

Enrique Rabasa Díaz

Application of the Layered Brickwork Vaulting Technique with Lime Mortar. Primary Sources and Experiences with Mexican and Extremaduran Master Builders

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

Técnica de assentamento de abóbadas de tijolo em camadas com argamassa de cal. Fontes primárias e experiências com mestres do México e da Extremadura

Keywords | Palabras clave | Palavras chave

Building trades, Traditional building, Pitched bricks, Vaults without formwork, Self-supporting vaults

Oficios de construcción, Construcción tradicional, Ladrillo recargado, Bóvedas sin cimbra, Bóvedas autoportantes

Ofícios da construção, Construção tradicional, Tijolo sobrecarregado, Abóbadas sem cimbramento, Abóbadas autoportantes

Abstract | Resumen | Resumo

Layered brickwork vaults—known as *bóvedas de ladrillo por hojas*, among other names—are those in which bricks are laid vertically or at a slight angle, forming arched courses that require no formwork, as the bricks adhere to the previous course through the mortar. Although their geographic and chronological range is wide and there is a great variety of resultant forms, here we consider details of execution and application common to them all and analyze bricklaying techniques and possible arrangements of courses according to written sources and current experience. Our conclusions confirm the possibility of establishing general criteria allowing the use of such vaults to be recovered and applied in new construction.

Llamamos bóvedas de ladrillo por hojas –también han recibido otras denominaciones– a aquellas en las que el ladrillo es recibido en posición vertical o ligeramente inclinado, formando hiladas arqueadas, y que no requieren cimbras porque el ladrillo queda adherido a la hilada anterior por el mortero. Aunque la extensión geográfica y cronológica es muy amplia y existe una gran variedad de formas resultantes, se estudian aquí los detalles de la ejecución y puesta en obra comunes a todas ellas y se analizan las técnicas de colocación de las piezas y las posibles organizaciones de las hiladas a partir de fuentes escritas y experiencias actuales. Las conclusiones confirman la posibilidad de establecer criterios generales que permitan recuperar y extender su uso en obra nueva.

As abóbadas de tijolo em camadas, igualmente denominadas de outros modos, são um tipo de abóbada construída com tijolos colocados em posição vertical ou ligeiramente inclinada, formando fiadas arqueadas, e que não necessitam de cimbra porque o tijolo adere à fila anterior através da argamassa. Embora a extensão geográfica e cronológica seja muito ampla e haja uma grande variedade de formas resultantes, estudam-se aqui os pormenores de execução e colocação que são comuns a todas elas, e analisam-se as técnicas de colocação das peças e a possível organização das filas, com base em fontes escritas e na experiência atual. As conclusões confirmam a possibilidade de estabelecer critérios gerais para recuperar e alargar a sua utilização em novas construções.

Las bóvedas de ladrillo que llamamos por hojas¹ son aquellas en las que el ladrillo, recibido en vertical o ligeramente inclinado, se mantiene en su lugar durante el proceso de construcción por la adherencia del mortero en su tabla, de manera que es posible completar cada hilada formando un arco delgado, del que quedará visto el canto o la testa en el intradós (Fig. 1, abajo). En consecuencia, al igual que las bóvedas tabicadas, se construyen sin cimbra. El mortero puede ser de barro, cuando se trata de adobes, o de yeso, lo que ha sido común en el norte de África y en Irán. Sin embargo, aquí nos referiremos a las construidas con mortero de cal. El hecho de que sea posible colocar el ladrillo con un mortero de cal y arena, y que éste se mantenga adherido sin otro apoyo, incluso en posición vertical, es en principio el aspecto más llamativo de su ejecución. Algunos autores españoles del siglo XIX se refirieron a esta técnica (Marín-Sánchez *et al.* 2021; Rabasa *et al.* 2022); este trabajo quiere mostrar detalles de la puesta en obra de este tipo de bóvedas, cotejando las referencias de aquellas fuentes y otras más recientes² con la experiencia de la ejecución real³.

El origen de estas bóvedas es muy remoto; las más antiguas que se conocen datan del tercer milenio antes de Cristo, en Mesopotamia. Su transmisión a Roma hubo de producirse durante las guerras con los partos. El momento de mayor esplendor se sitúa, sin duda, en Bizancio (Fig. 2). A partir de ahí se extenderán por el Mediterráneo, y más especialmente llegarán a la Península Ibérica. También se tiene constancia de su presencia en China⁴. La más antigua registrada en España es del siglo V y se encuentra en un palacio tardorromano en Carranque, Toledo (López-Mozo

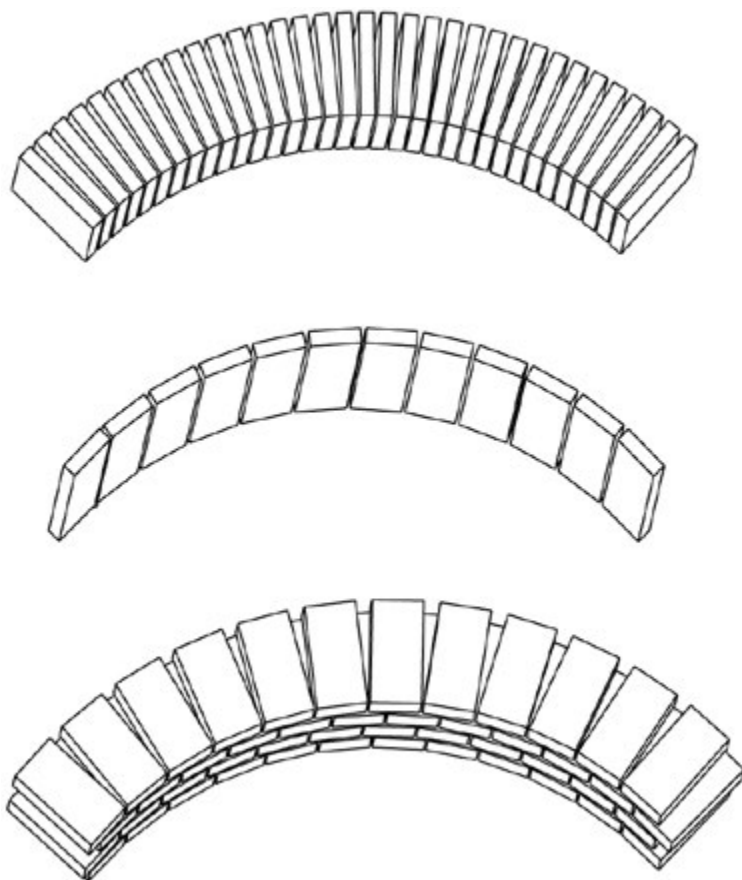


Figura 1. Modos de colocación del ladrillo en un arco o tramo de bóveda: arriba, disposición radial; en el centro, ladrillo tabicado; abajo, disposición por hojas (López-Mozo *et al.* 2022)



Figura 2. Bóveda en Santa Sofía, Estambul

et al. 2022). Desde entonces, y con una sorprendente proliferación hacia el siglo XII, no han dejado de ser empleadas en España y Portugal.

Un foco notable de su empleo fue el Reino de Toledo, y otro, que ha llegado casi hasta nuestros días, es Extremadura y el Alentejo, donde existen cientos de ejemplos en viviendas comunes. Se extendieron también a México, sin duda llevadas por extremeños, y hoy día son ejecutadas por maestros bovederos en ese país. Además de la práctica en Extremadura y México, existen ejemplos actuales en Oriente Medio, aunque en ese caso el ladrillo se recibe con yeso, que hace más fácil emprender disposiciones algo arriesgadas, tal como hiladas completamente verticales, de las que más tarde hablaremos. En Irán se hacen aún de adobe recibido con barro. Hay también tipos particulares en el norte de Italia y Europa central, casi todos del siglo XIX y contruidos con frecuencia recurriendo a cimbras ligeras.

