparejos para posibilitar la construcción un elevado número de variantes de bóvedas.

Se conocen casos de bóvedas de ladrillo por hojas desde al menos el año 2890 a.C. en Egipto, hechas con adobe (Emery, 1958, 98 plate 116). Hay ejemplos posteriores en Mesopotamia e Irán, y también en tumbas en China en el siglo III. Ya con ladrillo cocido, el imperio bizantino perfeccionó considerablemente el sistema, desarrollando multitud de formas y aparejos fundamentalmente entre los siglos IV y VI. Muchos casos florecerían después en el resto de la cuenca mediterránea, destacando especialmente la península ibérica, con focos importantes en la zona de Toledo (ss. XII-XVI) y el suroeste peninsular (ss. XV-XIX) (López Mozo et al 2024). Hoy en día la tradición sigue especialmente viva en el norte de África y en México. Las bóvedas tabicadas más antiguas localizadas hasta el momento son, sin embargo, más tardías, situándose en la Mezquita del Viernes en Isfahan en el s. XI (Almagro 2021, 137).

La construcción de bóvedas tabicadas llevaba varias décadas despertando mucho interés e investigaciones, pero las bóvedas por hojas no estaban recibiendo la misma atención. El proyecto de investigación mencionado se proponía dos objetivos generales: por un lado, determinar qué formas, aparejos y modos de construir se utilizaban en el marco de la cuenca mediterránea partiendo desde Bizancio, donde se produjo el primer foco especialmente relevante, y contribuir a precisar cómo se efectuó la transmisión. Por otro lado, estudiar las posibilidades de incorporación de parte de esta técnica a la práctica actual de la construcción, no solo en el ámbito de la cooperación. Es decir, aprender del pasado para intentar mejorar nuestro futuro, recuperando técnicas que supongan no solo una opción de coste económico bajo, sino también sostenible y de baja huella de carbono. Se trata

