



Estereotomía y cálculo de estructuras en la reconstrucción de una bóveda del siglo XVIII: Pazo de Antequera (A Coruña)

Santiago Huerta Fernández y Enrique Rabasa Díaz

DESCRIPTORES

ESTEREOTOMÍA
CÁLCULO DE ESTRUCTURAS
CANTERÍA
BÓVEDAS
ARCOS
HISTORIA
ANÁLISIS LÍMITE

El pazo de Rois, construido en el siglo XVIII cerca de Padrón, incluye una capilla exenta de una sola nave, cubierta con una bóveda de cañón de sillería en granito que se estrecha algo en el altar, dividida en tramos con arcos perpiaños y contrafuertes al exterior, e iluminada con lunetos. Hallándose en ruina, se nos pidió la redacción de un informe, y tras éste el proyecto de restauración, que dirigió Santiago Huerta. Se trata de una intervención técnica que se enfrenta casi exclusivamente a problemas de estabilidad y de estereotomía; pensamos que puede ser interesante la exposición breve del análisis realizado y la experiencia del proceso, e incluso de las posibilidades contempladas y finalmente rechazadas.

Datos

Avanzando de los pies a la cabecera (Fig. 1) hay un primer tramo rectangular en bóveda de cañón (6,80 m de luz), el siguiente presenta lunetos, y en el tercero una superficie abocinada da paso al tramo del altar (4,60 m de luz), éste también con lunetos. Al reconocer la bóveda por primera vez, su derrumbe se había extendido ya a casi toda la planta, como se puede ver en la figura 2. Habían caído dos de los perpiaños y con ellos parte del tramo de lunetos, la superficie de transición y el tramo del altar, con un total de unos 160 sillares. Así que solo mantenía su integridad el primer tramo, pero su sección originalmente semicircular había quedado deformada hasta parecer un arco carpanel, presentando el agrietamiento característico derivado de la separación de los apoyos: grieta abierta hacia abajo en la clave y hacia arriba en los riñones (Fig. 3).

Hay referencias documentales sobre la mala calidad del terreno y la dificultad, en su momento, de encontrar el firme. De algunas fotografías y el testimonio del guarda de la finca,

supimos que el hundimiento se había producido en dos fases; cayó primero uno de los perpiaños, dejando un hueco al arrastrar parte de los tramos adyacentes, y algunos años después se derrumbó el resto.

De la armadura de la cubierta, que comenzó a deteriorarse gravemente en los años sesenta, quedaban solo un par de tirantes enterizos de madera, curiosamente curvados (Figs. 4 y 5) para que, disponiendo la concavidad hacia abajo, los apoyos del cuchillo pudieran quedar más bajos que el trasdós de la clave de la bóveda, sobre el cual pasaba la pieza.

La separación de los apoyos de la bóveda, es decir, de la coronación de los muros, no era evidente a la vista, aunque habría de existir, a juzgar por las deformaciones del tramo de cañón que quedaba en pie. En consecuencia, el estudio de desplomes y agrietamientos de los muros era fuente imprescindible para comprender el hundimiento. Pero esta importante toma de datos no requirió otro equipo que una plomada y una regla.

La bóveda se apoya en muros de unos 6,60 metros de altura y espesor aproximado 165 centímetros en la parte ancha y 125 centímetros en el altar. Está reforzada por contrafuertes de sillería alineados con los arcos perpiaños, y de la ausencia de un correcto enjarje en la unión de muros y contrafuertes se infiere que fueron añadidos posteriormente a la construcción. La figura 6 muestra los desplomes medidos, así como la manera en que los dos testeros, también desplomados hacia el exterior, se han desgajado de los muros longitudinales. Los muros ofrecen al exterior hojas de mampostería careada y, como era habitual, en el interior un relleno de cal y cascotes. Se observa una diferencia de desplomes exteriores e interiores en un mismo lugar, evidenciando que los muros al girar además se han deshojado, probablemente por la carencia de oportunos sillares perpiaños que enlacen sus capas.

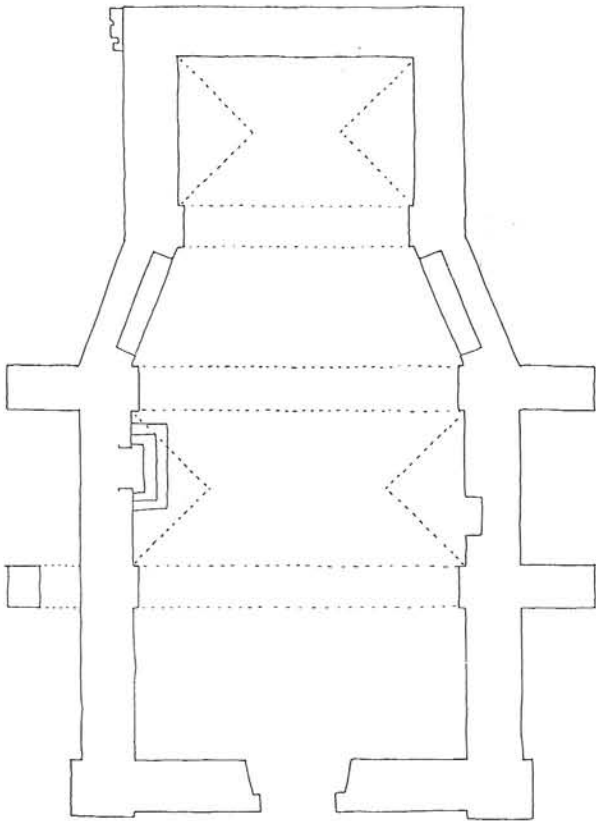


Fig. 1. Planta.



Fig. 2. Aspecto de la ruina.

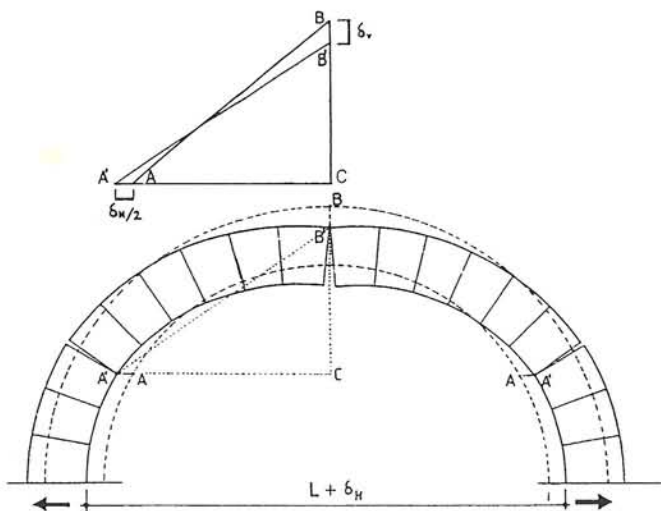
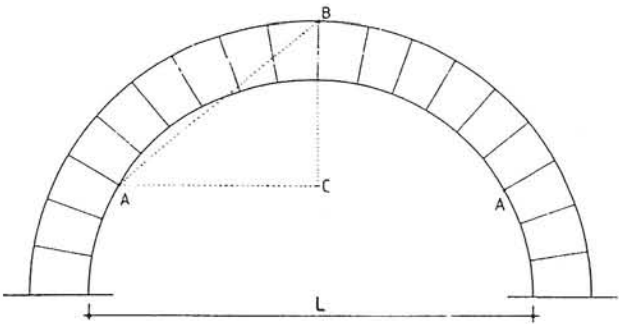


Fig. 3. Agrietamiento de un arco o bóveda de medio punto por apertura de los apoyos.



