

## La cúpula de El Escorial: geometría, estereotomía y estabilidad

Ana López Mozo

La cúpula de la iglesia del Monasterio de El Escorial es una media naranja pétreo trasdosada con linterna sobre tambor, de 18,77 m de luz, construida entre 1579 y 1582. El único ejemplo renacentista similar anterior es la cúpula de la capilla del castillo de Anet en Francia, también trasdosada en piedra, pero sin tambor, construida por Philibert de l'Orme entre 1547 y 1552, con 8,17 m de luz. Con anterioridad, los cimborrios de las catedrales de Angulema, Zamora y Salamanca en el siglo XII, y los de la colegiata de Toro y la sala capitular de la catedral de Plasencia en el XIII, son también exponentes de cúpulas trasdosadas de cantería sobre tambor y claros precedentes de una tipología que luego consolidaría el Renacimiento. La catedral francesa podría albergar una de las primeras cúpulas trasdosadas en piedra occidentales, seguida de la zamorana. Sin embargo, el perfil apuntado, la configuración en hojas independientes y el intradós gallonado y nervado de todas ellas salvo la francesa,<sup>1</sup> distancian estos ejemplos de la rigurosamente clasicista media naranja escorialense, que supone la consolidación en nuestro país de la cúpula renacentista sobre tambor.<sup>2</sup>

El problema estructural más característico de una cúpula sobre tambor es que, al emerger por encima del resto de la edificación, carece de contrarresto de empujes. La estabilidad es, entonces, un problema que sólo el adecuado proyecto de la sección puede resolver. El diseño estructural no tenía todavía en el siglo XVI un fundamento teórico sino empírico, por repetición de reglas extraídas de modelos existentes,

que para cúpulas sobre tambor no podían ser buscadas en ejemplos españoles. Hay muchas incógnitas sobre la aplicación de estas reglas de dimensionado: ¿se mantenían proporciones o también se tenían en cuenta medidas reales? ¿Se valoraba el tipo de material? En el contexto del estudio del diseño estructural de cúpulas en el siglo XVI, el Monasterio de El Escorial supone un caso extraordinario, al albergar tres ejemplos del mismo tipo y diferente tamaño: las cúpulas de la iglesia, sus torres y el templete del Claustro Mayor (figura 2). Además, al tratarse de estructuras trasdosadas en piedra, se puede analizar también su cara externa y proponer una hipótesis de sección y despiece. Esta comunicación aborda la determinación de la configuración geométrica y constructiva de la cúpula de la iglesia del Monasterio de El Escorial, apoyándose en un levantamiento riguroso y en el análisis de la documentación escrita y gráfica conservada, intentando establecer una aproximación al proceso de proyecto estructural y constructivo.<sup>3</sup>

### GEOMETRÍA

Juan Bautista de Toledo, que había trabajado entre 1546 y 1548 como segundo arquitecto de San Pedro a las órdenes de Miguel Ángel, había fallecido en 1567, doce años antes del inicio de las obras de la cúpula escorialense (Rivera Blanco 1984, 38 y 85-92). El reto para los que de hecho abordaron el proyecto y la construcción debió de ser grande, pues