Producto: Ladrillo

Dirigido a: Proyectistas y constructores

Contenidos: Diseño y construcción

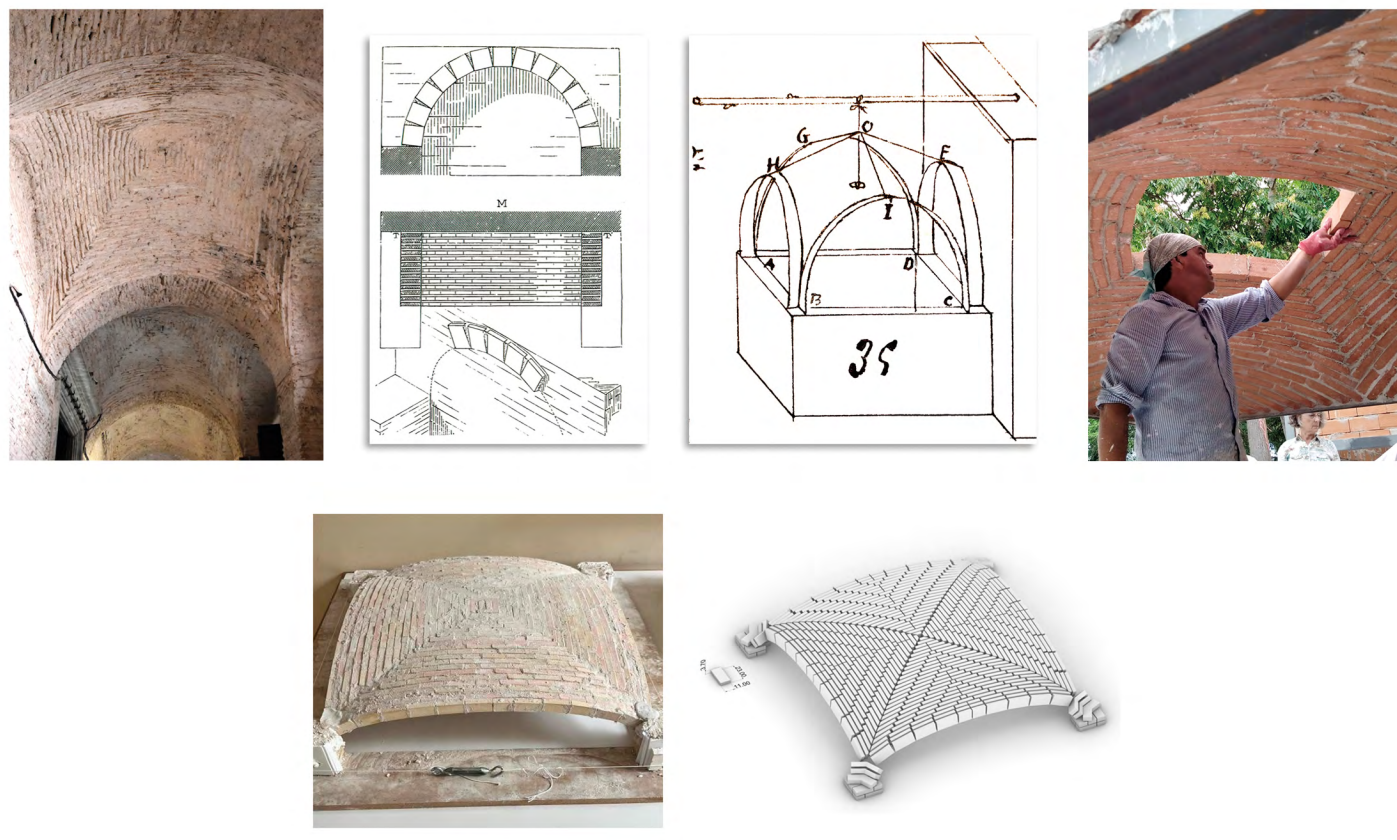


Figura 2. Fuentes del trabajo.

de una técnica que permite construir rápido y barato, y abunda no solo en grandes edificios públicos o singulares, también en la construcción doméstica. En cualquier caso, y especialmente tratándose de viviendas, una catalogación exhaustiva es inviable: el objetivo fue localizar el número suficiente de casos relevantes para sacar conclusiones².

Las fuentes originales de apoyo del estudio son fundamentalmente tres: el patrimonio conservado, las fuentes escritas y las experiencias prácticas realizadas con la guía de maestros expertos en la técnica. También se han hecho pruebas de resistencia con maquetas físicas (Rabasa et al 2024; Benito Fajardo 2025) y cálculos de estabilidad y consumo de material con modelos digitales (fig. 2).

Las fuentes escritas más relevantes son los trabajos de dos autores del siglo XIX, el francés Choisy y el extremeño Paredes, que escriben sorprendentemente casi a la vez. Choisy (1876, 1883 y 1899) aborda en profundidad el estudio de la técnica bizantina de ladrillo por hojas. Su trabajo de descripción y explicación de los diversos aparejos ha sido clave para identificarlos en el patrimonio construido. Su obra encajaría más bien en el estado de la cuestión. Paredes (1883), sin embargo, sí podría reflejar directamente lo que se hacía en Extremadura en el siglo XIX.

La metodología empleada para la toma de datos del patrimonio construido comienza por la obtención de una réplica digital tridimensional mediante fotogrametría automatizada mezclada con escaneos láser, estación total láser o escáner LiDAR, sobre la que se aplican análisis gráficos para determinar la configuración de la forma general y las hiladas aparentes, así como la orientación de los ladrillos en la parte superior de la bóveda, características que ofrecen información sobre los aparejos y procedimientos constructivos empleados. Se han dibujado curvas de nivel, secciones transversales y diagonales y arcos perimetrales para analizar la forma de la bóveda. Las curvas de nivel proporcionan información relevante sobre la forma irregular de una bóveda en un solo dibujo, lo que facilita la apreciación de diferencias y similitudes en un amplio conjunto de casos. Para comprobar la



Figura 3. Modelo digital de trabajo, con secciones y líneas de nivel, hiladas, y ladrillos extruidos en la parte superior (dibujo de los autores).

configuración de las hojas de ladrillo se dibujaron las líneas de hiladas sobre el propio modelo digital y, a continuación, se obtuvo la circunferencia que más se ajustaba. La inclinación de estas circunferencias ofrece información sobre el tipo de aparejo, y la regularidad de la altura de sus centros puede indicar el uso de plataformas y cintres para fijar los centros de las hojas y controlar su construcción. Además, se extruyeron ladrillos en la parte superior del modelo tridimensional de la bóveda para comprobar su inclinación y definir la configuración realmente utilizada (fig. 3). Este tipo de análisis permite reconocer el tipo de aparejo entre todas las

¹ "La construcción de bóvedas de ladrillo por hojas. Usos históricos y posibilidades actuales" PID2020-116191GB-I00, financiado por MCIN/AEI / 10.13039/501100011033/.

² La base de datos de casos de estudio y los resultados del proyecto se pueden consultar en <http://vaults.aq.upm.es/>

posibilidades.