Figs. 4 y 5. Tirante de madera sobre la ruina de la bóveda.



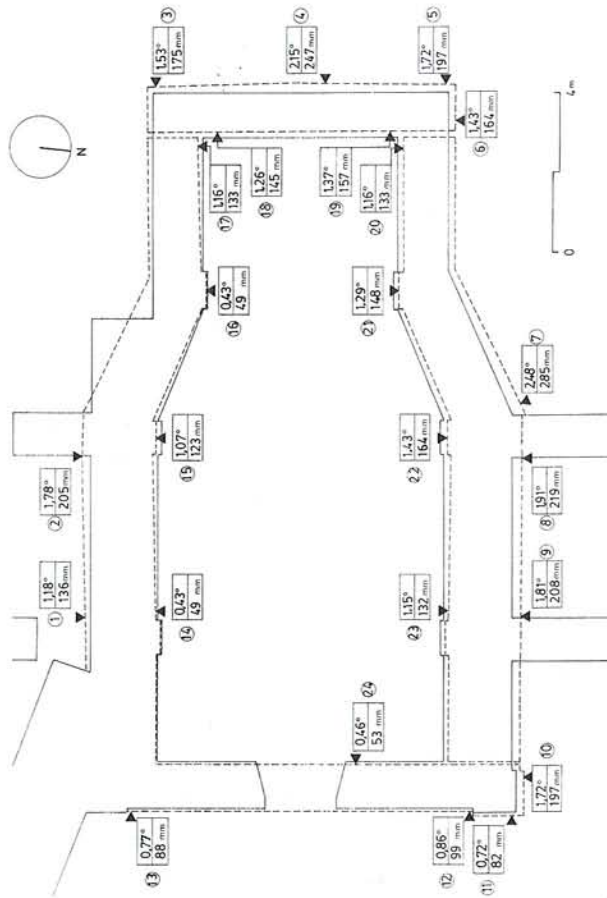


Fig. 6. Desplomes en los muros.

Restitución teórica de la forma

El tramo que se mantenía en pie tenía una apariencia carpnel, aunque las grietas delataban que había sido originalmente semicircular, perdiendo su forma con la separación de los apoyos. Del siguiente quedaban, incompletos y en precario equilibrio, los lunetos.

Ahora llamamos lunetos a la intersección de dos cañones de distinta flecha, cuyos ejes se cruzan ortogonalmente y que tienen su arranque al mismo nivel; habitualmente se trata del cañón de la nave y el cañón menor de un hueco lateral semicircular. Pero en España abunda un tipo de luneto semejante, aunque más práctico y menos geoméricamente ideal. Si en

aquel modelo teórico la intersección de los dos cilindros genera una línea alabeada, en éste la línea de intersección se define previamente como dos secciones verticales del cañón principal, unidas en un punto anguloso y aparentando una forma de V, y el cañón secundario no es ya un cilindro, sino una superficie reglada que se apoya en esas líneas y en el arco de la ventana. En consecuencia, se simplifica la ejecución de la arista y se emplea una superficie geoméricamente menos regular, pero fácil en la práctica de la cantería o la albañilería (Fig. 7).

La diferencia más notable entre los dos tipos de luneto –también se decía antiguamente *luneta*– es que en el primero el cañón menor es cilíndrico y presenta, por tanto, una hilada de clave horizontal, mientras que en el segundo la línea correspondiente del mismo lugar debe enlazar la clave del arco de la ventana con el vértice de las aristas, el cual se encontrará más alto. Por eso a este segundo tipo podríamos llamarlo luneto capialzado, que es el adjetivo que designa a las superficies, arcos o bóvedas, que ascienden de una embocadura a otra.

También el tipo clásico se ha dado en España desde antiguo, aunque en los tratados de cantería renacentistas aparece con la denominación de *arco avanzado* (que avanza o acomete sobre la superficie de un cañón). Para distinguir uno de otro se ha de observar la pendiente de la hilada de clave, horizontal en el arco avanzado e inclinada en el luneto capialzado; o bien la forma de la arista, que en el primero se proyecta en planta como un arco de hipérbola y en el segundo como dos rectas convergentes, permaneciendo las ramas correspondientes sobre planos verticales; o la apariencia del vértice de esta línea, redondeado o presentando un quiebro, respectivamente.

En nuestro caso las ventanas eran semicirculares, pero algo peraltadas, para paliar la ocultación de la cornisa que corona el muro, y a la vez adelantadas respecto al paramento bajo la cornisa, para disimular los problemas que genera este peralte (Fig. 8). Por todos estos motivos se alteraba la apariencia de la línea de intersección, especialmente en la zona del arranque, que debía ser la menos afectada por los movimientos, la más fiable. Por otra parte, la deformación general del tramo y su precario equilibrio, que desaconsejaba la observación atenta desde su parte baja, dificultaban, en principio, reconocer el tipo.

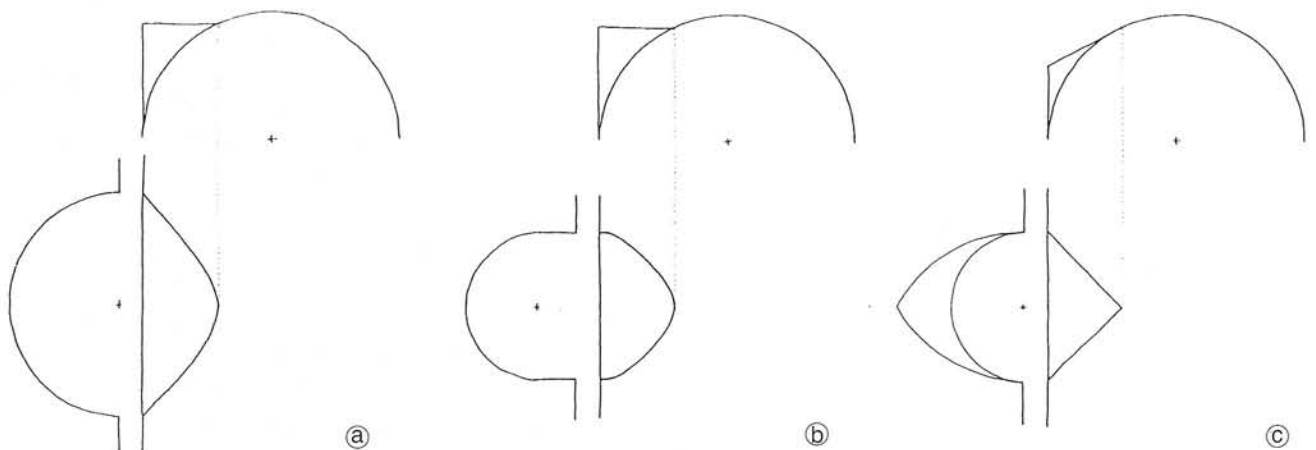


Fig. 7. Tipos de luneto; (a) intersección de cilindros; (b) id. peraltado; (c) luneto capialzado.

