

## **Análisis geométrico y mecánico de las bóvedas planas del Monasterio de San Lorenzo de El Escorial**

José Miguel Ávila Jalvo

El Monasterio de El Escorial es un paradigma de resolución en obra de los problemas funcionales que a menudo ocurren durante la construcción de un edificio y que, en ese caso, fueron surgiendo como enmiendas permanentes al proyecto en el breve plazo que duró su ejecución. Conseguir mantener, a través de tantos cambios, la concepción compositiva del edificio, la autonomía de cada espacio arquitectónico —formalizada en sus modulaciones, ritmos y estilos propios— dentro de la rígida trama global en la que su primer autor desarrolla exquisitamente el complejo conjunto de usos que define a un monasterio medieval pero aplicando los modos del nuevo estilo italiano, es mérito de los responsables de la obra. Por otra parte, las soluciones desarrolladas en los espesores de muros y entrepisos para resolver las interrelaciones entre los distintos ámbitos hacen de este monasterio también paradigma constructivo. El empleo desenfadado de pasos esviados o de escaleras que articulan zonas con distintos gálibos y número de plantas se resuelve con el dominio de las técnicas en la traza y corte de la piedra.

Cuando Felipe II decide duplicar el número de monjes obliga a que muchos espacios crezcan. El coro alto es uno de ellos y la necesidad de visión del altar desde él obliga a replantear las cotas de la iglesia para que cada monje pueda seguir las ceremonias. Alzar el presbiterio y bajar el coro son la única solución ayer y hoy a este conocido problema y, para bajar el coro puede optarse, entre otras alternativas, por reducir el espesor del suelo. No es nada nuevo: los

coros altos en los pies de las iglesias —invariante de la arquitectura española—, se construyen a la gótica sobre bóvedas a veces muy rebajadas gracias al peso que traen de arriba columnas y muros. El problema no es hacerlo, sino hacerlo con una solución no gótica adecuada al nuevo estilo general del Monasterio. Nace así la bóveda plana del coro ensayada ya antes en la zona monacal, en el sur de este mismo edificio y, ambas, sin precedente.

Si nos situamos en el sotocoro de la iglesia del Monasterio podemos observar —gracias a que los sillares están sin revestir— que ese espacio está cubierto por una bóveda plana de despiece circular cuya peculiaridad incita a descubrir y explicar las características que la mantienen en equilibrio, cosa ésta que también la diferencia de otras obras fascinantes en las que nos limitamos a quedar sobrecogidos en su contemplación. Dentro del Panteón de Roma piensas que el aire de su interior permite volar sin esfuerzo y al pasear por el tablero inferior del puente de Luis I, en Oporto, vas apretando los hierros con la mano porque la vista no es suficiente sensación de realidad pero, en ninguno de ellos, aparece empeño desentrañador alguno.

Entremos pues en el club de opinión acerca del comportamiento y despiece de la bóveda plana del sotocoro de la Iglesia del Monasterio que si cortáramos en dos por su mitad debe parecerse tanto a un dintel de cualquier portada que no sería necesario seguir con este asunto.

En un primer análisis formal observamos que el centro de la bóveda es un círculo formado por dos si-

llares iguales entre sí y separados por una junta diametral. Este círculo está rodeado por un primer anillo construido con siete sillares, este anillo, por otro y así hasta el borde. Si medimos, cada anillo tiene una anchura de unos 42 centímetros y, el círculo central, del orden del doble. Una observación más detallada nos hará reparar en que el mortero de las juntas entre los sillares de la zona central se ha ido desprendiendo por lo que no puede pasar ningún esfuerzo por esa parte inferior de la zona central de la bóveda. Si subimos al coro y alguien salta —extraña costumbre que se repite por parte de todo el que realiza este recorrido—, los que se encuentren encima de la bóveda vibrarán al mismo compás que ella.