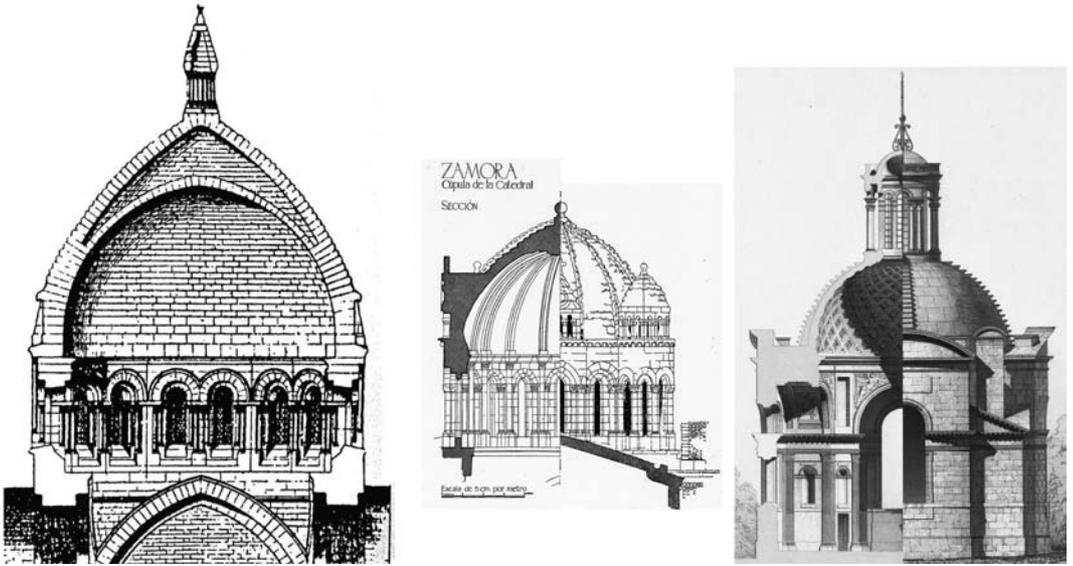


Figura 1  
Catedrales de Angulema (Torres Balbás [1922], 1996, 132) y Zamora (Menéndez Pidal 1961, 205 y 207) y capilla del casti-  
llo de Anet (Pfnor 1867, Pl. II y IV)



Figura 2  
Cúpulas trasdosadas en el Monasterio de El Escorial (fotografía de la autora por cortesía de Patrimonio Nacional)

no contaban con experiencia previa ni ejemplos cercanos para estudiar. La documentación gráfica disponible sobre cúpulas de la Antigüedad y el Renacimiento, difundida por los tratadistas clásicos, tendría entonces un valor excepcional, no sólo como muestra de referentes arquitectónicos a emular, sino como pautas de diseño estructural.

La traza conocida como *Sección C* (h. 1567) es la más antigua conservada y, aunque sin unanimidad, su autoría atribuida a Juan Bautista de Toledo. Comparando el dibujo con la documentación gráfica que probablemente manejó el arquitecto en España, se pueden determinar algunas coincidencias. El trasdós de la cúpula de la *Sección C* tiene un diámetro proporcional al muro exterior del Panteón de Roma según Serlio. Por otro lado, las dimensiones reales de los espesores del tambor y la media naranja en la zona cercana a la linterna son muy parecidas a las del proyecto de Bramante para San Pedro dibujado también por Serlio. El tambor de la *Sección C* tiene un espesor de  $1/4$  de la luz. En cuanto al proyecto inicial de Juan de Herrera para la cúpula, podemos considerar que se encuentra reflejado en las *Estampas*, por-

que, a pesar de que éstas fueron dibujadas después de concluirse el edificio, muestran diferencias relevantes con la realidad construida, en lo que podría ser un intento de perpetuar una imagen idealizada del edificio, que por diversos motivos no se habría podido materializar.<sup>4</sup> Este proyecto inicial herreriano asignaría al espesor del peralte de apoyo de la media naranja  $1/7$  de la luz, relación que muestra el Panteón de Roma en el dibujo de Serlio; al espesor del tambor  $1/5$  de su luz y reproduciría exactamente las proporciones del diseño de la media naranja de la *Sección C* (figura 3).

La necesidad de constatar lo que de hecho fue construido propició la realización de un levantamiento específico del crucero completo, desde el suelo de la iglesia hasta la bola de la aguja de la linterna. La medición se realizó con una estación total de lectura por rayo láser, desde diferentes localizaciones, relacionándose los datos mediante puntos comunes. Desde el cuerpo de campanas de las dos torres de la iglesia se obtuvieron 5.368 puntos del exterior, y desde el nivel principal de la iglesia y el acceso a la cornisa de la media naranja, 11.719 puntos del interior. La