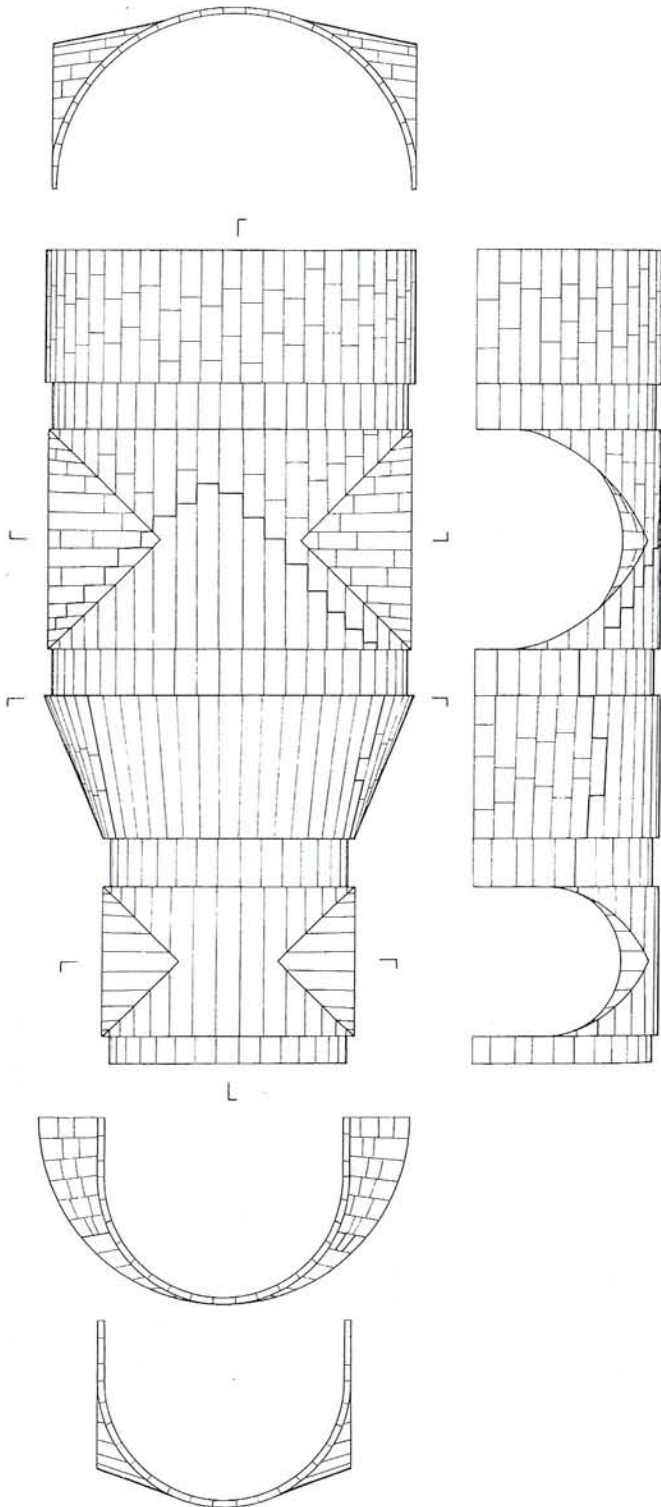


Fig. 8. Restitución del despiece.

En el momento de la inspección de la ruina los lunetos presentaban una línea de cumbrera sensiblemente horizontal (Fig. 9); de haber sido horizontal también originalmente, la importante dislocación sufrida por el tramo hubiera inclinado hacia abajo esta línea, así que se concluyó que se trataba de lunetos capitalzados (aunque con el capitalzo atenuado por el peralte de las ventanas). En el último tramo los lunetos debían de ser del mismo tipo que en el segundo. En ambos casos la proyección en planta de sus aristas serían líneas a 45° con los ejes principales, como es habitual.



Fig. 9. Aspecto de los lunetos antes de la restauración, en muy precario equilibrio.



Fig. 10. Restos de la reglada de transición.

El tramo abocinado que da paso al altar enlazaba un peripiaño semicircular con otro peraltado. No se trataba de una superficie cónica, sino de una reglada alabeada, de la que no conocemos antecedentes en la teoría ni en la práctica. Ensayando varias opciones para la definición de esta reglada se consideró que la más probable, además de coherente con la apariencia de las hiladas que permanecían en su lugar (Fig. 10), era la que consiste en dividir en el mismo número de partes iguales (impar) las dos directrices y enlazar los puntos correspondientes. La superficie de los lunetos podía ser una reglada construida con los mismos criterios: las líneas de junta del cañón marcan puntos en las aristas del luneto, y la superficie reglada resulta de unir estos puntos con los que marca la división en partes iguales del arco formero.

Los procesos de formación de superficies descritos hacen pensar que en el trabajo de cantería se prefirió una labra a partir de la toma de datos in situ, más que el seguimiento de cuidadosas montañas previas. Por otra parte, el examen de las dovelas desde el trasdós revelaba una labra muy poco cuidada en las superficies no vistas, incluso en los lechos de apoyo entre dovelas, cuyas irregularidades se rellenaron a veces con ripio o fragmentos de conchas. Se trata, pues, de un trabajo dirigido a evitar la precisión y el proyecto previo detallado propio de una estereotomía ortodoxa. En general el uso de una piedra dura, como es el granito, permite el descuido