Saliendo ahora de la iglesia y dirigiéndonos a la zona del convento, bajo las habitaciones del Prior encontraremos otra bóveda similar a la anterior que ocupa el techo del espacio cuadrado en el que se inscribe. Este parecido, sin embargo, no es total: tiene más anillos, su labra es más tosca y además se encuentra apeada con cuatro arcos que no traban con ella y que van desde los centros de los muros perimetrales hasta una pilastra central. Todo parece indicar que hubo una deformación que aconsejó un apeo como el realizado y admitido al tratarse de habitaciones secundarias de las cocinas del convento. Se diría que el mayor número de anillos y la peor labra desembocaron en una mayor amplitud total de las juntas que permitió un giro en cada una de ellas cuya acumulación supone un descenso importante del centro de la bóveda. Por las etapas de construcción del Monasterio, esta obra se hizo antes que la central y posiblemente la flecha fuera patente desde el principio dado que las causas son originales. Esto, sin embargo, no fue inconveniente para repetir la operación en lugar relevante aunque parece dudoso que se construyera un pilar central de sujeción por su ubicación relevante, pero este conjunto de cosas debió dar lugar a buen número de anécdotas y apuestas durante la obra así como a buenas horas de estudio a Juan de Herrera para tener éxito en el segundo intento que desde luego le cundieron.

A intentar un acercamiento a este elemento singular es a lo que se dedica el presente trabajo.

A la hora de resolver el techo del sotocoro de la iglesia, Juan de Herrera debió plantearse, como es natural, varias alternativas. Seguiremos, como él, un recorrido a través de varios tipos estructurales con la intención de entender mejor la solución por él elegida.

Entre las alternativas, la más simple y, como dice Félix Escrig mencionando la cubrición de la tumba de Teodorico en Rávena, la más infantil, es una losa formada por una sola pieza. De haber sido así, la parte plana de la bóveda circular con un diámetro de 6,72 m y un espesor de 24 cm., pesaría, en granito, unas 23 toneladas y, como tiene que apoyar en los bordes, necesita un diámetro de unos 9 metros lo que aumenta el peso hasta las 40 toneladas. Por desproporcionado que parezca, su colocación hubiera sido posible ya que se ha hecho con elementos mayores, más pesados y a más altura, en muchos lugares antes que aquí. Pero por lo que se trata ahora esta opción monolítica es porque nos permite plantear un primer análisis mecánico para ir acercándonos a la bóveda construida.

Si se supone que esta utópica pieza no está fisurada es tanto como decir que no sólo admite compresiones sino tracciones. Al ser un elemento plano bidireccional la referencia de cálculo es una losa circular apoyada en la circunferencia exterior sometida a su propio peso y a la sobrecarga del solado y a la de uso. Para un diámetro de 6,72 m y un peso de una tonelada por metro cuadrado (650 kp del granito y 350 de solado y sobrecarga) las tensiones de tracción, si se suponen iguales a las de compresión hasta su rotura, son de unos 20 kp/cm<sup>2</sup>, que puede ser admitida por un muy buen granito aunque estamos con valores arriesgados que le harían fracasar ante la menor concentración de tensiones. El fuerte grosor de la de Rávena explica que no haya roto ya que, si, por ejemplo, duplicamos, el espesor a lo anterior, se duplica el peso, pero se cuadruplica la resistencia y, en consecuencia, las tensiones se dividen por dos.

Por tanto, de haber construido esa losa, probablemente estaría partida. Rompámosla pues desde el principio construyéndola troceada, lo que al menos facilita el transporte desde la cantera.

Si elegimos un criterio de corte adintelado en una sola dirección estaríamos ante una bóveda que supondremos cuadrada, de 6,72 m de lado, construida como un dintel, realizado con dovelas de 24 cm de grueso y de 6,72 m de ancho que, al no resistir tracciones ya que las juntas entre sillares lo impiden, trabajará sólo a compresión empujando en los bordes. Geométricamente, la labor de corte de piedra de semejante bóveda supone —al igual que ocurre en un arco adovelado de cualquier portada hecha en un muro—, que cada hilada de dovelas es distinta a las

demás, aunque simétricas. En estas condiciones, la referencia de cálculo es un arco adintelado que, suponiéndolo sin flecha apreciable para no perder canto mecánico, producirá tensiones de compresión de 60 kp/cm<sup>2</sup> si queremos evitar fisuras en la cara inferior de las juntas. Este valor es holgado para el granito comprimido pero fuerte para las juntas sobretodo porque éstas deben fraguar durante bastante tiempo.