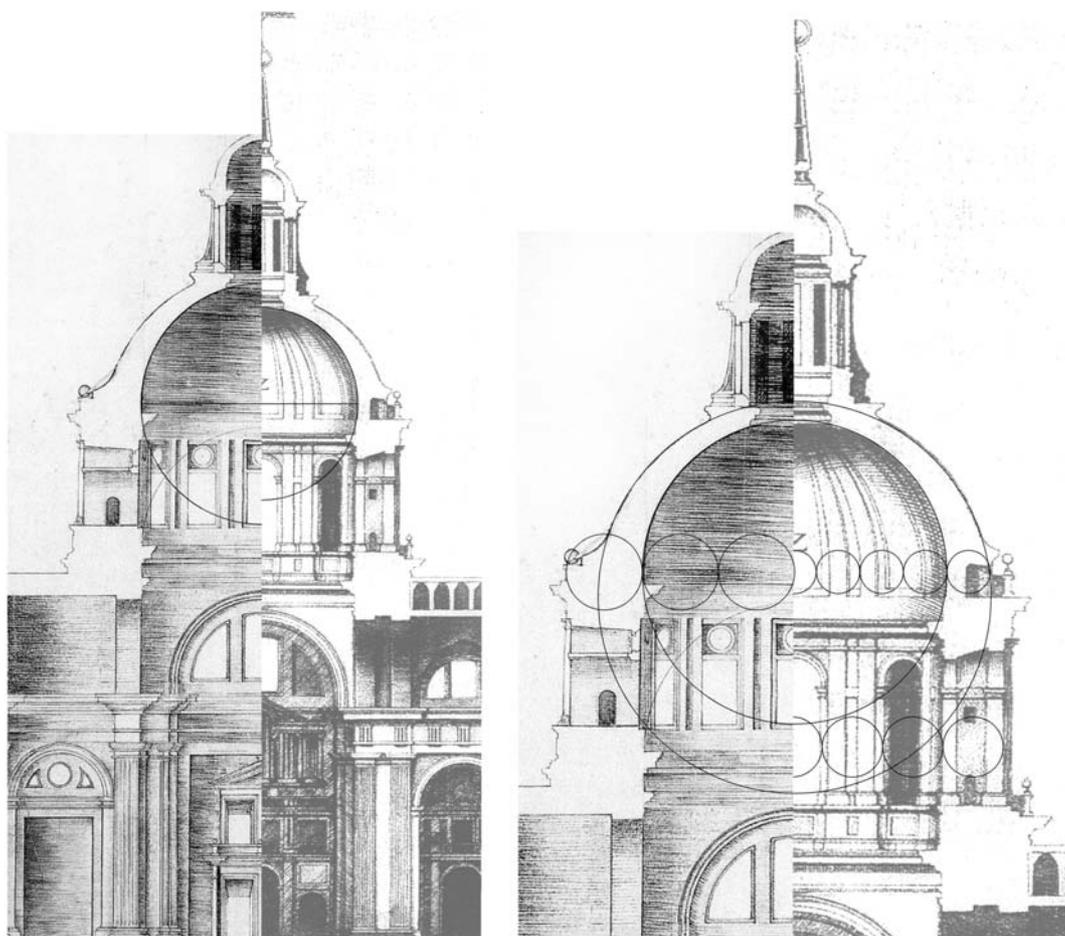


Figura 3  
Comparación entre la *Sección C* y el proyecto de Herrera que refleja el «Quinto Diseño» de las *Estampas*: a la izquierda, a la misma escala; a la derecha, haciendo coincidir centro y radio de las esferas de intradós