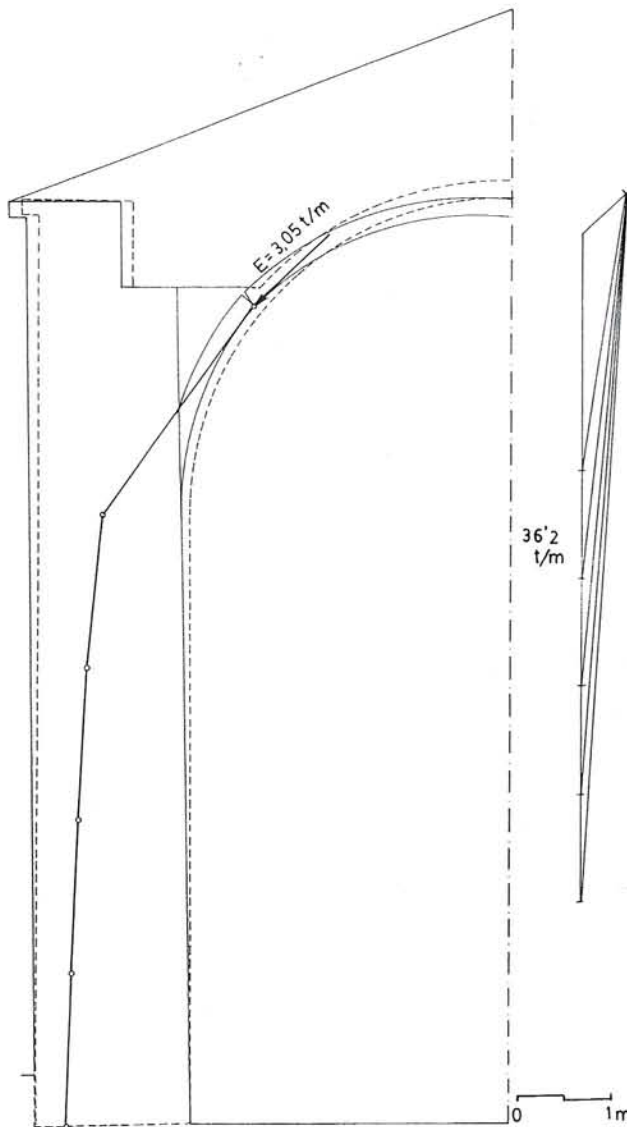


Fig. 11. Estabilidad de una rebanada de la bóveda de cañón del coro.

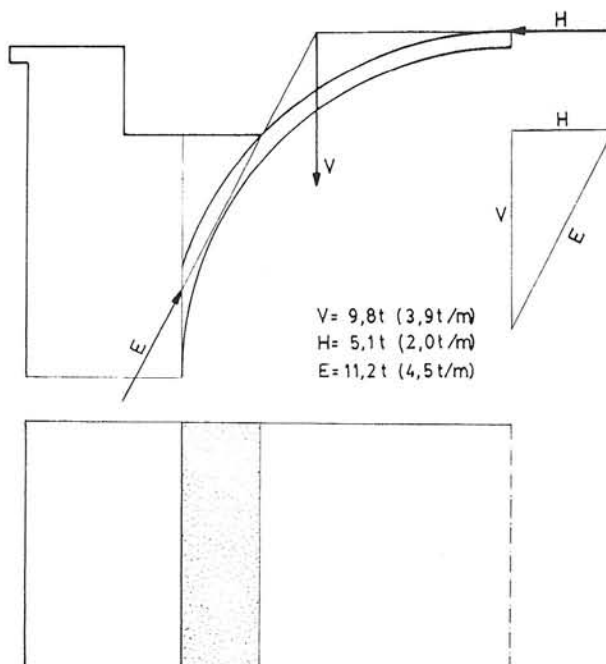


Fig. 12. Empujes y equilibrio de la bóveda del coro.

de la labra en los planos de junta, y la reducción del espesor de los bolsos, de manera que el proceso se puede entender como un forrado en piedra de las cimbras, centrando el problema en la definición de esas superficies, que serán las aparentes; casi como un arte de sastrería.

Estabilidad

El estudio morfológico determinó la forma original de manera suficiente para el análisis de su estabilidad, pues las posibles alternativas a las formas descritas no presentaban importantes diferencias de cara al cálculo. Pero a lo dicho hay que añadir detalles de la construcción que sí son relevantes para este análisis, como la presencia de un relleno de mampostería que cubre los riñones de la bóveda hasta, aproximadamente, dos tercios de su flecha. Este relleno es estructural y casi podríamos considerar que el tramo correspondiente es una prolongación del muro y la bóveda real es solo la parte superior. Al desplazarse los muros hacia fuera, inevitablemente se forman dos articulaciones hacia esa altura de los dos tercios, que marcan la extensión de lo que actúa realmente como bóveda, una bóveda rebajada que requiere un espesor muy pequeño. Hay que distinguir también entre el espesor aparente y el espesor mecánico o eficaz de la bóveda. Como decíamos, la labra de las superficies ocultas es muy tosca, de manera que, si bien el grosor aparente de los bolsos es de unos 25 centímetros, la superficie de apoyo real de las juntas se reduce a unos 18 centímetros. Empleábamos el primero para estimar el peso de la bóveda y el segundo para el cálculo de la estabilidad.

Se analizó la bóveda del coro —la que no había caído— en su estado actual, empleando la conocida técnica de la línea de empujes, analítica y gráficamente; la figura 11 muestra cómo la distancia del empuje al borde de la base es de un cuarto del espesor del muro. Se analizó también en su estado original, sin deformar y sin contrafuertes; en este caso no hace falta calcular la línea de empujes, pues, conocido el centro de gravedad de la semibóveda con relleno, y sabiendo que la línea de empujes tenderá, tras un pequeñísimo desplazamiento de los muros, a buscar la situación de empuje mínimo, basta trabajar con las resultantes, como se ve en la figura 12. La representación gráfica permite apreciar que, dado que el peso V y su situación son fijos, el rango de variación del empuje es muy pequeño y no merece un cálculo más afinado. En la figura 13 se muestra la línea de empujes correspondiente, que queda dentro del tercio central.

El análisis de las bóvedas simples, de cañón, es idéntico al análisis de arcos. Si la bóveda es compuesta es preciso descomponerla en una serie de arcos para su análisis. Esta ha sido la práctica habitual desde el siglo XVIII. La técnica consiste en imaginar la bóveda dividida en una serie de segmentos (arcos), estudiar primero el equilibrio de cada uno de ellos y, después, el equilibrio del conjunto. La validez del procedimiento se basa en el "Primer teorema del análisis límite"; al dividir la bóveda estamos dando una solución posible de equilibrio, respecto a la cual podemos establecer la seguridad, y esto es lo único que necesitamos. Otro enfoque válido,