Para comprender mejor la técnica, el equipo ha documentado en detalle el trabajo realizado durante un taller práctico organizado específicamente para este propósito⁵. En dicho taller, participaron un maestro mexicano y un maestro extremeño, ambos conocedores de los procedimientos tradicionales tal como han sido transmitidos hasta nuestros días. Después de aquel taller

hemos reproducido algunas de las acciones características observadas, en diversas circunstancias, modificando, por ejemplo, las proporciones de las mezclas o empleando otros tipos de ladrillo. En este taller⁶, el maestro Andrés Flores ejecutó una bóveda característica de la tradición actual mexicana, que podemos llamar de trompas o de esquinas, construida sobre un perímetro cuadrado horizontal (Fig. 3). Por su parte, el maestro Máximo Portal hizo una bóveda extremeña de arista, rebajada y con embocaduras perimetrales elípticas (Fig. 4). En Extremadura, estas bóvedas se denominan “de rosca” para diferenciarlas de las bóvedas tabicadas, aunque esta terminología entendemos que puede ser confusa, ya que en otras regiones se habla de un aparejo a rosca cuando este es radial.

Ambas bóvedas eran de planta cuadrada de 2,60 m de lado, lo que permitió generar hiladas de una longitud suficiente para comprobar los detalles de la técnica. Los ladrillos se dispusieron de manera que dejaran vista la soga en el intradós, lo que resulta en un espesor de medio pie para la bóveda. Aunque esta disposición es menos común, también es posible colocar los ladrillos mostrando el tizón, lo que da como resultado un espesor de un pie. Hemos encontrado este tipo de disposición en las ruinas del Monasterio de la Caridad en Salamanca, una obra de Juan de Sagarvinaga del siglo XVIII (Fig. 5)⁷.



Figura 3. Bóveda de trompas o de esquinas, apoyada en un perímetro horizontal, realizada por el maestro Andrés Flores



Figura 4. Bóveda extremeña, apoyada en arcos perimetrales, ejecutada por el maestro Máximo Portal



Figura 5. Bóveda en el Monasterio de la Caridad, Salamanca

En otros trabajos hemos estudiado la tipología de las bóvedas, que es muy variada en los diversos focos históricos, analizando la forma general de la bóveda en relación con la disposición de las hiladas (López-Mozo *et al.* 2021; López-Mozo *et al.* 2022; Rabasa *et al.* 2023; López-Mozo *et al.* 2023). En este artículo, por tanto, no atenderemos a los tipos formales concretos de las dos bóvedas ejecutadas, sino a los detalles comunes a todas las bóvedas por hojas, particularmente en lo que respecta a la colocación de las piezas y a la conformación y control de la disposición de las hiladas individuales.

Los tamaños de ladrillo empleados fueron macizos rústicos de 23,5 x 11,5 x 4,7 cm (2,16 kg) para la bóveda mexicana y 23,5 x 11,5 x 3,7 cm (1,70 kg) para la bóveda extremeña, elegidos por los maestros. No obstante, en ambos casos, se mostraron flexibles en la elección del ladrillo. Un ladrillo habitualmente empleado para este fin en México, conocido como *cuña*, tiene unas dimensiones de 20 x 10 x 5 cm (1,70 kg). El ladrillo recomendado por Paredes (1883) es de 21 x 14 x 3,2 cm (1,60 kg). Hasta hace poco, en Extremadura se han empleado ladrillos de 21 x 10 x 3 o 5 cm (1,07 o 1,78 kg). En Alemania se han empleado ladrillos de un grosor considerable. En consecuencia, no parece que el peso sea muy limitante. En cuanto a las dimensiones, el ladrillo recomendado por Paredes ofrecería la ventaja de generar un grosor de bóveda algo mayor, sin llegar a un pie.

La bóveda mexicana fue terminada con mucha holgura en tres días, cubriendo un área de 6,76 m². La bóveda extremeña, aunque quedó sin cerrar completamente debido a demoras iniciales, hubiera requerido un tiempo similar. En ambos casos los maestros contaron con ayuda para la preparación del mortero y los ladrillos, pero el ritmo de trabajo fue lento debido a las frecuentes paradas para explicar el proceso. Flores afirmó que podría avanzar unos 6-7 m² al día con la ayuda de un peón. Según información personal del arquitecto Alfonso Ramírez Ponce, un maestro bovedero con un peón puede tender de 6 a 8 m² por día⁸. Según Albarrán (1885), ingeniero del siglo XIX, un albañil y dos peones pueden cubrir 5 m² en una jornada de diez horas. Paredes (1883) indica que es posible avanzar 4 m² en una jornada de 8-12 horas. Por lo tanto, se puede afirmar que el ritmo de avance es rápido, especialmente en el México actual.

La inclinación del ladrillo

Auguste Choisy (1876; 1883), quien estudió en profundidad el amplio abanico de bóvedas por hojas construidas durante el periodo bizantino, comienza explicando que la ligera inclinación que se suele dar a los ladrillos contribuye a evitar que estos deslicen. De ello se deduce que dicha inclinación se deriva de esa condición de la puesta en obra de cada pieza. David Wendland (2007a, 2007c) ha estudiado las bóvedas alemanas llamadas diamantadas o celulares (bóvedas de ladrillo góticas sin

nervios) y la plementería de las bóvedas alemanas nervadas. Wendland explica que, dado que también es posible colocar los ladrillos en posición completamente vertical, la inclinación responde más bien a la necesidad de adaptar el aparejo a una zona de la superficie de la bóveda que es más o menos inclinada. Wendland demuestra, corrigiendo en esto al célebre Ungewitter, que en las bóvedas alemanas las diversas hiladas no están dispuestas en planos radiales, sino paralelos. Como consecuencia, se mantiene una misma inclinación de esos planos mientras sea posible, es decir, mientras no resulte contradictoria con la inclinación del intradós de la bóveda, cambiando a otra serie de planos cuando es necesario⁹.

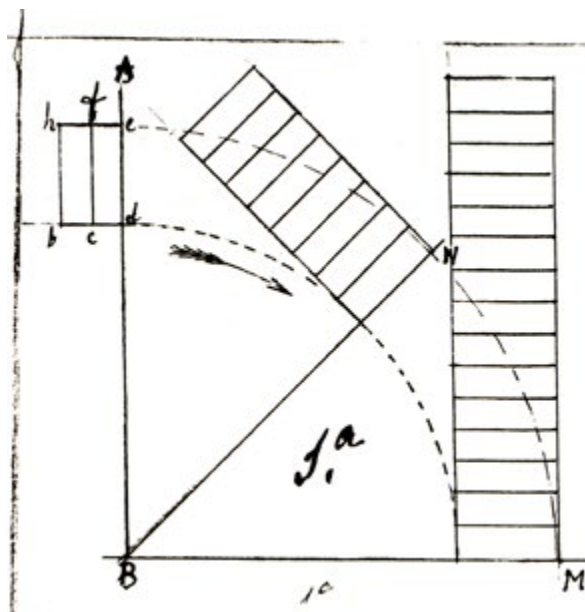


Figura 6. Dibujo en Paredes (1883) que muestra la experiencia de disponer el ladrillo recibido con diversas inclinaciones

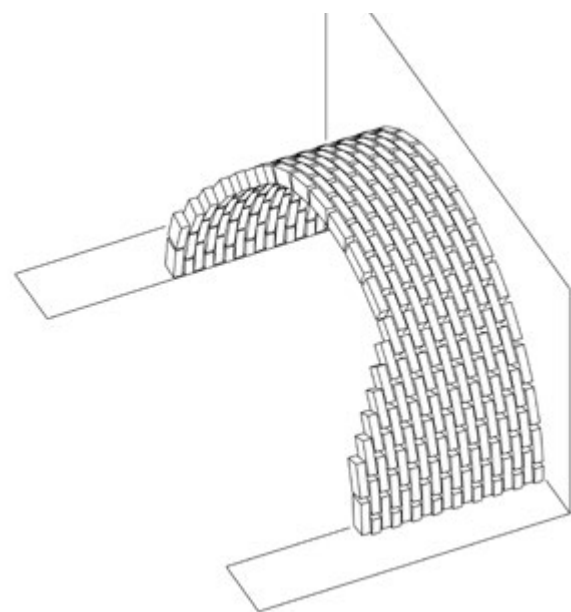


Figura 7. Avance de los arranques de algunas hiladas para estabilizar bóvedas con hiladas planas verticales