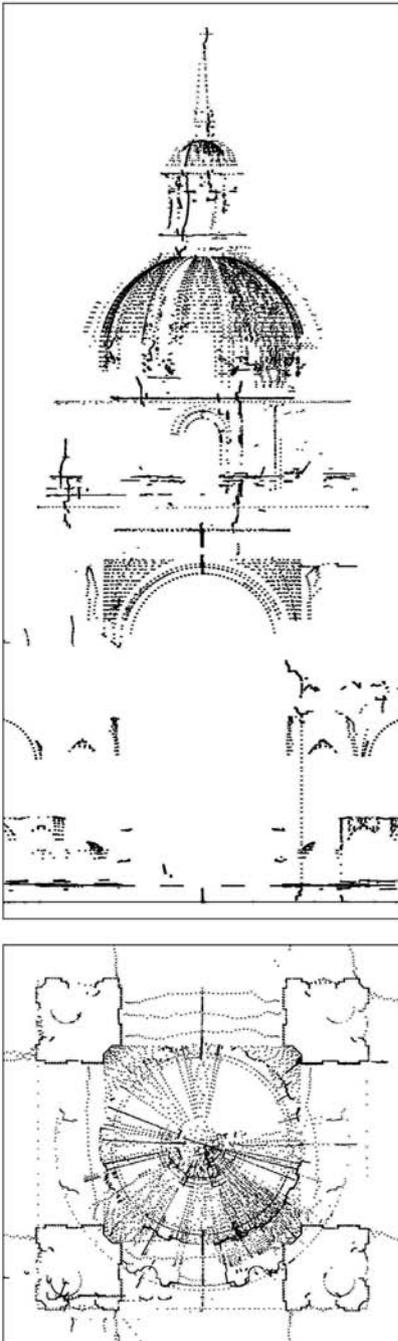


Figura 4  
Vistas en planta y alzado de los puntos de medición: en color gris, los datos del interior y en color negro, los del exterior

relación entre ambas campañas se estableció mediante la medición, desde el crucero de la iglesia y el cuerpo de campanas de la torre meridional, de puntos señalados en la fachada de la Biblioteca al Patio de Reyes: los datos quedaban así adecuadamente posicionados en altura. El ajuste en planta se realizó localizando el eje del conjunto exterior y haciéndolo coincidir con el del interior (figura 4).<sup>5</sup> A pesar de la abundancia de información, el proceso de análisis es largo y laborioso, haciéndose necesaria la comparación con la unidad de medida original —pie castellano de 27,86 cm— la consulta de la teoría recogida por los tratadistas, el apoyo fotográfico y la valoración de los datos recogidos en los textos y trazas originales.

La cúpula que cubre el crucero de la iglesia del Monasterio de El Escorial es una media naranja pealtada, de 18,77 m de luz, sobre tambor, coronada con linterna y aguja, todo ello construido en sillería. Las esferas de trasdós e intradós no son concéntricas, generando una sección de espesor decreciente hacia la clave, con 1,81 m ( $6 \frac{1}{2}$  pies) en la parte inferior y 0,91 m ( $3 \frac{1}{4}$  p) junto a la linterna, sin considerar los resaltos. El espesor del plinto de apoyo de la media naranja es aproximadamente  $\frac{1}{7}$  de su luz y el del tambor  $\frac{1}{5}$  de la suya. Los resaltos exteriores e interiores son sectores radiales de esferas, de espesor también decreciente hacia la clave, y su disposición en planta, así como la de las pilastras de la linterna, está relacionada con la configuración del tambor (figura 5).

Comparando la cúpula construida con la que describe el «Quinto Diseño» de las *Estampas*, se puede aproximar una versión de los acontecimientos que se sucedieron. Ante la alarma por las fisuras aparecidas en los pilares torales en el primer trimestre de 1579, antes de terminarse la cornisa principal del templo, se decidió reducir el peso del cimborrio.<sup>6</sup> Como ya han señalado otros autores, se disminuyó la altura del tambor y la linterna (Ortega Vidal 1999, 206–211). Además, según ha constatado este trabajo, se redujo también el espesor de la cúpula, que resultaría lo más eficaz para el fin propuesto. La comparación entre el dibujo del «Quinto Diseño» y la sección realmente construida permite determinar que el radio del intradós se aumentó 1 pie (2 pies más de luz) y el del intradós se redujo  $\frac{3}{4}$  de pie, con lo que estaríamos ante el proyecto definitivamente ejecutado, con una calota significativamente más delgada (figura 6). La