Focos principales de la técnica en la cuenca mediterránea

Se ha podido identificar en la cuenca mediterránea la existencia de una serie de focos que concentran un número elevado de casos que además comparten un sistema común, y tipos especialmente predominantes en cada uno. Estos sistemas son los que se pretenden resaltar aquí, y por eso se descartan otros casos aislados que, aun siendo muy interesantes, no se encuadran en uno de estos focos. Como se ha mencionado, tras el primer foco mediterráneo relevante, situado en Bizancio entre los siglos IV y VI, encontramos dos en la península Ibérica: uno en la zona de Toledo entre los siglos XII y XVI, y otro en el suroeste entre los siglos XV y XVIII. Se ha identificado otro foco en el norte de Italia en el siglo XIX, pero tanto las fuentes escritas como las propias bóvedas revelan una construcción con cimbra (Aliberti et al 2025) (fig. 4). En los datos para el análisis se incluyen sólo las bóvedas que han sido medidas, es decir, aquéllas en las que se ha analizado forma y aparejo a partir de una réplica digital tridimensional precisa, que comprenden un total de 233 bóvedas. No se han incluido bóvedas de escaleras ni piezas pequeñas como troneras.

Analizando la muestra mediterránea en su conjunto, abundan las plantas irregulares: rectangulares (54%) y trapezoidales (36%). Y las formas que mejor resuelven estas “irregularidades” son la bóveda de arista que podríamos llamar bizantino-extremeña (38%) especialmente representativa de los modos de hacer bizantino y del suroeste peninsular y la bóveda vaída (29%) predominante en el foco toledano (figs. 4 y 5). La bóveda de arista cilíndrica es menos eficaz cuando trata de cubrir una planta rectangular, teniendo que resolverse por algún método el acuerdo entre dos cañones de radios diferentes (sobre este problema en bóvedas de cantería, ver Calvo 2020, 385-389). El tipo bizantino-extremeño mencionado, sin embargo, resuelve sin problema no sólo cualquier planta rectangular sino cuadrangular, por desigual que sea. Los casos que presentan una mayor desigualdad en las dimensiones del perímetro de la planta están en el foco del suroeste de la península Ibérica (López Mozo et al 2023).

El desarrollo en altura de las bóvedas va disminuyendo progresivamente; desde los valores en torno a 0,50 (flecha/luz) de los focos de Bizancio y Toledo, se llega a un valor medio de 0,32 en el suroeste de la península Ibérica, con datos particulares de 0,22 y 0,23 en varios casos, y se baja hasta un valor medio de 0,14 en Turín, aunque probablemente con cimbra en este último caso, en lo que podríamos calificar como el epílogo de la técnica en la cuenca mediterránea.



Figura 4. Principales focos de la técnica de bóvedas de ladrillo por hojas sin cimbra en la cuenca mediterránea y tipos predominantes (dibujo de los autores).

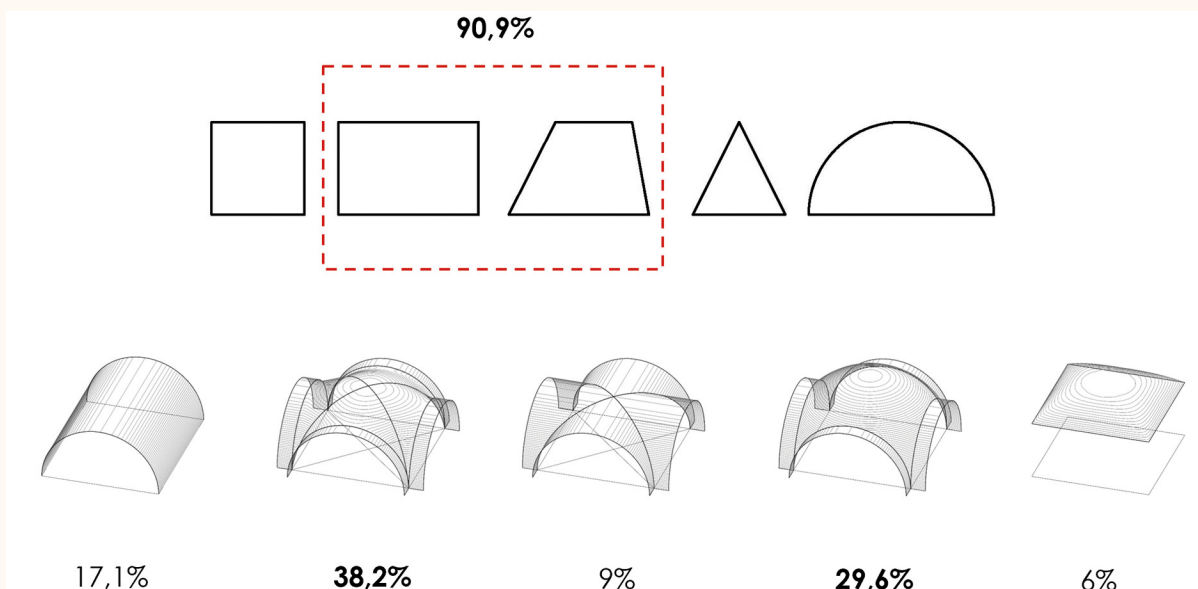


Figura 5. Tipos de planta y forma general en la muestra estudiada en la cuenca mediterránea (dibujo de los autores).