En todo caso, es cierto que es posible colocar cada ladrillo en posición completamente vertical. Paredes (1883) relata una experiencia en la que evaluó la adherencia de los ladrillos. Dispuso ladrillos individuales, recibidos cada uno sobre el anterior, en un plano inclinado a 45 grados, llegando a colocar hasta ocho piezas; cuando el plano era completamente vertical, logró disponer dos ladrillos sin que cayeran (Fig. 6). Esto ha sido confirmado en nuestras propias experiencias. Por lo tanto, la inclinación del ladrillo no se debe estrictamente a la necesidad de asegurar que permanezca en su lugar durante la construcción. Sin embargo, es posible que la inclinación reduzca la cantidad de ladrillos que caen durante una ejecución rápida, algo que también hemos observado, incluso en el trabajo de un profesional.

Durante la construcción de una bóveda de cañón, en una zona con hiladas planas verticales recién completadas, si son suficientemente largas, solo el mortero fresco en lechos y juntas evita la deformación por su propio peso. Cada hilada individual forma un arco con lechos (es decir, juntas entre los cantos de los ladrillos) que serían poco rígidos, especialmente cuando el mortero aún está fresco, y presentaría una colaboración débil con la hoja anterior. Sin embargo, al utilizar ladrillos inclinados, una sección transversal de la bóveda nunca cortaría exclusivamente mortero, lo que aumenta la colaboración entre las hojas. En consecuencia, en hiladas verticales completamente semicirculares las deformaciones podrían ser mayores¹⁰, y existe riesgo de pandeo del arco fino que forma la hilada, por compresión en su plano.

De hecho, hemos experimentado que las hojas completamente verticales, si son largas, pueden desprenderse hacia fuera con facilidad cuando la ejecución no es perfecta. Consultado sobre este tema, el maestro Portal recomendaba, en estos casos, reforzar los arranques con el inicio de algunas hiladas adicionales, rebajando así la flecha del tramo libre (Fig. 7). Hemos comprobado que esta técnica de refuerzo se utiliza comúnmente en la construcción de las llamadas bóvedas nubias, incluso con hiladas inclinadas¹¹.

La adherencia del mortero de cal

La adherencia que se consigue con mortero de cal es generalmente aceptada como un hecho, pero no ha sido explicada. En el caso de las bóvedas tabicadas, o en el de las bóvedas por hojas tomadas con yeso, la rapidez de fraguado de la pasta y la ejecución con el ladrillo sin mojar hacen más fácil imaginar que un endurecimiento relativo, conseguido rápidamente, es lo que provoca la adherencia. En cuanto al mortero de cal, dado que el ladrillo es poroso, se tiende a pensar que la pasta se introduce en los poros, creando microentradas que contribuyen a la retención de la pieza. Está extendida la creencia de que, en este caso, tampoco se debe mojar el ladrillo, para que absorba rápidamente la



Figura 8. Izquierda, ladrillo recibido en vertical; derecha, ladrillo sustentado en horizontal

pasta. Sin embargo, la reacción química que hace que la cal apagada endurezca mediante la absorción de CO_2 es un proceso que no ocurre de forma inmediata. Tanto si penetra en los poros como si no, el mortero no fragua en cuestión de segundos. En consecuencia, se debe buscar la adherencia en procesos de naturaleza física.

Como hemos explicado, es posible recibir un ladrillo sobre otro en posición vertical. Es posible también, e incluso más fácil, enlazar dos ladrillos y llevar el conjunto a la posición horizontal sosteniendo con la mano solo el superior, sin que el inferior caiga (Fig. 8). Estas experiencias son compatibles con la idea de un agarre mutuo de las piezas por efecto ventosa. Hemos comprobado que el ladrillo puede ser ajustado ligeramente moviéndolo en su plano durante unos pocos segundos, pero debe ser inmediatamente apretado y golpeado en su zona media. Es importante tener cuidado de no golpear en los laterales, ya que esto podría provocar un balanceo que comprimiría ligeramente un lado de la pasta que rellena la junta, aumentando el espesor de la junta en el lado opuesto y permitiendo la entrada de aire. Esta descripción coincide con las condiciones necesarias para la creación de un vacío y el efecto ventosa.

Diversos estudios se han centrado en las propiedades físicas del mortero de cal, las cuales varían según su composición. Sabemos que se produce un efecto denominado reopexia, que es un incremento de la viscosidad de un fluido no newtoniano cuando este es sometido a presión (Rodríguez Agudo y Rodríguez Navarro 2010). Este fenómeno es observable en la pasta de yeso y, curiosamente, también en una pasta elaborada con la harina fina que conocemos como maicena. De hecho, es una experiencia didáctica conocida: al introducir un dedo en un recipiente con maicena densa,

si se hace lentamente no ofrece resistencia, pero si se hace rápidamente, sí lo hace. En el caso del mortero de cal, el efecto ventosa, junto con la rápida disminución de la fluidez debido a la presión ejercida, podrían converger en lo que interpretamos como adherencia¹².

En relación con la humedad del ladrillo, es cierto que se suele recomendar no mojarlo previamente, a diferencia de lo que se aconseja en el caso de un muro convencional, caso en el cual el ladrillo seco absorbe el agua del mortero, debilitándolo. Sin embargo, ambos maestros no vieron inconveniente en mojar muy brevemente el ladrillo inmediatamente antes de aplicar el mortero, con objeto de eliminar el polvo característico de los ladrillos rústicos. El maestro Flores afirma que, cuando se trata de un ladrillo poco poroso, este suele emplearse seco.

Con algo de humedad, es de suponer que la pasta aplicada se adapta mejor a todas las irregularidades de la superficie. La conveniencia de eliminar pequeños granos sueltos y el hecho de que la tabla del ladrillo puede estar mojada sin inconveniente, son factores que respaldan las hipótesis explicativas que hemos enunciado. En los ladrillos algo porosos colocados solo unas horas antes, es posible observar en el canto una zona en la cual la humedad ha entrado en contacto con el mortero. Por otra parte, si el ladrillo estuviera saturado de humedad en lugar de estar superficialmente mojado, esto aumentaría innecesariamente el peso de la pieza, aunque no impediría la adherencia. Además, podemos confirmar que superficies perfectamente planas e impermeables también pueden quedar adheridas por un mortero de cal; tenemos la experiencia, fácilmente reproducible, de enlazar dos paletas de albañil en posición horizontal, sustentando el conjunto

solo con el mango de la paleta superior. Naturalmente, esto ocurre si se utiliza la mezcla adecuada, sobre lo cual trataremos a continuación.

Composición y aplicación de la pasta

Se pueden considerar diversas recomendaciones para la composición del mortero. El arquitecto mexicano Alfonso Ramírez afirma que la mezcla debe estar compuesta por cemento, cal y arena en la proporción 1:1:4 (es decir conglomerante y árido en proporción 1:2), que puede aumentar a 1:2:4 (3:4) si el ladrillo va a ser colocado en posición vertical. Para los maestros Flores y Portal, una proporción de 1:3 también sería adecuada, aunque con la adición de algo de cemento. En todo caso, los maestros ejecutaron el mortero corrigiendo la proporción varias veces en función de su organolepsia, lo que en la mayoría de los casos resultó en un aumento de la cantidad de cal.