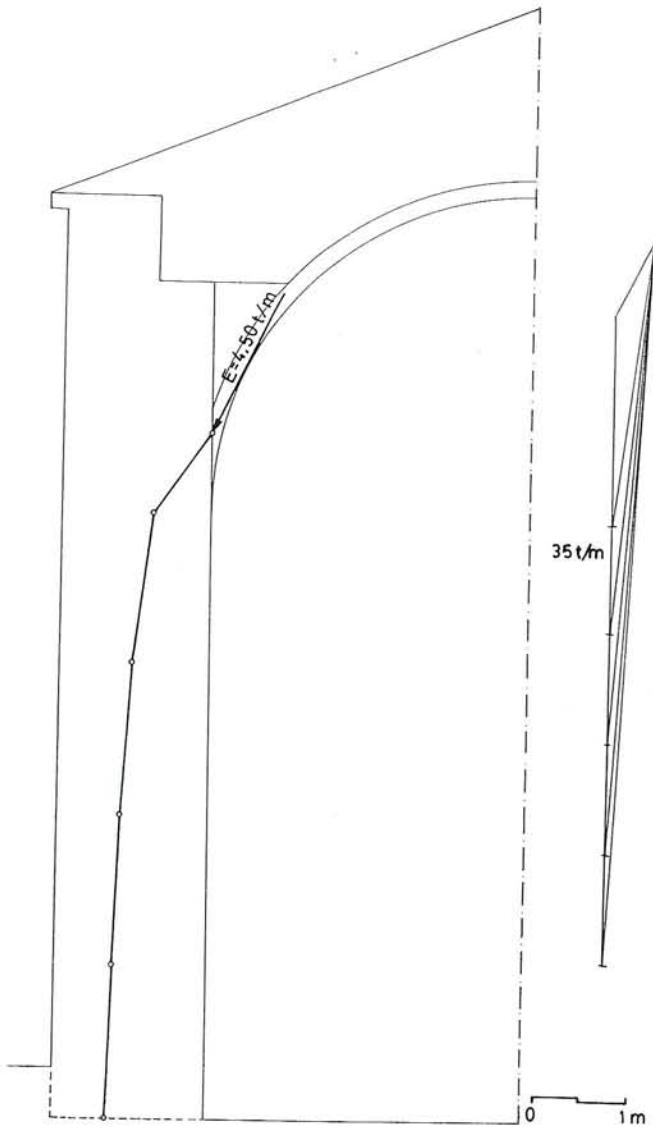


Fig. 13. Estabilidad de una rebanada de la bóveda de cañón del coro, sin deformar.

cuando se trata de obtener un valor suficientemente aproximado del empuje, es el que acabamos de emplear, calcular los pesos y centro de gravedad de la semibóveda y establecer el equilibrio global. Encontramos el centro de gravedad local dividiendo la semibóveda en segmentos simples (el procedimiento se explica en cualquier libro de Estática). Así se procedió con el segundo tramo, el de los lunetos. La figura 14 muestra el valor del empuje E. Para una discusión detallada de ambos métodos tomando como ejemplo una bóveda de crucería cuatrigartita, véase Heyman (1996).

Se estudió entonces la estabilidad de los primeros contrafuertes. El primer teorema del análisis límite nos permite elegir cualquiera entre las infinitas soluciones de equilibrio que representan caminos para que estos empujes lleguen al terreno; en este caso se ha supuesto que el espesor del muro contiene un arco adintelado que transmite la carga lineal del empuje de las bóvedas hasta los contrafuertes. La figura 15 muestra una solución de equilibrio para la sección sin deformar, con los muros aplomados; a la izquierda las líneas de

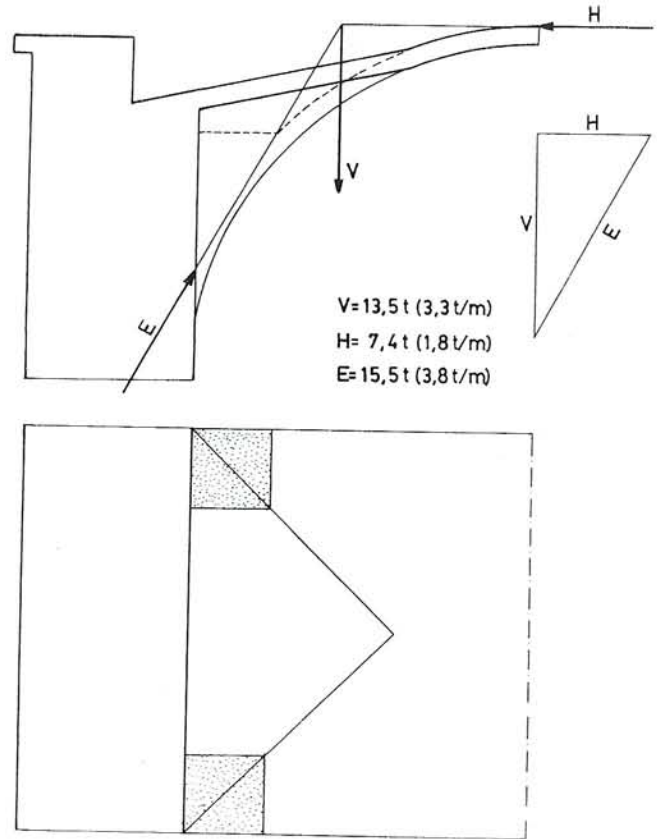


Fig. 14. Empuje de la bóveda intermedia, de cañón con lunetos.

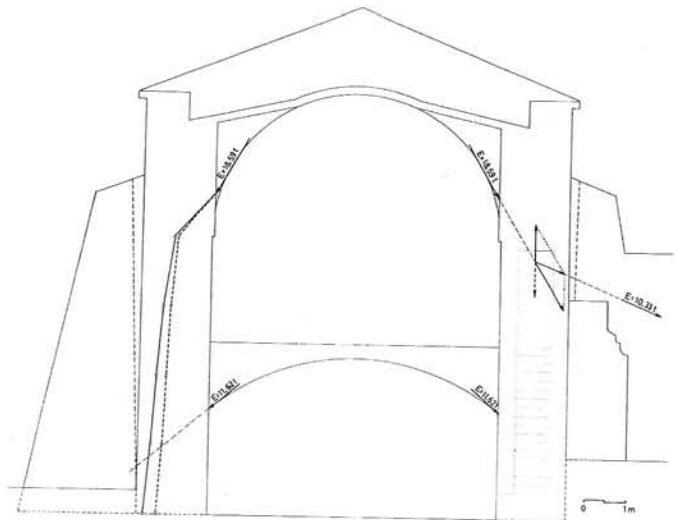


Fig. 15. Estabilidad de los primeros contrafuertes.

empujes con y sin contrafuerte (a puntos), a la derecha un muro del pazo anexo que acomete dejando un paso y que actúa como un buen estribo. De nuevo la situación inicial es buena.

La ruina vino precedida del hundimiento de la cubierta. Heyman (1993) ha estudiado este problema para una bóveda gótica cuatrigartita, considerando el peso de la cubierta en varias posiciones y también el debido a la entrada del agua. Las cargas de colapso son del orden del peso de la cubierta.

En nuestro caso, y para este tramo de los lunetos, se tanteó el análisis con algunas simplificaciones: se consideró que la bóveda es de cañón, en su situación sin deformar, y se su-



puso que la techumbre, al hundirse, aplica una carga puntual en la clave. En esas condiciones la carga de colapso local es del orden del doble del peso de la cubierta, que es la que recibiría si, por ejemplo, se pudieran los encuentros de los pares con el tirante, o si éste fallara por cualquier motivo. La figura 16 muestra la situación de colapso con su correspondiente mecanismo de hundimiento.

En cuanto a la bóveda abocinada del tercer tramo, se procedió a dividir su longitud en tres segmentos (evidentemente el número de cortes podría aumentar a voluntad). Como en los análisis anteriores, la situación inmediatamente posterior al descimbrado era buena. Para analizar los segundos contrafuertes se supuso, como antes, que los pesos y empujes se sitúan en su plano medio, y en la hipótesis más desfavorable de que el empuje horizontal de la mitad de la bóveda del presbiterio se transmite en virtud del quiebro de los muros.