Aparejos y proceso constructivo

Las fuentes escritas que abordan el tema en profundidad (Choisy 1876 y 1883; Paredes ca. 1883) y los casos reales analizados en la cuenca mediterránea en el ámbito del proyecto de investigación mencionado³, indican que las hojas de ladrillo que van conformando la bóveda sin el auxilio de cimbra forman fundamentalmente arcos planos, verticales o inclinados, o troncos de cono con eje horizontal o inclinado, con hiladas aparentes que coinciden con curvas planas (fig. 6). Todos los casos, menos la disposición de hojas planas verticales, muestran resaltes en el intradós. Choisy muestra hojas planas verticales e inclinadas (fig. 6, a y b) y ambos autores describen opciones de hojas cónicas. Choisy dibuja dos configuraciones de hojas cónicas convexas, una con hiladas aparentes verticales (fig. 6, c) y la otra con hiladas aparentes inclinadas (fig. 6, d). Paredes, sin embargo, solo habla de una disposición cónica cóncava, diferente a las de Choisy, que según él es más estable desde un punto de vista estructural (fig. 6e, abajo). La solución de Paredes fue dibujada según los criterios gráficos de Choisy, para una mejor comparación (Rabasa et al 2020, fig. 15) (fig. 6e, arriba). La afirmación de Paredes sobre el buen comportamiento estructural de las hojas cónicas cóncavas ha sido confirmada por experiencias analíticas y prácticas, (Rabasa et al 2024). Las hojas con hiladas aparentes alabeadas en lugar de planas también están documentadas en las fuentes escritas (Ger y Lóbez, 1869, fig. 292; Choisy, 1883, fig. 33), pero su presencia en el patrimonio edificado conservado es escasa.

La primera cuestión, apreciable a simple vista en el propio patrimonio construido, es que el único aparejo que no muestra resaltes en el intradós es el formado por hojas planas verticales (fig. 7, a). Además, se pueden identificar el resto de los aparejos porque el ángulo que forman los ladrillos en la clave con la proyección de la hilada aparente es diferente. Si las hojas son planas e inclinadas (fig. 7 b), la inclinación del ladrillo en la clave estará alineada con la proyección de la hilada aparente; si forman troncos de cono convexos el ángulo que forman los ladrillos de la clave con las hiladas aparentes será mayor de 180° (fig. 7c y d), y, finalmente,

si forman troncos de cono cóncavos el ángulo mencionado será menor de 180° (fig. 7e).

En el primer foco relevante en la cuenca mediterránea, situado en Bizancio, el sistema predominante es el de bóvedas de arista, con aparejo por hojas cónicas convexas de hiladas aparentes verticales paralelas al perímetro (López Mozo et al 2025). En el siguiente foco, identificado en España en el área de Toledo, la forma general predominante es redondeada, aproximadamente vaída, aunque el sistema de construcción podría ser el mismo (fig. 8). Se trata de hojas que forman troncos de cono con base circular vertical, de lo que resultan en ambos casos hiladas aparentes verticales aproximadamente paralelas en planta. Choisy señalaba que cuando en el sistema bizantino de bóvedas de arista se eleva el centro del arco diagonal hasta igualar su altura con la del centro de los arcos perimetrales, la forma general que produce su sistema de trabajo es una bóveda vaída (Choisy, 1899, volume II, 9-11), presente en casos muy relevantes como las naves laterales altas de Santa Sofía en Estambul.

Esta configuración de los casos del área de Toledo puede apreciarse a simple vista en algunos de ellos: las bóvedas de la Puerta del Vado en la ciudad de Toledo (ca. 1100) y la bóveda de las ruinas de la Villa Romana de Carranque (ca. 450) están parcialmente colapsadas y la disposición de los ladrillos es claramente visible (López Mozo et al. 2021, fig. 9; 2022, fig. 2). También encontramos bóvedas redondeadas o vaídas en Bizancio y, además, como se ha mencionado, la bóveda vaída puede considerarse un caso particular del sistema bizantino de bóvedas de arista. Por lo tanto, podríamos decir que las bóvedas de arista de ladrillo bizantinas y las bóvedas redondeadas de Toledo utilizarían el mismo sistema, con una forma general de bóveda diferente.