La evaluación visual de la mezcla se realiza no solo para adaptarse a las diferencias entre tipos de cal y de arena, sino también porque el hábito en la observación del punto adecuado resultó ser más eficaz y rápido que una dosificación precisa. En concreto, el agarre de la pasta en la propia paleta permite una evaluación previa antes de su aplicación sobre el ladrillo. Es importante observar con cuidado el añadido de arena y, especialmente, el de agua, ya que puede fácilmente ser excesivo; sin embargo, un exceso de cal no representa un problema. En nuestras experiencias, una proporción cal/arena de 1:3, sin cemento, es viable, y aumentando a 1:2 se obtienen excelentes resultados en cuanto a adherencia y resistencia.

Las experiencias desarrolladas por el equipo, junto con la evidencia de las obras históricas, muestran que el uso de cemento Portland no es necesario. Aunque el cemento Portland incrementa la resistencia del mortero, la estabilidad de una obra de fábrica depende más del equilibrio general que de la resistencia individual de los materiales. Sin embargo, es cierto que, si la obra está

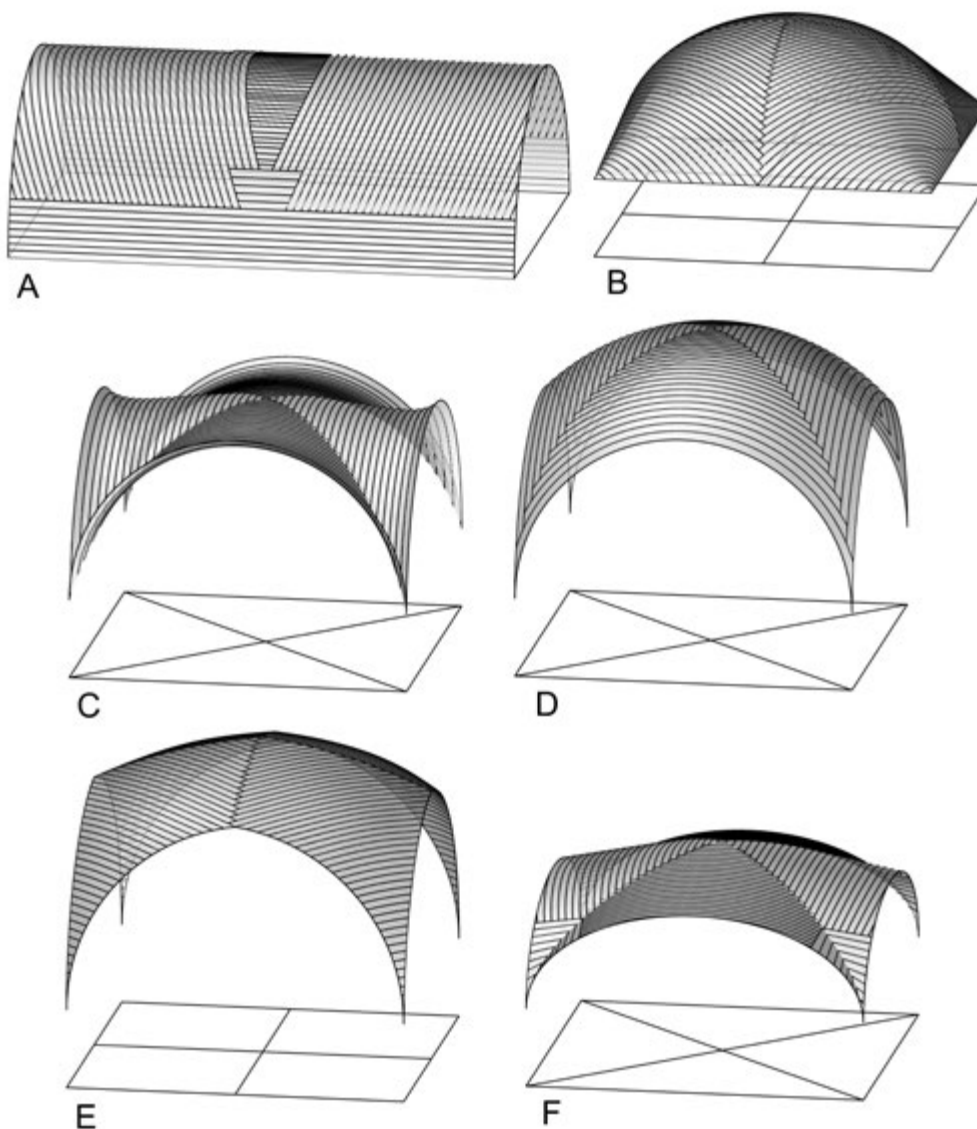


Figura 9. Algunos esquemas de tipos de bóvedas por hojas: A, de cañón; B, de esquinas, con arranque vertical; C, de arista bizantina; D, vaída; E, de costuras en los ejes; F, extremeña (Rabasa *et al.* 2021)

inacabada, un mortero más resistente puede ofrecer una garantía frente a esfuerzos no previstos¹³.

La aplicación del mortero puede realizarse de tres maneras. La más común consiste en aplicar la pasta en abundancia con la paleta, sobre la tabla y el canto del ladrillo a colocar, especialmente en la parte que quedará más baja, posándola en su lugar de manera que una ligera presión la extienda hacia arriba. El maestro Portal arrojaba el mortero, con la paleta, sobre la hilada receptora, y quedaba retenido sobre ella, una acción común en albañilería. Sin embargo, Choisy (1876: 441) afirma que vió aplicar la pasta en toda la longitud de la hilada, para colocar después los ladrillos de la siguiente. Para hacerlo de esta manera, es importante evitar que el mortero se seque excesivamente, por ejemplo, si el tiempo es caluroso. La extensión de la pasta a lo largo de toda la hilada puede tener la ventaja de controlar y regularizar el espesor del mortero, aunque es de suponer que esto requiera una gran habilidad.

Forma de la hilada

Naturalmente, la construcción de la hilada comienza por los extremos, para evitar una serie demasiado larga de ladrillos sin apoyo. En consecuencia, en el encuentro de las dos ramas de la hilada quedará un hueco que probablemente requerirá una porción de ladrillo. No hace falta decir que los albañiles experimentados son capaces de cortar el ladrillo a la longitud deseada con unos pocos golpes de paleta. Una paleta con el borde ligeramente curvo (Fig. 3), como algunas que se utilizan, permite golpear con mayor precisión en una pequeña zona central de la tabla.

El tipo de aparejo adoptado, la forma de las hiladas, su mayor o menor inclinación general, y la calidad plana, cónica o alabeada de los lechos, están evidentemente interrelacionados con la forma general de la bóveda. Como se ha mencionado, este artículo se centra en las variables de la puesta en obra que son comunes a todas las bóvedas por hojas. El equipo que desarrolla este estudio ha publicado y está analizando la forma y el aparejo de los grupos y focos históricos más importantes. Como una breve muestra, en la figura 9 se pueden observar algunos ejemplos característicos.