La figura 17 muestra los resultados de los análisis para la bóveda del presbiterio, a la derecha solo con el peso de la bóveda y a la izquierda tras el hundimiento de la techumbre. En este segundo caso el peso de la cubierta provoca el giro del muro. Aquí el colapso no es local, sino debido a la apertura

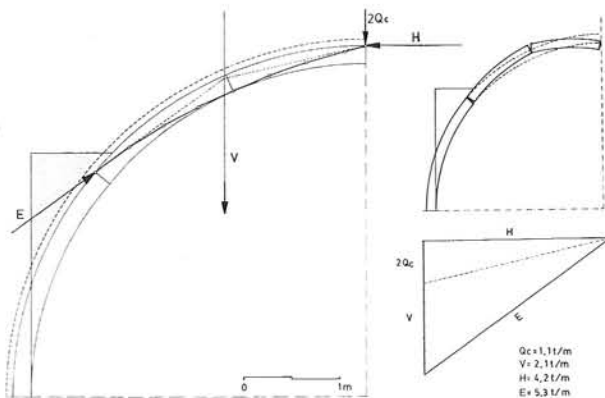


Fig. 16. Carga de hundimiento y mecanismo de colapso de la bóveda intermedia.

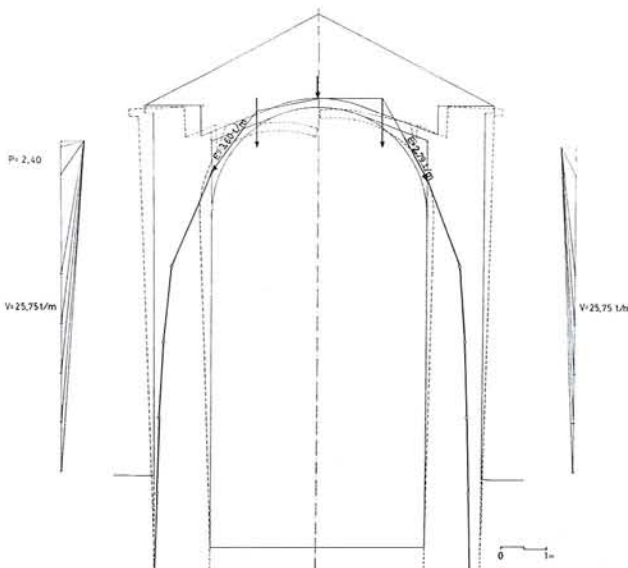


Fig. 17. Bóveda del presbiterio, a la izquierda con hundimiento de la techumbre.

de los muros de apoyo. Los desplomes son del mismo orden que en los tramos anchos, pero la bóveda es más pequeña, y la apertura límite para que se produzca el hundimiento por dislocación es función directa de la luz.

Ninguno de los desplomes es crítico para los muros, pero sí lo ha sido para las bóvedas.

Hipótesis sobre el proceso de ruina

La ausencia de un registro continuo de la evolución de los daños solo permitía realizar consideraciones generales; terminado el informe, aparecieron algunas fotografías que confirmaban nuestros supuestos: el proceso de ruina, habiendo sido evitable, se aceleró sin embargo en fechas muy recientes.

La capilla se debió de construir sin contrafuertes, fiando la estabilidad al grueso de los muros, que es alrededor de un cuarto de la luz. Vemos en el análisis de la estabilidad que este espesor es suficiente para resistir el empuje. Pero tradicionalmente los tratados de construcción han recomendado adoptar un espesor mayor, un tercio de la luz, previniendo circunstancias inconvenientes, como el mal estado de la cimentación. En nuestro caso, los muros laterales empezaban a desplomarse hacia fuera no mucho tiempo después de la construcción, por este motivo o por la mala calidad de la construcción del muro, iniciando la apertura de las grietas de la bóveda y el desgaje de los muros de fachada y cabecera. A la vista de esto y en fecha no determinada se añadirían los cuatro grandes contrafuertes. Pero en esta situación la bóveda se encontraba segura, hasta que, en la década de los sesenta, comenzaron a manifestarse algunos daños como consecuencia de la degradación de la cubierta. Ya en los años ochenta una parte de la techumbre se hunde y el impacto provoca el colapso de la bóveda en su parte central. La capilla sigue abandonada y el resto de la techumbre se apoya sobre lo que queda del cañón, que resiste la carga. En la zona de la cabecera, peor estribada, el empuje adicional sigue abriendo los muros, se desgaja el testero casi por completo y finalmente se hunde casi toda la bóveda. Desde entonces los muros quedan además expuestos a las inclemencias del tiempo en su parte alta. Así pues, la bóveda colapsó por causas externas, y podemos decir que no resultó muy fácil alcanzar la ruina.

Aplome de los muros

Para restituir la bóveda en su geometría original era preciso aplomar los muros de nuevo. O bien, admitir el desplome y definir nuevas secciones transversales que permitan adaptar las piedras que quedan de la antigua bóveda; en este caso, para compensar las diferencias, variando el espesor de las juntas o labrando de nuevo las piedras. Examinemos la primera opción.

Por lo que sabemos no es una operación que se realice hoy día con frecuencia en los trabajos de restauración, pero encontramos un precedente muy interesante en el tratado de Fray Lorenzo de San Nicolás (1639), en su capítulo 52, donde "trata de los daños que sobrevienen a los edificios, y de sus remedios":

"Si algún lienzo de pared se trastornare por largo que sea y alto, es fácil enderezarle, apoyándole hacia el lado que se cae con vigas a trechos, y después por la parte contraria de

donde se trastorna, hacerla una roza por el pie della, que vaya toda la pared a la larga, y que no entre la roza más que el tercio del grueso de la pared: y después irás a estar su plomo: y macizando la roza quedará derecha la pared y segura. Y he hecho esto en lienzos de más de setenta pies [20 m] de largo, y hoy están seguros”.

El texto habla de esta vuelta a la verticalidad como de algo habitual, y es especialmente interesante la recomendación de realizar una roza en la base del muro.

En general, hay dos formas de enderezar algo, empujar o tirar. Podemos, como sugiere Fray Lorenzo, empujar con puntales apoyados en el terreno, o bien colocar un tirante horizontal. En el primer caso hay que decidir el punto de aplicación y el ángulo de inclinación del puntal; en el segundo, suponiendo horizontal el tirante, hay que decidir el punto de aplicación.

El análisis es estático y en la figura 18 (a) se han representado todos los parámetros que influyen en el problema. Tomaremos como base la altura h y pondremos el resto de las distancias en función de h mediante factores adimensionales, tal y como aparece en la figura. Si definimos, mediante x_b , la distancia a la que debe pasar la resultante por la base, podemos calcular el valor de T y la trayectoria de las cargas dentro del muro. Tomando momentos respecto a R :

$$T \cdot h \cdot (1 - \alpha) = P \cdot (x_b - d/2) \quad (1)$$

donde P es el peso total del muro, $P = h \cdot d \cdot \gamma$ (donde γ es el peso específico del muro). De (1) sacamos el valor de T . Antes de seguir hay que realizar una comprobación: que la resultante de las fuerzas inmediatamente por debajo del tirante no está fuera del cono de rozamiento; en caso contrario el tirante arrastraría la parte superior, produciéndose un fallo por deslizamiento (hemos supuesto, como es habitual, la cohesión nula). Si llamamos P'' al peso de la parte de muro situada por encima del tirante, se tendrá que verificar que:

$$T/P'' < \mu \quad (2)$$

donde μ es el coeficiente de rozamiento del material del muro.