Lo anterior obliga a pensar en el asunto de las juntas antes de seguir puesto que van a ser decisivas, como lo es el despiece de los sillares, en lo que sigue. En primer lugar, construir la bóveda con dovelas enterizas de toda la anchura, aparte de muy costoso, posibilita que, cualquier defecto del material, cualquier fuerte carga concentrada o cualquier necesidad de movimiento diferencial entre distintas partes a lo largo del ancho, fuercen la rotura de alguna dovela. Mecánicamente no es significativo, en este contexto, que la dovela esté dividida a lo largo de la anchura por lo que resulta más conveniente trocearla, como hiciera ciento cincuenta años después Vicente Azero al cubrir las galerías radiales de la cripta de la catedral nueva de Cádiz. Sin embargo, el lento fraguado del mortero provoca una reducción variable del espesor de la junta que se deforma, convirtiéndose en una cuña, a causa de la compresión excéntrica, lo que es tanto como decir que las dovelas van girando entre sí, lo que acumulado en la longitud de la bóveda, marca un descenso visualmente aparente de la clave. La menor luz de las bóvedas de las galerías por las que se desciende a la cripta de Cádiz evita la apariencia de esta deformación ya que si dividimos, por ejemplo, la longitud anterior por dos la deformación relativa cae a la octava parte.

Reducir la flecha debida a la deformación de las juntas se consigue también disminuyendo su número (haciendo más grandes los sillares), reduciendo su espesor y, también, regularizándolas, lo que diferencia a la bóveda del sotocoro de la de las cocinas.

Demos un paso más para reducir los esfuerzos anteriores y que afectan seriamente a las juntas en esta obra en la que el tamaño y el canto estaban definidos por Felipe II, nuestro señor. La alternativa es hacer trabajar al material en dos direcciones ortogonales, para lo que se necesita sólo, a partir de la bóveda adintelada anterior cortar cada hilada con juntas fugadas también en la dirección transversal. De este modo, el problema mecánico se divide por dos puesto que la misma carga será trasladada a los bordes a

través de dos caminos de igual rigidez en lugar de hacerlo por uno solo. Pero el problema geométrico se complica, no sólo porque cada sillar es distinto a los demás (de cuatro en cuatro) sino porque los ángulos de los sillares se irán tomando excesivamente agudos según se van alejando del centro lo que supone frecuentes roturas y parece llevarnos a un callejón sin salida. Pero la tiene. El problema de construir un suelo rectangular plano y esbelto trabajando sólo a compresión a partir de piezas iguales con una ley de corte razonablemente sencilla y sin ángulos excesivamente agudos lo encontramos construido por Julián Sánchez Bort (unos ciento cincuenta años después que en El Escorial) en la base de las dos torres de los pies de la Catedral de Lugo a partir de una idea resuelta sobre el papel por Abeille (cien años después de que Juan de Herrera construyera la suya), como se analiza en la comunicación presentada por Enrique Rabasa a este Congreso. Efectivamente, si tuvieramos que construir un dintel adovelado con todas las dovelas iguales tendríamos dos opciones: dovelas rectangulares o dovelas trapeciales puestas alternadamente para arriba y para abajo. La idea de Abeille, simplificada, consiste en ir cruzando en planta dinteles como los anteriores, formados por sillares de sección transversal trapecial, de modo que en una dirección la cara larga está arriba mientras que en la otra está abajo. Hecho esto en toda la superficie todos los sillares reciben la carga de dos y apoyan en los dos de la otra dirección. Ésta sí es una construcción cuya estabilidad merece la inquietud investigadora por tratarse, donde las haya, de una obra del diablo.

Conviene indicar que, si en apariencia, un dintel formado por rectángulos o trapecios alternados parece inestable, sólo lo es ante vibraciones de suficiente intensidad. Saliendo de la Plaza Mayor camino de la Catedral, en Salamanca, puede verse una curiosa obra en un chaflán que pertenece a los pies de la Iglesia de San Martín. Consiste en un dintel construido, todo él, con las dovelas al revés, trapecios con la cara larga abajo —la obra es más compleja pero no viene a alterar este discurso—. A pesar de la incorrección del montaje (que podría ser voluntaria dado su autor), el equilibrio está asegurado ya que la línea de empuje forma un ángulo casi ortogonal con los planos de las juntas debido a que la pieza es suficientemente esbelta, por lo que dista mucho de acercarse al ángulo crítico de rozamiento entre dovelas. Para que cayera, el dintel tendría que tener un canto

fuerte que permitiera posibles líneas de empuje con ángulos menos ortogonales a los planos de las juntas. Por ello, aunque la obra esté invertida, el rozamiento impide, gracias a la esbeltez, la caída. En el caso de la bóveda imaginada por Abeille no se necesita echar mano siquiera de esta cuestión ya que cada sillar apoya en una dirección y recibe carga de la otra alternativamente —si nos regimos por la pendiente de las juntas— lo que la hace estable también ante situaciones dinámicas siempre que no cedan los apoyos.