Como se mencionó anteriormente, Wendland (2007a) ha encontrado una relación directa entre la disposición de las hojas y la forma de las bóvedas, especialmente en las plementerías góticas alemanas. En estos casos, la forma general de la bóveda resulta de la curvatura admisible para cada hilada, la condición de paralelismo de los lechos, y las condiciones de contorno. Choisy (1883) explica los aparejos de las bóvedas bizantinas distinguiendo entre los que presentan lechos planos y aquellos que son troncos de cono, convexos desde el punto de vista del operario. Estos últimos, cuando se disponen en hiladas paralelas inclinadas, dan lugar necesariamente a un espesor de junta

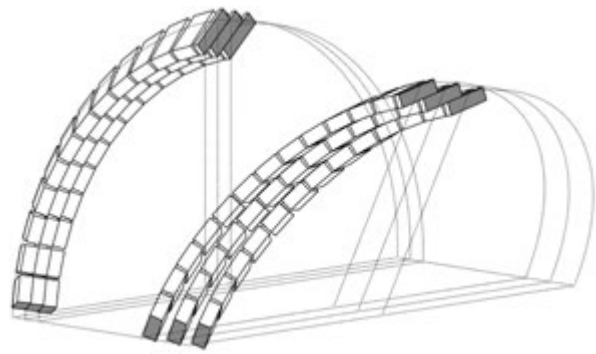


Figura 10. Distancia constante entre hiladas cónicas cuando los conos a los que pertenecen son iguales por traslación, con el mismo eje horizontal (izquierda), y variable cuando el eje es inclinado (derecha)

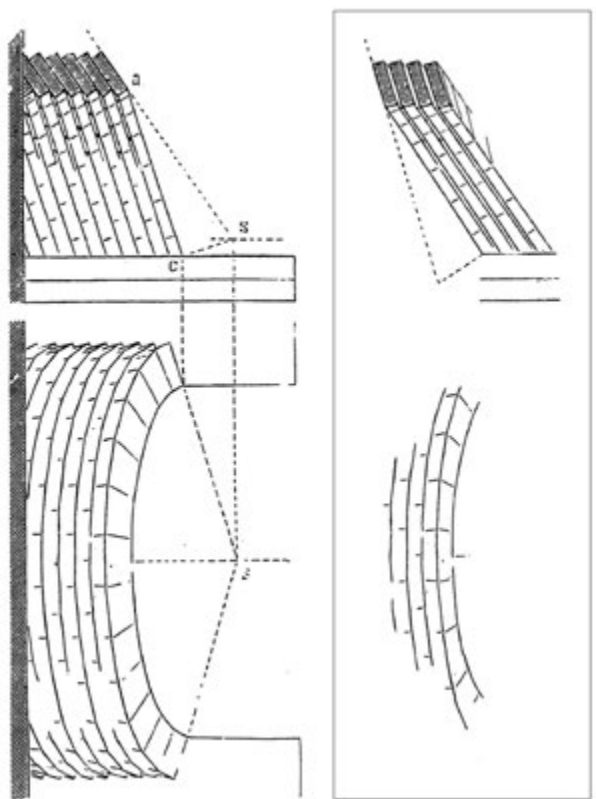


Figura 11. A la izquierda, dibujo de Choisy (1883) mostrando las hiladas troncocónicas convexas; a la derecha, dibujo del autor con el mismo grafismo, correspondiente a las hiladas troncocónicas cóncavas de Paredes (1883) (Rabasa et al. 2020)

variable (Fig. 10)¹⁴. En todos los casos explicados por Choisy, las hiladas siguen arcos de circunferencia con un centro definido.

El arquitecto extremeño Paredes también describe la forma de las bóvedas tradicionales en Extremadura como troncos de cono, aunque con una diferencia muy notable respecto a los descritos por Choisy. Los conos de Paredes son cóncavos desde el punto de vista del ejecutor (Figs. 11 y 12). Esta disposición, de la que nuestro equipo ha documentado casos¹⁵, fue justificada por Paredes, quien defendió su mejor comportamiento mecánico.

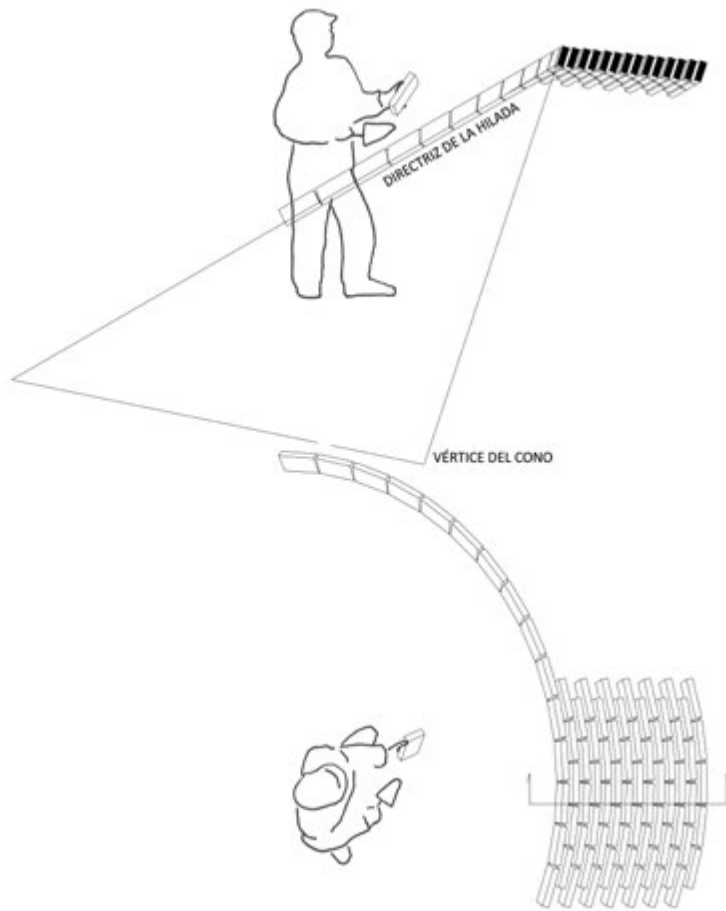


Figura 12. Disposición esquemática de las hiladas según Paredes (1883)

En efecto, otro trabajo de nuestro equipo (Rabasa 2020) ha demostrado, analizando el equilibrio de cada pieza, que una hilada troncocónica cóncava es más estable que una convexa. También hemos comprobado esta estabilidad en maquetas dispuestas de ambas maneras (Fig. 13).

En otros estudios, este equipo ha encontrado que en muchas bóvedas españolas las hiladas, cuando pueden ser asimiladas a arcos de circunferencia, no tienen los centros alineados ni los radios iguales. Esto sugiere que no se utilizaron cuerdas o cintreles para controlar su forma. Habitualmente, las líneas de hilada aparentes en el intradós se encuentran en planos paralelos, pero los lechos son troncocónicos (Figs. 10 a 12).

En la bóveda mexicana ejecutada por Andrés Flores hemos encontrado una disposición de los lechos que no sigue planos paralelos ni superficies cónicas. En los arranques de cada hilada los primeros ladrillos ya presentaban cierta inclinación en la tabla, lo que requirió cortes en las piezas para facilitar su apoyo en el soporte¹⁶. Las hiladas no describían arcos de circunferencia, sino que aumentaban su curvatura hacia la parte central, y los planos de los ladrillos iban cambiando su inclinación para quedar más o menos perpendiculares a una ideal línea de sección diagonal de la bóveda. Un levantamiento fotogramétrico permite comprobar el cambio progresivo de inclinación. Es decir, los lechos no son planos ni cónicos, sino alabeados, y no paralelos (Fig. 14).