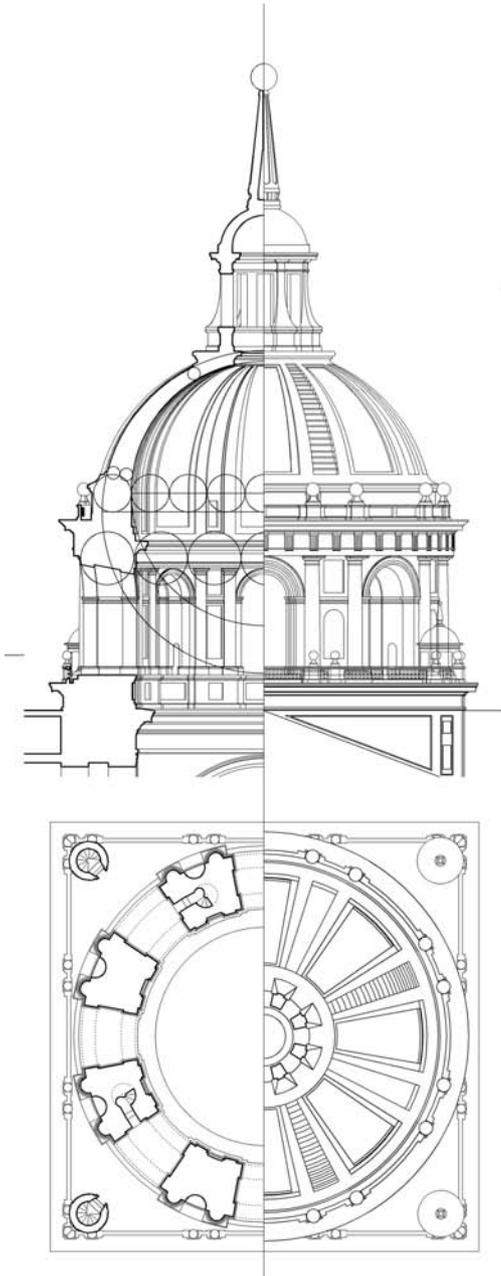


Figura 5  
Plantas a dos niveles, sección y alzado de la cúpula, fruto del levantamiento realizado para este trabajo

configuración geométrica de la cúpula no se puede entender de forma aislada, sino como parte de un proceso de proyecto, que se ha esbozado a partir de los escasos datos disponibles.

El diseño estructural de la cúpula principal podría haber sido tenido en cuenta para el proyecto inicial de la cúpula de las torres, que sería aproximadamente proporcional en las trazas de Herrera de 1579. Sólo se conservan dibujos de planta y alzado, pero la sección se puede estimar a partir de los datos implícitos en la planta, y se ofrece dibujada en la mitad derecha de la figura 7. Por otro lado, en la mitad izquierda de dicha figura se muestra la sección de la torre realmente construida y, en sombreado gris, la sección de la cúpula principal reducida hasta hacer coincidir centro y radio de trasdós con la torre: es fácil constatar la similitud de proporciones entre la hipotética traza de sección herreriana y la cúpula principal.<sup>7</sup> Después, se alteró esta premisa, construyéndose una linterna de mayor diámetro y una cúpula más gruesa (1579–81). En el alzado de las torres que reflejan las *Estampas*, dibujadas una vez concluido el edificio, Herrera no recogió los cambios y volvió a reproducir fundamentalmente la traza inicial, por lo que se puede deducir que el aumento de la linterna no fue una decisión autónoma de proyecto, sino que debió de

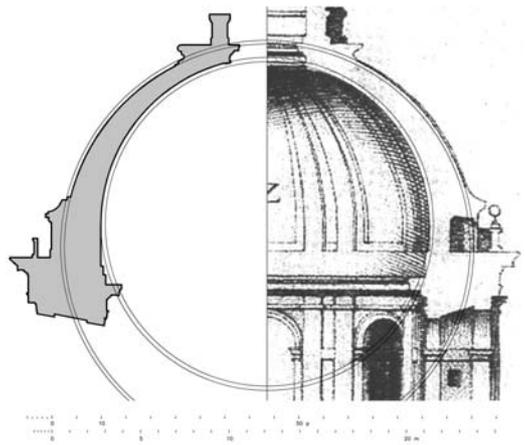


Figura 6  
Comparación entre la cúpula que describen las *Estampas*, a la derecha, y la realmente construida, a la izquierda, haciendo coincidir los centros de intradós