Hasta aquí se han visto construcciones planas bidireccionales en la que los esfuerzos son del orden de 30 kp/cm<sup>2</sup> considerando para ello que ambas direcciones trabajan por igual y con un procedimiento constructivo razonable resuelto con piezas todas iguales de cortes planos simples sin ángulos agudos delicados. Ahora podemos ya ceñirnos a la forma circular que no es sino una variante de la de dos direcciones ortogonales pero en la que una de ellas es radial lo que obliga a la otra a describir circunferencias.

Podríamos calcular la bóveda como un conjunto de gajos o arcos adintelados formado cada uno por dos triángulos unidos en la clave por una línea. Este análisis de gajos, en el que cada peso es trasladado al borde desde la clave, sería cierto si la bóveda estuviese agrietada radialmente como ocurre en la zona inferior de muchas cúpulas semiesféricas desde las cercanías del paralelo 45° hasta el Ecuador. La de El Escorial puede entenderse extraída de una semiesférica de la que nos hubiéramos quedado con un casquete polar. Podemos decir que la bóveda plana es el Polo de una cúpula de diámetro infinito, para explicar el que no se aprecie la curvatura del trozo cortado, lo que nos permite acudir a un tipo estructural basado en la teoría de membrana en el que los esfuerzos, ciñéndonos a la zona del polo, son de compresión en cualquier dirección (razón por la que no tiene agrietamientos radiales) y además prácticamente iguales, produciendo unas tensiones de 20 kp/cm<sup>2</sup> como las que teníamos al principio en la losa monolítica pero construyendo con piezas pequeñas.

Posiblemente estas tensiones han resultado algo elevadas para los morteros al cabo del tiempo lo que ha supuesto un acortamiento del espesor de las juntas, el consiguiente leve descenso de la placa y el aumento del canto del arco de descarga (más bien superficie de compresiones) que le ha llevado a ocupar

un espacio mayor en el espesor de la bóveda para bajar las tensiones a un nivel de equilibrio. Este aumento del canto mecánico supone la salida del núcleo central de inercia y aparición de tracciones en la cara inferior que son las aberturas de las juntas que ahora vemos desde abajo.

Hay que indagar también acerca de la vibración de la bóveda al saltar sobre ella. Cuando un niño salta en una cama elástica de feria ésta se recupera y le eleva en el aire y, al caer de nuevo, vuelve a rebotar sucesivamente hasta que el niño va disminuyendo la altura de los saltos y, andando sobre ella, vuelve al borde sin vibraciones de la tela cuando se le acaba el tiempo. El salto del niño hace que a su peso se añada una fuerza hacia abajo procedente de la energía potencial adquirida con la altura alcanzada en el salto, por lo que la cama se deforma más de lo que necesitaría por el exclusivo peso del niño. Cuando éste se queda posado sobre ella ésta recupera la deformación sobrante y, al ser elástica, se sobrepasa en su necesidad de recuperación, entrando en un proceso vibratorio oscilante y expulsando al niño hacia arriba de nuevo. Cuando éste deja de saltar y anda, no hay fuerza añadida al peso y la energía de deformación elástica coincide con el trabajo desarrollado por el peso por lo que consecuentemente no hay vibración. También es posible que, si la carga es suficientemente elevada, la cama no recupere después del salto, en cuyo caso, a la magnitud menor de carga que aplicada produce este efecto se la denomina carga crítica. El fenómeno anterior no ocurre porque el material sea 'de goma' sino porque 'es elástico' y esta propiedad la tienen prácticamente todos ellos cuando la tensión a la que están sometidos es suficientemente baja como para recuperarse de la deformación producida por la carga si ésta desaparece. No hace falta que haya hierro en el interior de la bóveda plana para que vibre, basta sólo que la carga sea inferior a la carga crítica y que el material esté en fase elástica. En El Escorial puede haber hierro pero no lo necesita.