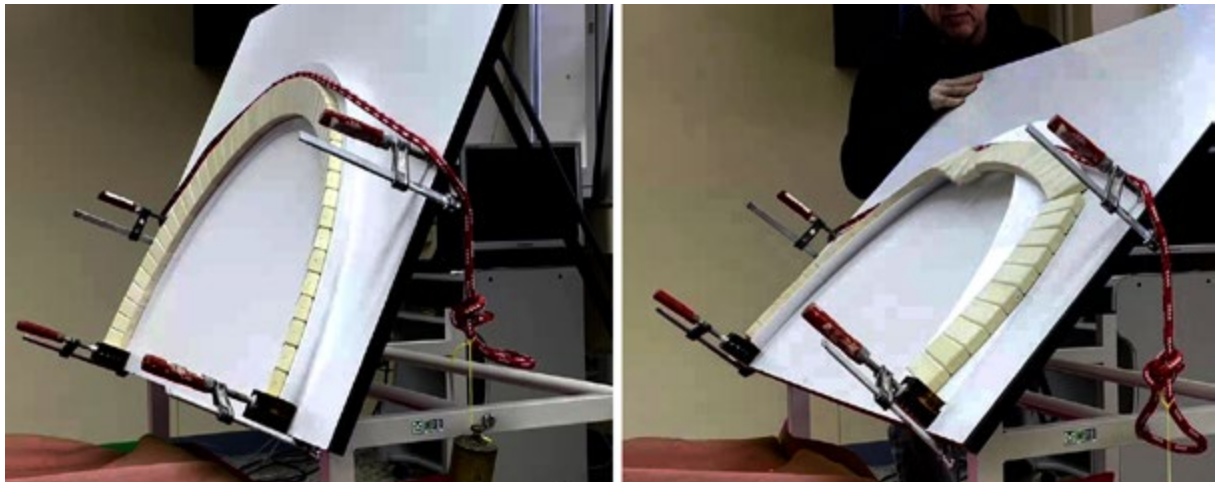


Figura 13. Maquetas a escala 1:25 para el ensayo de una hilada convexa o cóncava. Al aumentar progresivamente la inclinación, la convexa (derecha) fracasó con la mitad de la carga que había resistido la cóncava (izquierda)



Figura 14. Vista de una hilada de la bóveda extremeña, disponiendo la parte central de manera que quede de canto. Levantamiento fotogramétrico de Miguel Ángel Alonso



Figura 15. Bóveda en el pórtico de la Ermita de la Paz, Cáceres

Esta es probablemente la situación más compleja que se puede encontrar, y dio lugar a una curiosa y poética afirmación de Andrés Flores: “en la bóveda de esquinas, uno mismo es el compás”. El control de la forma depende en gran medida de la pericia del operario, que guía sus acciones no solo de manera automática, sino instintiva; esto es tan relevante que trabajar a una altura inadecuada para su estatura puede resultar muy inconveniente, e incluso la actividad conjunta de dos albañiles experimentados de distinta estatura puede no ser aconsejable, según afirmó Flores. Se trata, por tanto, de una interiorización de las formas y de las acciones.

Esto recuerda a la parábola del “cocinero Ding”, un relato del filósofo chino Zhuangzi: el carnicero Ding alcanza la maestría en descuartizar un buey después de mucho entrenamiento; no era diestro aún cuando, al principio, veía el buey como un todo; ni cuando, más tarde, se centraba en su estructura anatómica, que requiere análisis; se vuelve diestro por fin cuando encuentra el objeto “con el espíritu”, es decir, cuando lo ha interiorizado¹⁷. En estos casos, no se trata tanto de movimientos repetitivos, como de una profunda asunción global del objeto, derivada de la experiencia.

Las hiladas de la bóveda de Portal eran aparentemente planas. No parece haber llegado hasta hoy ningún testimonio de la tradición de la forma cóncava mencionada por Paredes, aunque esta ha sido identificada en ejemplos históricos existentes (López-Mozo *et al.* 2023).

Estas bóvedas suelen estar formadas por varios sectores. En el caso de las bóvedas de cañón, la construcción generalmente comienza por los dos extremos del cilindro y se remata en el encuentro con un aparejo distinto, que cubre el espacio en forma de huso que queda entre ellos (Fig. 8A). En aquellas que se apoyan en planta cuadrada o rectangular, las costuras entre sectores pueden ubicarse en los ejes o en las diagonales. El encuentro de las hiladas cuando llegan a esas costuras da lugar a diversas disposiciones. La curvatura de las hiladas que convergen determina que sea necesario o no cortar los ladrillos.

En las bóvedas de arista extremeñas y alentejanas, el apoyo en las esquinas se realiza con un macizo de ladrillo que ya presenta la forma del arranque aristado, a modo de ménsula. En él las hiladas comienzan siendo horizontales y, a medida que se asciende, se van inclinando en el sentido radial para facilitar la recepción de las hojas, lo que evita cortar el

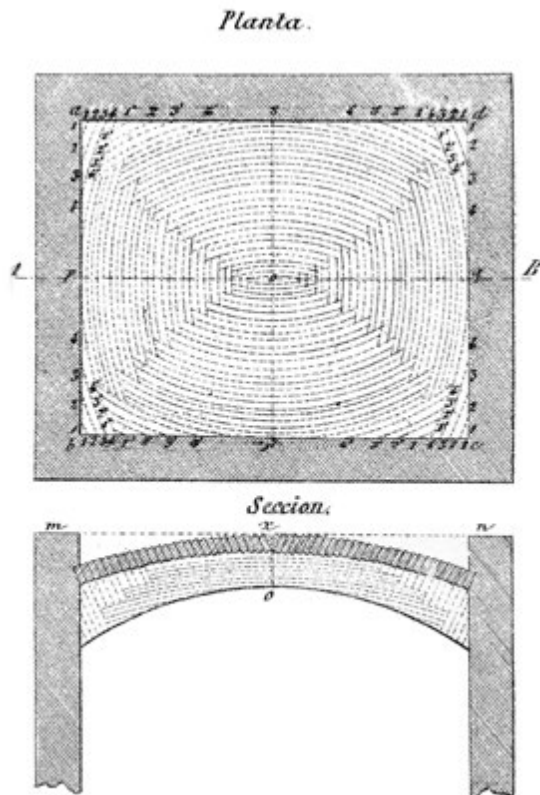


Figura 16. Bóveda en “tapa de coche” según Ger y Lóbez (1869: 256)

primer ladrillo de éstas. Con frecuencia, ese primer macizo se repite a lo largo de la diagonal en lo que se llama *pechinas* en Extremadura o *espigas* en el Alentejo. De este modo, refuerzan la arista de la bóveda, donde se concentran las tensiones (Fig. 15).

Existe un tipo de bóveda extremeña que los autores del siglo XIX denominaron en “tapa de coche”, que presenta una forma general difícil de clasificar (Ger y Lóbez 1869, 256; Albarrán 1885, 88-89; Rabasa *et al.* 2022). Esta bóveda se forma con hiladas inclinadas que avanzan desde arcos perimetrales en los cuatro lados y se encuentran en costuras diagonales. Sin embargo, las hiladas no se encuentran alternativamente, sino por grupos, avanzando tres o cuatro hiladas de dos sectores opuestos antes de continuar con los otros dos (Figs. 16 y 17). Wendland (2007c) observó que, en este caso y en el del párrafo anterior, se reduce el número de ladrillos que necesitan ser cortados. Cuando los autores españoles del siglo XIX explican tanto la bóveda por arista como la llamada “tapa de coche”, se advierte un esfuerzo por asimilarlas a formas geométricas conocidas o a tipos de bóveda canónicos, como las bóvedas por arista convencionales o las bóvedas vaídas. Esto resulta difícil debido a las particularidades formales derivadas del proceso constructivo. La misma dificultad se presenta en las bóvedas de arista bizantinas, y aún más en las asombrosas formas libres que se construyen hoy día en México.



Figura 17. Bóveda en “tapa de coche” en la Casa del Mono, Cáceres

Referencias físicas

Choisy especula sobre el uso de cintreles para el control de la forma circular de las hiladas. Su reflexión sobre el sistema geométrico empleado en las bóvedas de cañón (Choisy 1883: 40) y su extensión a las bóvedas de arista de tipo bizantino (Choisy 1883: 53) es interesante y brillante. Sin embargo, aún no podemos corroborar la exactitud de ese análisis mediante levantamientos, ya que es uno de los temas que nuestro equipo está investigando actualmente.