Ahora podemos hallar la ecuación de la línea de empujes producida en el interior del muro por la tracción T del tirante. Tomando el origen en O y los ejes x e y como indica la figura:

$$T \cdot y = (x - d/2) \cdot P' \quad (3)$$

donde $P' = (y + h \cdot \alpha) \cdot d \cdot \gamma$, peso del muro situado por encima del plano horizontal definido por y . Despejando la x :

$$x = (T \cdot y + P' \cdot d/2)/P' \quad (4)$$

ecuación, $x = f(y)$, de una hipérbola con origen en el punto A .

La resolución gráfica se explica por sí misma y se ha dibujado en la figura 18 (b), para el caso de $x_b = d$. En la figura 19 se ha aplicado la resolución analítica al caso de uno de los muros laterales; $h = 10$ m; $\alpha = 0,25$; $\gamma = 0,165$; y peso específico de $2,16$ t/m³.

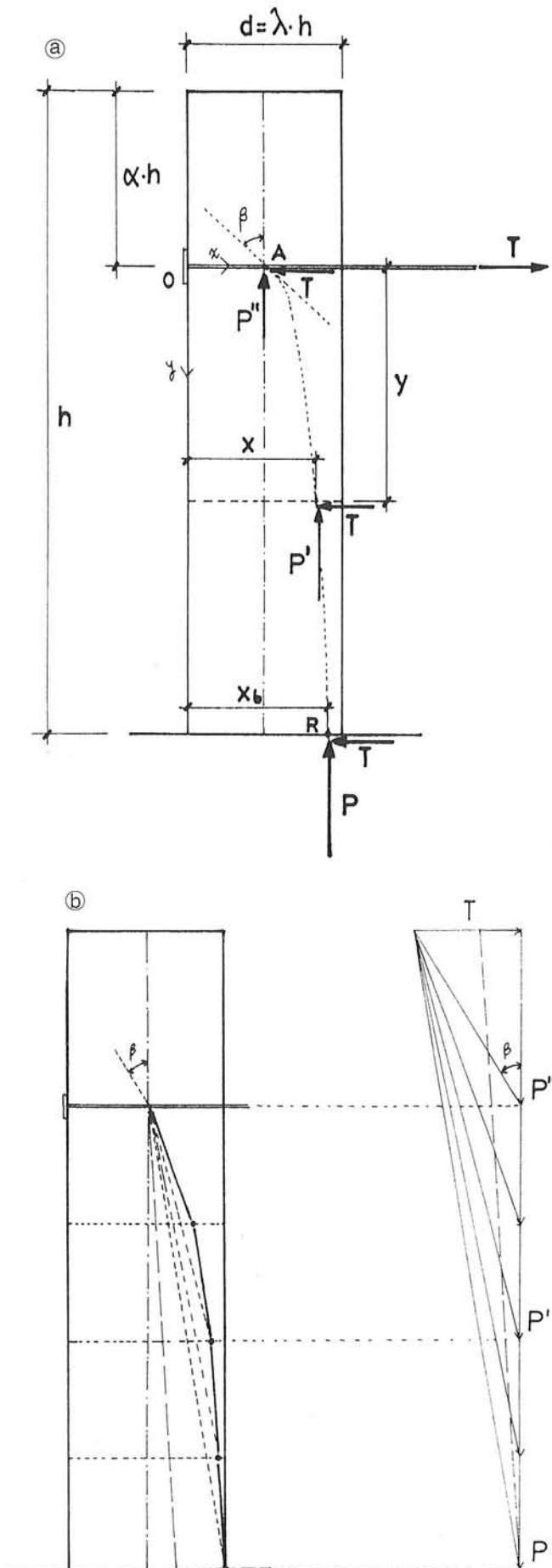


Fig. 18. Tirante horizontal para aplomar un muro: (a) método analítico; (b) gráfico.

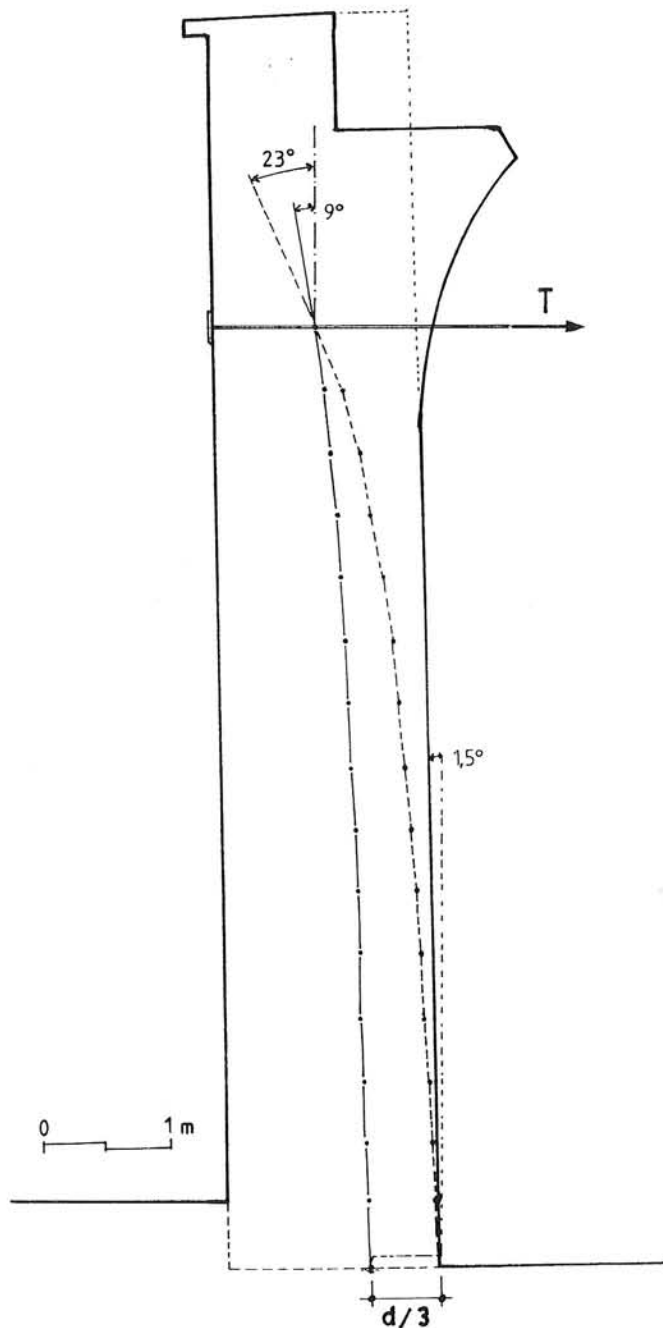


Fig. 19. Líneas de empujes debidas a la tracción del tirante en uno de los muros laterales.