También existen similitudes entre las bóvedas de arista de ladrillo bizantinas y las del suroeste de la Península Ibérica en cuanto a su forma general. Sin embargo, el sistema constructivo parece ser diferente: las hojas de los casos ibéricos forman troncos de cono cóncavos en lugar de conos convexos, y las hiladas aparentes

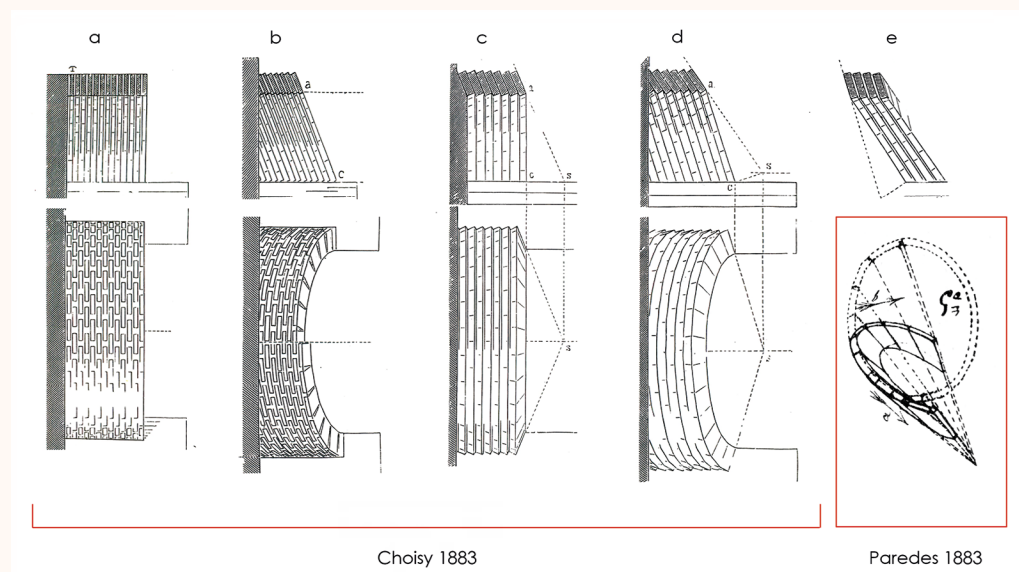


Figura 6. Posibles aparejos en una bóveda de cañón de ladrillo por hojas: a, b, c y d (Choisy 1883); e abajo (Paredes 1883); e arriba (Rabasa et al. 2020 fig. 15).

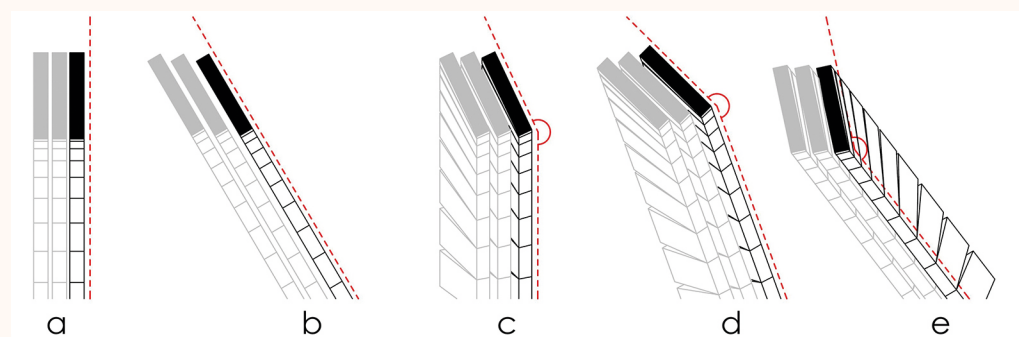


Figura 7. Rabasa et al 2020, fig. 17.

³ Los resultados de las investigaciones están disponibles en <http://vaults.aq.upm.es/publicaciones/>