Hay un hábito procedimental que podemos afirmar que existía hace décadas, o incluso en la Extremadura del siglo XIX, y que ha llegado hasta hoy. Se trata del control de las bóvedas de arista que son tradicionales en esa zona, en las secciones longitudinal y transversal y en las diagonales. Algunos testigos de la construcción de este tipo de bóvedas hace más de treinta años nos han contado cómo se elegían ramas finas y elásticas para doblarlas y situarlas en la línea que debían seguir las aristas. El maestro Portal hizo lo mismo, pero utilizando redondos metálicos (Fig. 4). Además, reprodujo el sistema que podemos ver en un dibujo de Paredes (Fig. 18), disponiendo un travesaño para colgar una plomada en la clave, desde cuya cuerda se tiraban otras hacia las claves de los arcos perimetrales. Así se controla el ascenso que debe tener la bóveda, al que, entre otras denominaciones, se ha llamado *retumbo*. Este es un control poco riguroso, especialmente cuando se busca obtener, en la sección, no dos rectas, sino una curva continua.

La materialización de las diagonales con ramas o redondos no es estrictamente necesaria si se sigue el mencionado esquema de Paredes. En dicho esquema, se aprovecha la verticalidad de la plomada central; en efecto, al situar el ojo de manera que la esquina de la bóveda quede alineada con el cordel, el plano visual determina si la arista se encuentra en la posición correcta. El control mediante planos visuales es algo común en los trabajos de talla de piedra, que requieren una mayor precisión. En cualquier caso, evidentemente, no es necesario que las cuatro costuras converjan en un solo punto.

Por el contrario, como hemos explicado, el maestro Flores no se servía de referencias físicas, aparte de las que le proporcionaban su propio cuerpo y el tramo de bóveda ya iniciado.

Conclusión

Es cierto que la variedad de formas de bóvedas por hojas es enorme y que, como en cualquier otra actividad manual, la destreza permite desarrollar soluciones más avanzadas. Sin embargo, es posible describir con claridad algunas condiciones básicas para su ejecución. En cuanto a la estabilidad, la aplicación de este tipo de bóvedas en obra nueva presenta los mismos desafíos que las bóvedas

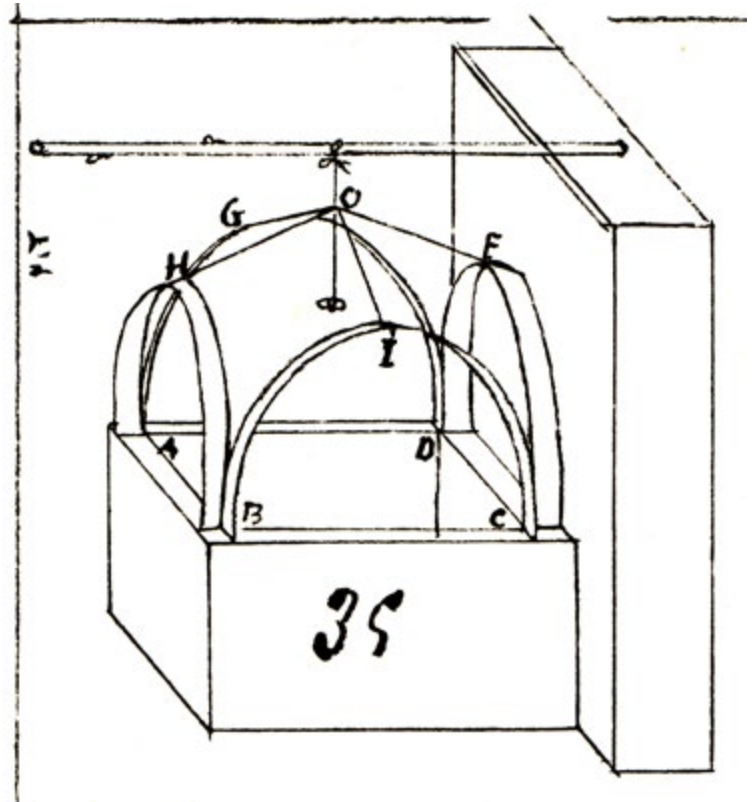


Figura 18. Dibujo de Paredes (1883) que muestra las cuerdas que guían la disposición de los ladrillos

tabicadas o cualquier otra construcción en piedra o ladrillo, es decir, los problemas derivados de la prevención hacia algo que no está contemplado en la normativa.

Estas bóvedas, al igual que las bóvedas nervadas de crucería gótica, demuestran que la forma no siempre es una idea geométrica más o menos regular que se materializa, sino que, en gran medida, está determinada por el proceso constructivo. Los autores del siglo XIX presentan explicaciones que están algo teñidas de idealismo, al asimilar las disposiciones a configuraciones geométricas preconcebidas.

Las breves explicaciones de dichos autores sobre procedimientos deben ser leídas con precaución. En las afirmaciones de albañiles actuales y de testigos de antiguas puestas en obra se otorga gran importancia a la intuición en todo el proceso, y no existe una guía de buenas prácticas que permita recuperar estos procedimientos. Tal guía debería, además, distinguir entre las condiciones necesarias para la ejecución y lo que serían hábitos particulares o ejemplos singulares, de manera que una mano de obra no específicamente cualificada en este sistema pueda sentirse capacitada para adoptarlo en obra nueva.

¹ Un problema que encontramos en este tipo de bóvedas es la falta de una denominación generalizada. Los autores españoles del siglo XIX fueron los primeros en utilizar el término “por hojas”; es semejante la expresión que empleará más tarde Auguste Choisy, *par tranches*. En nuestros

trabajos en inglés, hemos traducido este término como *by slices*. La profesora Lynne Lancaster distingue entre *vertical bricks* y *pitched bricks*. En México se habla de “ladrillo recargado”. Algunos lo han denominado “a bofetón”. Cuando se trata de bóvedas de cañón de sección más o menos parabólica, suelen denominarse “bóvedas nubias”. Estas últimas han sido recomendadas por Hassan Fathy y se utilizan en muchas iniciativas para el tercer mundo. Sin embargo, consideramos que para la recuperación de esta técnica sería también importante estudiar las bóvedas muy rebajadas, que son aplicables a una gran variedad de casos reales.

² Como las del alemán David Wendland (2007a; 2007b; 2007c), o las de los mexicanos Ramírez Ponce y Ramírez Meléndez (2012), y Aguirre (2016).

³ Este trabajo forma parte del Proyecto de investigación del Plan Estatal “La construcción de bóvedas de ladrillo por hojas. Usos históricos y posibilidades actuales” PID2020-116191 GB-I00, financiado por MCIN/AEI, <https://doi.org/10.13039/501100011033>. El equipo que desarrolla este proyecto, además de los trabajos sobre casos y zonas concretas que se citan en este artículo, ha organizado las experiencias que aquí se describen. En ellas han participado directamente Ana López Mozo, Miguel A. Alonso Rodríguez, Alberto Sanjurjo Álvarez, Rafael Marín Sánchez y Miguel Sobrino González. Hay que entender que se trata de una experiencia no cuantificable, es decir, no es una experimentación en el sentido estricto, ya que evalúa acciones, procesos y resultados en función de si son posibles o fáciles de realizar, sin requerir mediciones.

⁴ El arquitecto Mingong Chu está estudiando algunos ejemplos de los primeros siglos d.C.

⁵ El taller fue organizado en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid en el verano del 2023.

⁶ La experiencia se desarrolló en el verano de 2023, en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

⁷ También en las pequeñas bóvedas del pórtico herreriano de la Fuente Grande de Ocaña (Rabasa *et al.* 2023), aunque ese es un caso muy especial, ya que el rigor en el orden del aparejo las distingue de lo habitual.

⁸ En este punto, debemos corregir lo escrito en Rabasa *et al.* 2022, donde atribuimos erróneamente una menor velocidad a las declaraciones del profesor Ramírez Ponce, como él mismo nos ha advertido.

⁹ Esto da lugar a cambios bruscos en esa orientación de los planos de las hiladas. Por otro lado, si la orientación de los lechos se mantiene, pero la inclinación del intradós va cambiando, en algún punto de este último aparece un escalonamiento de las hiladas.