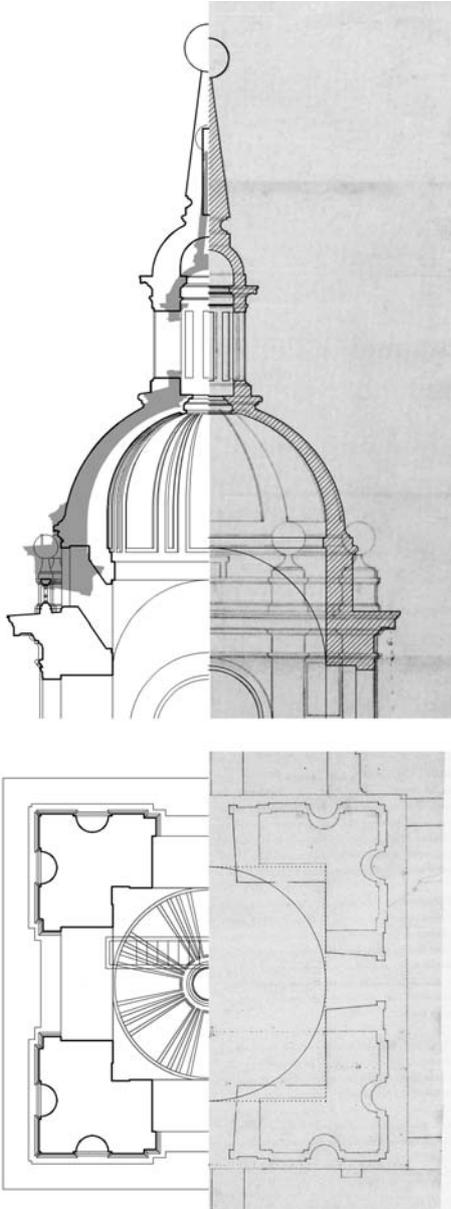


Figura 7  
Cúpula de las torres de la iglesia del Monasterio de El Escorial. En la mitad derecha, alzado y planta de Herrera de 1579; superpuesta la hipótesis de sección para ese momento del proyecto, sombreada con rayado. En la mitad izquierda, planta y sección de la torre construida y, sombreada en color gris, sección de la cúpula principal reducida hasta hacer coincidir centro y radio de trasdós con la torre

venir obligada por algún condicionamiento de índole estructural.

En el templete de los Evangelistas en el Claustro Mayor (1587–88) se confirmó esta tendencia de diseño iniciada en las torres, construyéndose proporcionalmente más gruesas las cúpulas más pequeñas (figura 8). El profesor Jacques Heyman, de la Universidad de Cambridge, consultado sobre esta cuestión, sugería la existencia de una dimensión muy parecida en el espesor de la sección en el arranque en los tres casos (aproximadamente  $5 \frac{1}{2}$  pies castellanos).<sup>8</sup> Por otro lado, en el caso del templete hay que considerar que el reducido tamaño de esta pieza le confiere un carácter casi tan escultórico como arquitectónico, lo que seguramente apartó los criterios de dimensionado de los normalmente utilizados en estructuras mayores.

#### ESTEREOTOMÍA

Una cúpula trasdosada en piedra muestra las dovelas que la conforman, permitiendo determinar la configuración de despique en trasdós e intradós y plantear una hipótesis de disposición constructiva, lo que supone una oportunidad extraordinaria de estudio. Además, la existencia de resaltos ofrece más datos de un mismo lecho, especialmente relevantes cuando éste presenta cambios de inclinación. Los puntos de medición de las hiladas en interior y exterior se han girado alrededor del eje de la cúpula, hasta hacerlos coincidir en un mismo plano meridiano (figura 9, derecha).

Las condiciones redactadas para contratar la partida en noviembre de 1579 describen una cúpula con resaltos en el interior y trasdós liso, con dos hiladas sin relleno ni hueco en la parte inferior y una en la superior: «antiendese que los trasdosos dellas [dovelas] en de ser rasos sin que hagan relieve por de fuera y an de ser con todo su grueso que es el lecho en dos hiladas por la parte de abajo y por arriba en una».<sup>9</sup> La falta de alineación radial de juntas exteriores e interiores entre dovelas de una misma hilada permite efectivamente asegurar la existencia de doble hoja de bóveda hasta la hilada nº 23, contando desde la cornisa interior.<sup>10</sup> Los datos exteriores e interiores de hiladas en la zona inferior y superior de la media naranja permiten aproximar con seguridad la disposición de lechos horizontal y radial, respectiva-