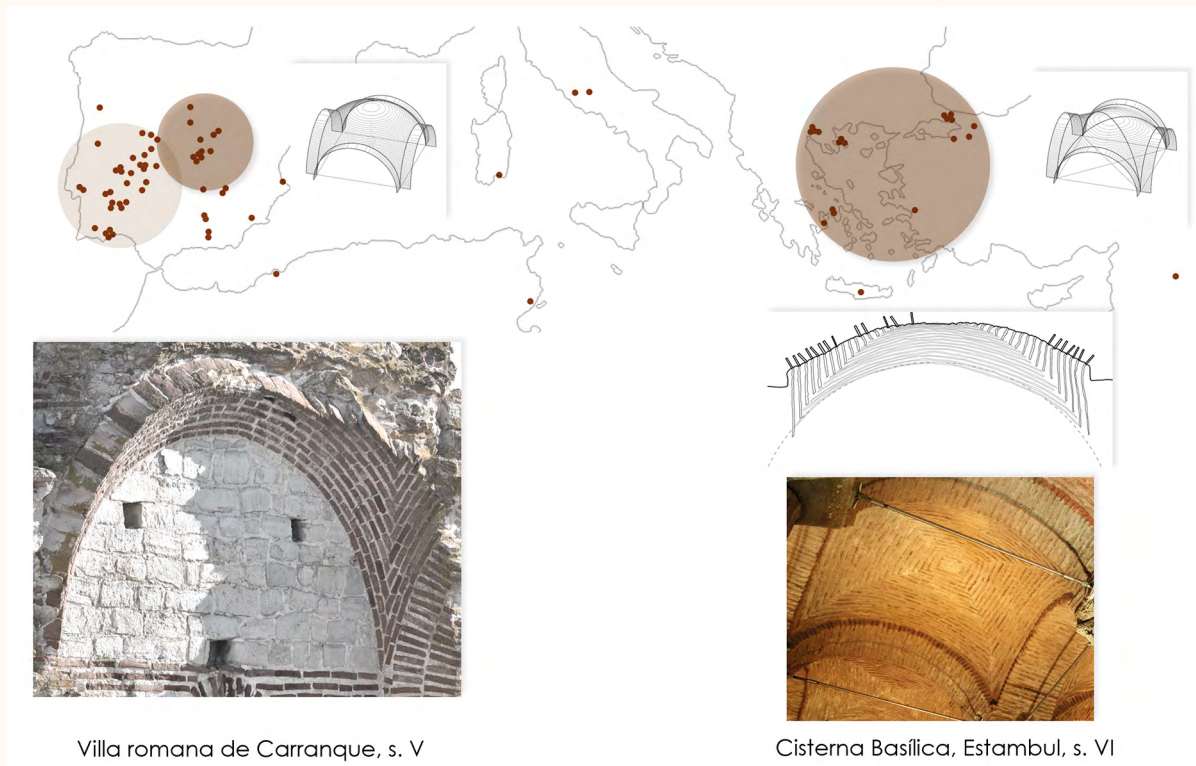


Figura 8. Relación entre los focos de Bizancio y Toledo: forma general diferente, pero sistema similar (dibujo de los autores).

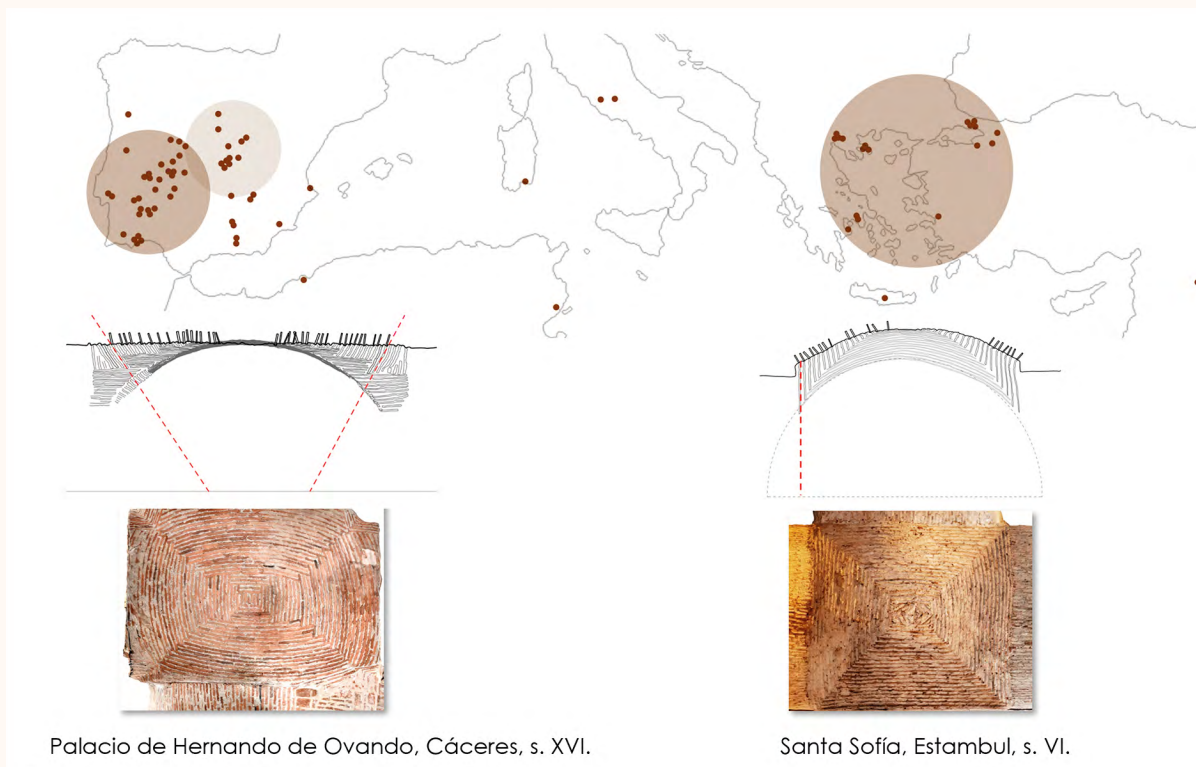


Figura 9. Relación entre los focos de Bizancio y el SO de la península Ibérica: forma general de arista, pero sistema diferente (dibujo de los autores).