¹⁰ Considerando que el límite de esbeltez para un arco sometido a su propio peso es de un dieciocho de la luz, con ladrillos convencionales no se debería superar una luz de dos metros, sin tener en cuenta la plasticidad del mortero fresco en las juntas.

¹¹ Como se mencionaba en la nota 1, las bóvedas de cañón con perfil parabólico suelen llamarse bóvedas nubias. Recientemente, estas han sido objeto de experiencias para la construcción en el tercer mundo. En ellas con frecuencia el mortero es de barro.

¹² Hay que recordar que la fuerza ejercida por una ventosa depende de la superficie de contacto. Una superficie perfectamente plana y una ventosa elástica lisa garantizan que el aire no pueda entrar por el perímetro. En el caso del ladrillo, esto se confía a la adaptación de la pasta a las pequeñas irregularidades de la superficie y a una rápida disminución de su fluidez.

¹³ Otro factor que puede resultar favorable es la elevada exigencia de la industria actual en cuanto al molido del cemento, lo que mejora la finura de la pasta, un aspecto deseable en nuestro caso.

¹⁴ Si un cono de revolución se desplaza en el sentido de su eje, las superficies de las dos posiciones son paralelas. Sin embargo, en el caso de las hiladas troncocónicas inclinadas, el eje está inclinado y el desplazamiento es horizontal.

¹⁵ Por otra parte, la simple observación de que, en muchas bóvedas extremeñas, la curva aparente del borde de la hilada se encuentra en un plano casi horizontal, hace imposible que la superficie del lecho sea convexa, e incluso que sea plana, ya que los ladrillos no cabrían en una sección longitudinal. Por lo tanto, debe tratarse de un tronco de cono cóncavo, como explica Paredes.

¹⁶ Wendland (2007b) ha analizado un tipo de bóveda similar en Irán, en el cual la superficie del intradós se levanta tangente al paramento vertical del muro. En México, estas bóvedas suelen apoyarse en zunchos de hormigón horizontales que coronan los muros, y no es conveniente que alcancen una gran flecha. Por esta razón, se renuncia a esa posible tangencia, y los paños arrancan con cierta inclinación.

¹⁷ La parábola es citada por Javier Seguí (2012: 19-20) en relación con la actividad manual.

References | Referencias | Referências

- Aguirre Morales, Ramón. 2016. *Bóvedas mexicanas de adobe y ladrillo*. Oaxaca: Carteles Editores-P.G.O.
- Albarrán, José. 1885. Bóvedas de ladrillo que se ejecutan sin cimbra. *Memorial de Ingenieros del Ejército*, 8: 85-96.
- Choisy, Auguste. 1883. *L'Art de bâtir chez les Byzantins*. París: Librairie de la Société Anonyme de Publications Périodiques.
- Choisy, Auguste. 1876. Note sur la construction des voûtes sans cintre pendant la période byzantine. *Annales des Ponts et Chaussées*, vol. 5, 12: 439-449.
- Ger y Lóbez, Florencio. 1869. *Manual de construcción civil*. Badajoz: Imprenta de Don José Santamaría.
- López-Mozo, Ana; Alonso-Rodríguez, Miguel Ángel; Martín-Talaverano, Rafael; y Aliberti, Licinia. 2021. Brick vaults by slices in Toledo. En Mascarenhas-Mateus, João et al. (eds.), *History of Construction Cultures: Proceedings of the 7th International Congress on Construction History*, 674-681. Lisboa: CRC Press.
- López-Mozo, Ana; Rabasa-Díaz, Enrique; Calvo-López, José; et al. 2022. Geometry and Actual Construction in Brick Vaults by Slices: The Case of Carranque in Spain. *Nexus Network Journal*, 24: 641-655.
- López-Mozo, Ana; Alonso-Rodríguez, Miguel Ángel; González Uriel, Ana; Aliberti, Licinia; Sánchez, Manuel de Miguel; y Perelló Ocaña, Marta. 2023. Forma y construcción en bóvedas de ladrillo por hojas: el caso de Cáceres. *EGA, Expresión Gráfica Arquitectónica*, 49: 62-75.
- Marín-Sánchez, Rafael; Sánchez, Manuel de Miguel; Navarro Camallonga, Pablo; y La Spina, Vincenzina. 2021. Compound brick vaults by slices in written sources. En Mascarenhas-Mateus, João et al. (eds.), *History of Construction Cultures: Proceedings of the 7th International Congress on Construction History*, 658-665. Lisboa: CRC Press.
- Paredes, Vicente. 1883. *Construcción sin cimbra de las bóvedas de ladrillo con toda clase de morteros* (manuscrito). Cáceres: Archivo Histórico Provincial.
- Rabasa Díaz, Enrique; López-Mozo, Ana; y Alonso-Rodríguez, Miguel Ángel. 2020. Brick Vaults by Slices in Choisy and Paredes. *Nexus Network Journal*, vol. 22, 4: 811-30.
- Rabasa Díaz, Enrique; González-Uriel, Ana; Gil Crespo, Ignacio Javier; y Sanjurjo Álvarez, Alberto. 2021. Geographic and chronological extent of brick vaults by slices. En Mascarenhas-Mateus, João et al. (eds.), *History of Construction Cultures: Proceedings of the 7th International Congress on Construction History*, 126-133. Lisboa: CRC Press.
- Rabasa Díaz, Enrique; López-Mozo, Ana; and Alonso-Rodríguez, Miguel Ángel. 2022. Técnica y forma del sistema de bóvedas de ladrillo por hojas en las fuentes escritas. En Portal, Pedro et al. (eds.), *Actas del Duodécimo Congreso Nacional y Cuarto Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción*, 939-948. Madrid/Mieres: Instituto Juan de Herrera.

- Rabasa Díaz, Enrique; López Mozo, Ana; y Calvo López, José. 2023. El orden en la ejecución de bóvedas de ladrillo: los casos de la Fuente Grande de Ocaña y el Ayuntamiento de Toledo. *Cuaderno de Notas*, 24: 30-41.
- Ramírez Ponce, Alfonso; y Ramírez Meléndez, Rafael. 2012. Curves of Clay: Bóvedas del Bajío. *Nexus V: Architecture and Mathematics*: 143-154.
- Ruiz-Agudo, Encarnación; y Rodríguez-Navarro, Carlos. 2010. Micro-structure and Rheology of Lime Putty. *Langmuir*, vol. 26, 6: 3868-3877.
- Seguí de la Riva, Javier. 2012. *Dibujar, proyectar LIII*. Pedagogía. Madrid: Juan de Herrera.
- Wendland, David. 2007a. *Lassaulx und der Gewölbebau mit selbsttragenden Mauerschichten*. Petersberg: Michael Imhof.
- Wendland, David. 2007b. The vaults in “Sistani’s House” in Bam Citadel (Iran): Construction principles, shape geometry and design for reconstruction. En Jäger, Wolfram (ed.), *Interim Report for a Rehabilitation Project for Sistani’s House, Bam Citadel*, 48-51. Radebeul: Jäger Consulting Engineers.
- Wendland, David. 2007c. Traditional Vault Construction Without Formwork: Masonry Pattern and Vault Shape in the Historical Technical Literature and in Experimental Studies. *International Journal of Architectural Heritage*, vol. 1, 4: 311-365.

Biography | Biografía | Biografia

Enrique Rabasa Díaz

Es Arquitecto y Catedrático en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid (ETSAM-UPM). Imparte docencia en el Grado en Fundamentos de la Arquitectura, en el Máster en Conservación y Restauración del Patrimonio, y en el programa de doctorado sobre el Patrimonio. Ha investigado sobre la historia de la geometría descriptiva y la historia de la construcción, con un enfoque especial en la estereotomía y la talla de piedra. Dirige un Taller de Cantería en la ETSAM, donde los estudiantes siguen el proceso completo de las técnicas históricas de construcción en piedra y ladrillo. Desde allí se desarrolla una labor investigadora práctica.