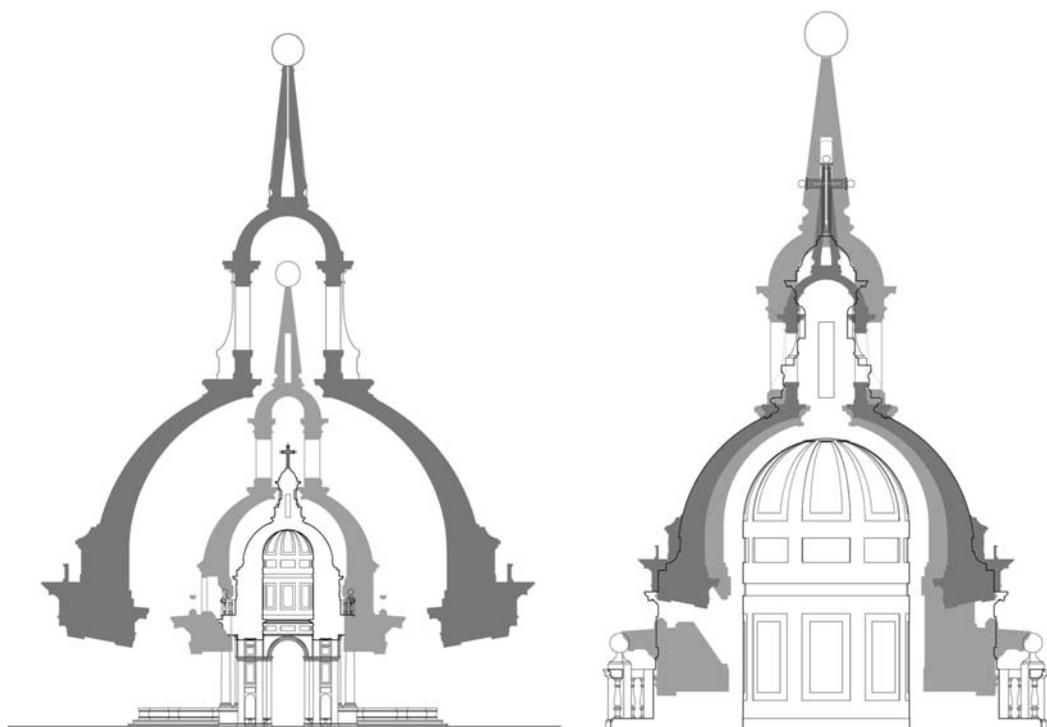


Figura 8

Cúpulas trasdosadas en el Monasterio de El Escorial: a la izquierda, a la misma escala; a la derecha, comparación de proporciones haciendo coincidir centro y radio de trasdós

mente (figura 9, izquierda). Obras de restauración del intradós de la cúpula acometidas por Patrimonio Nacional brindaron la oportunidad de acceder en diciembre de 2008 a todos los niveles del interior, desde los andamios construidos para la ocasión. La posibilidad de hacer catas en las juntas, que estaban abiertas para ser saneadas, permitió comprobar la existencia de: quiebras en el interior de cuatro lechos del cupulín; hilada única en la base de la linterna y disposición horizontal, en el grueso de la cúpula, del primer lecho que es inclinado en los resaltos interiores (entre hiladas 15 y 16). Además, pudieron ser medidas las alturas de las primeras hiladas interiores del cupulín de la linterna, imposibles de visar con estación total debido a la *sombra* de la cornisa.<sup>11</sup>

La disposición de lechos en la zona central de la media naranja, bajo una hilada exterior de mayor altura que el resto —existente también en las cúpulas

de las torres— presenta más incógnitas y requiere argumentación de apoyo. La cúpula despiezada radialmente en su totalidad funciona mejor, pues se reduce la probabilidad de deslizamiento por empujes al orientarse los lechos de corte aproximadamente ortogonales a los esfuerzos, pero requiere construcción con cimbra. Una disposición no radial, como la que presentan los resaltos interiores por debajo de la hilada alta mencionada —nº 19—, indicaría entonces la existencia de una configuración adecuada para asentar las dovelas sin cimbra, con lechos fundamentalmente horizontales, al modo de los jarjamentos góticos (figura 9, izquierda). En hiladas aproximadamente alternas, las dovelas que conforman los resaltos enjarjan con las adyacentes, ya correspondan a zonas «lisas» o a escaleras, lo que obliga a suponer la existencia de una disposición de lechos uniforme en cada hilada completa, y se hace imprescindible la consideración