En primer lugar se resolvió el problema suponiendo que el punto de giro del muro está en el borde, sin realizar roza alguna. Como puede verse en la figura, la línea de empujes está muy próxima al borde a partir de la mitad del muro y no es posible prever si el muro girará alrededor de la base o en cualquier otro punto en el intervalo citado. Se precisa una tracción T de 3,92 t/m y la resultante en la sección a la altura del tirante forma un ángulo de 23° con la vertical.

Si, como indicaba Fray Lorenzo, se realiza en la base del muro una roza de un tercio del espesor de profundidad, la situación mejora en todos los sentidos. En primer lugar, sabemos que el muro girará necesariamente en la sección donde se ha efectuado la roza. En segundo lugar la fuerza de trac-

ción se reduce al tercio de la anterior $T = 1,3$ t/m; y, finalmente, el ángulo de la resultante en la sección inmediatamente inferior al tirante se reduce a 9° .

Sin embargo, es probable que resultara difícil, en la práctica, conseguir el plomo en todas las zonas. La respuesta de los muros durante la ejecución de los trabajos, que no es del todo previsible, diría hasta dónde se puede llegar. En caso de emprender esta operación, debiera desarrollarse de la siguiente manera: colocados los tirantes transversales, se apuntalaría el muro opuesto, para inmovilizarlo, antes de tensar; para aplomar el otro se cambiarían los puntales de lado.

Ejecución

Ya con los tirantes del primer apeo provisional se pudo advertir que cualquier tracción producía fácilmente el movimiento de los muros. Pero finalmente se rechazó el aplome completo, por lo delicado de la operación, por el probable desgaje de los contrafuertes, por la resistencia que podría oponer el quiebro del muro en planta, y habida cuenta de la gran cantidad de sillares rotos que habría que reponer por entero en cualquier caso. Por eso, ligeramente rectificada la verticalidad de los muros, la luz era algo mayor que en la bóveda original; sin embargo, la disposición de hábiles canteros permitió un trabajo de revestimiento de las cimbras semejante al descrito en el análisis de los restos, es decir, forrando con sillares de piedra la forma definida por la cimbra, tomando de ella los datos métricos. Los lunetos, por ejemplo, recuperarían parte de su dirección ascendente, y la sección del cañón resultaría de un cierto compromiso entre una ligera tendencia al carpanel y una flecha algo mayor.

Como se ha indicado, la situación original garantizaba la estabilidad. Los movimientos debieron de comenzar por cedimiento del terreno e incrementarse con la descomposición de los muros. Procedía, en consecuencia, sanear el perímetro con un correcto drenaje, y consolidar los muros; pero se entendió que resultaba conveniente, como precaución elemental, dejar además tirantes de acero permanentes que eliminaran de forma definitiva cualquier empuje. Estos elementos se dispusieron apareados a cada lado del perpiaño; para que los tirantes convivieran con naturalidad con la fábrica basta con evitar el brillo de su superficie y la ostentación de tensores aparatosos.

La fábrica requería una consolidación dirigida fundamentalmente a recuperar una cierta resistencia para el relleno, semejante a la que tuviera en su día, solidarizar los paramentos y trabar los encuentros de los distintos muros. Se inyectó mortero bastardo de abajo hacia arriba por franjas de aproximadamente un metro de alto, y se cosieron las hojas externas y las esquinas con redondos de acero inoxidable que ejercen la función de perpiaños.

La primera operación consistió en desmontar el tramo de los lunetos, en precario equilibrio, provocando su caída sobre un lecho de arena. Los sillares dañados se labraron de nuevo: casi todos ellos eran simples dovelas cilíndricas, extraíbles fácilmente de una escuadría previa resultante del corte mecánico preciso; la cara vista, del intradós, debe ser labrada ma-



Fig. 20. Trasdós de la bóveda.



Figs. 21 y 22. Interior y exterior de la cimbra.



Fig. 23. Apariencia final.

nualmente con la comprobación de una *cercha* o regla curvada, como se ha hecho tradicionalmente, pero los planos de lechos y juntas pueden ser en ocasiones los de la escuadría, o bien se cortan en la obra también mecánicamente. Por este motivo se hacía necesario el abujardado de estos planos, que conviene presenten rugosidad y opongan cierta resistencia al deslizamiento.

Las juntas de los sillares se rellenaron con mortero de cal (Fig 20). Para elevar y asentar algunos de los sillares de la línea de claves, es decir, las dovelas que cierran la bóveda, cuidadosamente labradas a la medida del hueco final, no se podían emplear las tenazas o las cuerdas habituales; los canteros utilizaron con ventaja la cinta plástica de embalar, de suficiente resistencia y tan escaso espesor que no estorbaba en la junta.

Para sostener el forro, las costillas o tablas del cimbraje, se habían diseñado cuidadosamente los cuchillos adecuados, pero finalmente se ejecutó de una manera más sencilla, marcando la forma aproximadamente semicircular con camones no muy largos y sosteniendo estos camones con puntales sobre el piso entarimado establecido a la altura del arranque (Figs. 21 y 22). Como consecuencia, el descimbraje, operación delicada –los tratados antiguos advierten del peligro que supone descimbrar retirando cuñas de apoyo, que pueden salir impulsadas con gran fuerza– consistió simplemente en aflojar los tensores de los puntales.

Descimbrada la bóveda, una ligera diferencia de color delataba los sillares nuevos (Fig. 23). A pesar de que el maestro cantero aseguraba conocer la mezcla idónea de hierbas que daría a la superficie nueva la apariencia de la antigua –no dio la receta, naturalmente–, se prefirió mantener la diferencia de tono, que el tiempo borraría. □

Santiago Huerta Fernández y Enrique Rabasa Díaz
Doctores Arquitectos
E.T.S. de Arquitectura de Madrid

Bibliografía

- Heyman, Jacques, *The masonry arch*, Ellis Horwood, Chichester, 1982.
- Heyman, Jacques, "The collapse of stone vaulting", *Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings*, 111, ed. por C. A. Brebbia y R. J. B. Frewer, Computational Mechanics Publications, Southampton, 1993, pp. 327-38.
- Heyman, Jacques, *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*, Instituto Juan de Herrera/CEHOPU, Madrid, 1995.
- Heyman, Jacques, *The stone skeleton. Structural engineering of masonry architecture*, University Press, Cambridge, 1996.
- Huerta Fernández, Santiago, "Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España, ca.1500-ca.1800", Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Madrid, 1990.
- Rabasa Díaz, Enrique, *Forma y construcción en piedra: de la cantería medieval a la estereotomía del siglo XIX*, Akal, Madrid, 2000.
- San Nicolás, Fray Lorenzo de, *Arte y uso de arquitectura. Primera parte*, Madrid, 1639, s.i.