Debe comentarse, para concluir, que el círculo central, formado por dos sillares, posiblemente se plantease así para que funcionara como clave, esto es, que acuñando los dos entre sí transmitieran fuerza al conjunto poniéndolo en carga. Pero desgraciadamente es imposible conseguir con los medios disponibles entonces una presión mediante cuñas aplicadas sólo en el centro que ajustase todo el conjunto de

la bóveda, ya que hay que remover levemente todos los sillares y, por tanto, superar el rozamiento de estos contra la cimbra inferior y, para ello, se necesitan fuerzas del orden de las 40 toneladas comentadas al principio (aceptando un ángulo de rozamiento de 45°) que sólo se alcanzarían con gatos no disponibles entonces. Posiblemente esta imposibilidad produjera en el descimbrado la flecha que hoy se observa y que resultaría en ese supuesto necesaria para conseguir esa puesta en carga ya que al girar levemente todos los sillares, su longitud proyectada en el plano horizontal es mayor que la primitiva con lo que alcanza la suficiente compresión como para alcanzar el equilibrio. Puede también que Herrera fuera consciente de que cada uno de los anillos hace estable, cuando se completa, a la bóveda parcial que va formándose desde el borde debido al estado general de compresiones de esta estructura, en cuyo caso, basta ir acunando cada anillo, en las juntas radiales para cerrarlos y, contra el anterior, para ir poniendo en carga al conjunto paso a paso. Si acabamos de bajar las escaleras que habíamos abandonado, para entrar por fin en la cripta de la Catedral de Cádiz, observaremos que la gran cúpula casi plana de Vicente Azero, hija de la nuestra que casi la triplica, carece de los anillos centrales, como certificando este hecho.

Llegados a este punto queda visto, si hiciera falta, que la solución elegida por Herrera para resolver este problema no planteado hasta entonces era óptima mecánicamente, puesto que conseguía un nivel de tensiones reducido para ser admitido por los morteros, y óptima constructivamente, porque el número de juntas es pequeño, su espesor delgado y la buena labra ajusta excelentemente los sillares. Puede añadirse que el análisis bidireccional es aplicable en la medida que la rigidez sea homogénea lo que depende menos de la familia de cortes elegida —ortogonal o radial— que de la uniformidad del tamaño de los sillares. (en este aspecto la del sotocoro y la de Abeille son iguales). También se ha descrito la poca influencia del ángulo de las juntas con respecto a la estabilidad del conjunto debido a la fuerte esbeltez de la pieza, lo que anula la necesidad de cualquier extraña forma de corte para que la bóveda se tenga en pie. Si se ha realizado un escalón en el lecho de la junta a la

altura del centro del alma del sillar, es cuestión que puede resultar adecuada para el montaje y cómoda nivelación de cada sillar sobre los anteriores pero no es una necesidad mecánica y, labores similares al machihembrado, pertenecen al mundo de la ebanistería en donde este cuidado resulta obligado para la estabilidad de una maqueta que, por ser cien veces menor que la realidad, pesa un millón de veces menos que ella, lo que la hace muy sensible a cualquier pequeño impacto lateral que en la realidad no tiene físicamente sentido. Pensar que en la bóveda existe una labra de esa complejidad desmerece la memoria del maestro que demostró una seguridad portentosa al unir, en esta pequeña obra, novedad con perfección.

#### BIBLIOGRAFÍA

- Auberson, Luis Manuel. *Una hipótesis de solución arquitectónica*. ABC. 3 de mayo de 1964
- Escrig Pallarés, Félix. *La Cúpula y la Torre*. Fundación Centro de Fomento de Actividades Arquitectónicas. Sevilla. 1994.
- Martín Gómez, Pedro. *La evolución y los sistemas en la obra de El Escorial*. En AA.VV. *Fábricas y orden constructivo*. La Construcción. IV Centenario del Monasterio de El Escorial, Comunidad de Madrid. 1986.
- Martín Gómez, Pedro. *Las cantinas y bóvedas de fachada sur en el Monasterio de San Lorenzo el Real de El Escorial*. En La Ciudad de Dios. Vol. CXCVIII 2-3.
- Navascués Palacio, Pedro. *El Real Monasterio de San Lorenzo de el Escorial*. Lunweg 1994.
- Pérez del Campo, Lorenzo. *Las Catedrales de Cádiz*. Everest. 1988.
- Navascués Palacio, Pedro. *El libro de arquitectura de Hernán Ruíz el Joven*. E. T. S. de Arquitectura de Madrid. 1974.
- Rabasa Díaz, Enrique. *La bóveda plana de Abeille en Lugo*. Borrador de Ponencia del II Congreso de Historia de la Construcción.

#### NOTA:

Tengo que agradecer a mis buenos amigos Pedro Navascués Palacio y Jaime Cervera Bravo sus puntualizaciones históricas y mecánicas.