están inclinadas, por lo que se proyectan en planta resulta como líneas curvas. Además, muchos casos ibéricos muestran un aparejo de ladrillo diferente en las aristas, siguiendo la forma de una espiga (López Mozo et al., 2023). Este tipo de aparejo es específico de esta zona: solo se ha identificado un caso fuera de la Península Ibérica, en el *Palazzo della Pilotta* de Parma (Alforno et al, 2020). Por lo tanto, podríamos decir que las bóvedas de arista de ladrillo por hojas bizantinas e ibéricas siguen un sistema diferente, pero la forma general de la bóveda es similar, aunque más rebajada en las segundas.

Para comprender mejor los detalles del proceso constructivo, se han llevado a cabo experiencias prácticas de construcción siguiendo el método de investigación

denominado arqueología experimental. Se ha comprobado que la construcción de bóvedas de ladrillo por hojas sin cimbra es sencilla, incluso para operarios sin experiencia previa. Para comparar ventajas e inconvenientes de los aparejos verticales y cónicos convexos, como los casos bizantinos y toledanos, se abordó la construcción de dos bóvedas de cañón de ladrillo por hojas sin cimbra, ambas con una sección transversal formada por el mismo arco rebajado: una con hojas verticales planas (fig. 10, izquierda) y la otra con hojas cónicas convexas (fig. 10, derecha). La adherencia no supone un problema al construir una bóveda de ladrillo por hojas; suele funcionar correctamente al colocar un solo ladrillo, tanto en hojas verticales como inclinadas. Sin embargo, las hojas verticales tendían a salirse ligeramente del plomo en la parte superior. El problema se solucionó comenzando



Figura 10. Construcción de dos bóvedas de cañón en la Escuela de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid: una con hojas verticales planas (izquierda) y otra con hojas cónicas convexas (derecha).

la siguiente hoja antes de terminar la anterior, un método utilizado por los maestros albañiles extremeños del suroeste de España, presente también en las bóvedas nubias de Egipto (fig. 10, izquierda). Se forma una especie de contrafuerte para evitar que la parte superior de las hojas se salga del plomo. Sin embargo, la construcción con hojas cónicas convexas o *bizantinas* no presentó el mismo problema gracias a la mayor estabilidad de la hoja en su conjunto. La inclinación de la disposición de los ladrillos en el aparejo cónico impide movimientos en la parte superior.

El profesor Rabasa (2024) ha recogido las dosificaciones empleadas por los diversos maestros que han participado en las experiencias prácticas desarrolladas en el transcurso del proyecto. También ofrece algunas reflexiones sobre la influencia que la proporción de cal y agua ejercen la bondad de la mezcla para los fines propuestos, así como la escasa relevancia que supone la incorporación de cemento al mortero o el humectado de los ladrillos, cuando estos no presentan polvo o suciedad superficial. Como se ha explicado, en las obras de fábrica, la estabilidad parcial durante la ejecución depende esencialmente del equilibrio global de la estructura (en nuestro caso, de la forma de la hilada y la inclinación de las piezas) y no tanto de la resistencia individual de sus materiales (en este caso, del mortero). Aunque es importante matizar que, a edades tempranas, una mayor resistencia del mortero empleado puede mejorar el comportamiento estructural frente a esfuerzos ocasionales o no previstos (Rabasa 2024, 345).

Conclusiones

La versatilidad del sistema bizantino de bóvedas de arista de ladrillo por hojas, que es capaz de abarcar cualquier planta cuadrangular y un amplio rango de desarrollo en altura, se vio incluso incrementada en el suroeste de la Península Ibérica, con plantas más irregulares y perfiles más bajos, lo que, unido al mayor número de casos conservados, lo convierte posiblemente en el foco más relevante de la técnica histórica de construcción de bóvedas de ladrillo por hojas sin cimbra en la cuenca mediterránea.

La técnica de construcción de bóvedas de ladrillo por hojas sin cimbra sigue especialmente viva hoy en día en México, probablemente llevada allí por españoles y portugueses en el siglo XVI. Y también sigue viva en África, con adobe. En la cuenca mediterránea tuvo un desarrollo extraordinario, podríamos decir que especialmente en Bizancio y en la península ibérica, donde se desarrolló mucho más tarde, pero se llegó a modelos muy interesantes por su poco desarrollo en altura para su adaptación a soluciones domésticas, incluso de varias plantas. Pero, sorprendentemente, en la cuenca mediterránea la técnica se está perdiendo. Y el trabajo que hemos desarrollado nos indica que es una técnica fácil de realizar, y que sería interesante su recuperación, no solo para intervenir en el patrimonio construido con conocimiento, sino para emplearla en algunos aspectos de la práctica actual. Como es frecuente en las estructuras históricas de fábrica, la ausencia de una normativa específica de seguridad estructural y buenas prácticas plantea una importante limitación que merecería ser abordada para dar respuesta a ésta y otras muchas dificultades del quehacer diario en obras de tales características.

Lista de referencias

- Alforno, M., Venuti, F. & Monaco, A. 2020. The Structural Effects of Micro-Geometry on Masonry Vaults. *Nexus Network Journal* 22, 1237–1258.
- Aliberti, L., López-Mozo, A., González-Uriel, A., de-Miguel-Sánchez, M., Calvo-López, J. 2025. Brick vaults by slices in Turin in the 19th century. A new approach to the building process. En *Digital Application in Archeology and Cultural Heritage*, ISSN 2212-0548, 2025-09, Vol. 38.
- Almagro, A. 2021. On the origin of certain vaults without formwork: Iranian timber vaults. En *History of Construction Cultures*, vol. 1, 134-140. Londres: Taylor and Francis Group.
- Benito Fajardo, M. 2025. Bóvedas de ladrillo por hojas: optimización de forma. Trabajo Fin de Grado / Proyecto Fin de Carrera, E.T.S. Arquitectura (UPM), Madrid, ES. <https://oa.upm.es/89633/>
- Calvo-López, J. 2020. *Stereotomy. Geometry and Stone Construction in Western Europe c. 1200 - c. 1900*. Cham: Birkhauser-Springer Nature.
- Choisy, A. 1876. Note sur la construction des voûtes sans cintrage pendant la période byzantine. *Annales des Ponts et Chaussées*. 5 série, 2E sem. 12: 439-449, Pl. 21.
- Choisy, A. 1883. *L'Art de bâtir chez les Byzantins*. Paris: Librairie de la Société Anonyme de Publications Périodiques.
- Choisy, A. 1899. *Histoire de l'Architecture*. Paris: Gauthier-Villars.
- Emery, Walter B. 1958. *Excavations at Saqqara. Great Tombs of the First Dynasty III*. London: Egypt Exploration Society.
- Ger y Lóbez, F. 1869. *Manual de construcción civil*. Badajoz: Imprenta de Don José Santamaría.
- López Mozo, A., M.A. Alonso Rodríguez, A. González Uriel, L. Aliberti, M. de Miguel Sánchez y M. Perelló Ocaña. 2023. Forma y construcción en bóvedas de ladrillo por hojas: el caso de Cáceres. *EGA Expresión Gráfica Arquitectónica* 28 (49), 62–75. <https://doi.org/10.4995/ega.2023.19666>
- López Mozo, A., Calvo López, J., Alonso Rodríguez, M.A., Aliberti, L. y González Uriel, A. 2024. Tipos de bóvedas de ladrillo por hojas en la cuenca mediterránea. En *Actas del Décimo Tercer Congreso Nacional y Quinto Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción*, 369-380. ISBN: 978-9945-9028-4-6.
- López Mozo, A., Rabasa-Díaz, E., Alonso Rodríguez M.A., Sanjurjo Álvarez A. y Natividad Vivó, P. 2025. Form and construction in Byzantine brick cross vaults. En *Nexus 2025 Relationships between Architecture and Mathematics*, Vicenza, junio de 2025.
- Paredes Guillén, V. ca. 1883. *Construcción sin cimbra de las bóvedas de ladrillo con toda clase de morteros*. Ms, Archivo Histórico Provincial de Cáceres, legado Paredes.
- Rabasa-Díaz, E., López-Mozo, A. & Alonso-Rodríguez, M.Á. 2020. Brick Vaults by Slices in Choisy and Paredes. *Nexus Network Journal* 22, 811–830. <https://doi.org/10.1007/s00004-020-00504-1>
- Rabasa-Díaz, E., López-Mozo, A., Alonso-Rodríguez, M.A., Marín-Sánchez, R. y Sanjurjo-Alvarez, A. 2024. Experimental assessment of existing ideas on brick vaults by slices building process. In Stefan Holzer, Silke Langenberg, Clemens Knobling, Orkun Kasap (eds.) *Construction Matters. Proceedings of the 8th International Congress on Construction History*, 804-809. Zurich: vdf Hochschulverlag AG. <https://vdf.ch/construction-matters-e-book.html>
- Rabasa-Díaz, E. 2024. La técnica de la puesta en obra de bóvedas de ladrillo por hojas con mortero de cal. Fuentes primarias y experiencias con maestros de México y Extremadura. *Journal of Traditional Building, Architecture and Urbanism* 5, 338-351. <https://doi.org/10.51303/jtbau.vi5.769>