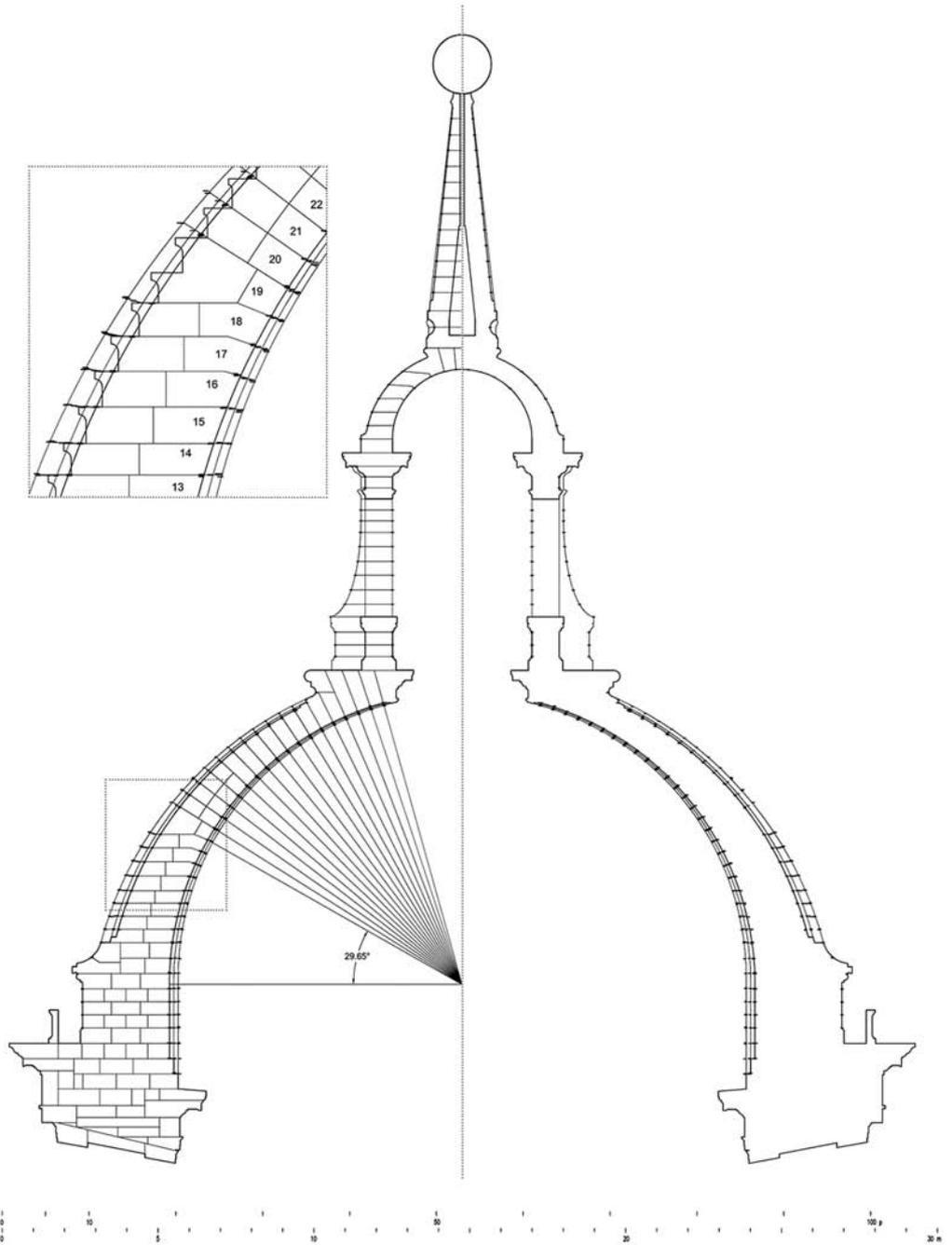


Figura 9

A la derecha, puntos de medición de hiladas, girados hasta coincidir en un mismo plano meridiano. A la izquierda, hipótesis de disposición constructiva

conjunta de los perfiles de la cúpula en las tres zonas. En las escaleras las juntas entre hiladas se ubican en el encuentro entre huella y tabica, ofreciendo información que debe encajar en la configuración general (figura 9, detalle). Los lechos en los resaltos exteriores entre las hiladas 15 y 19 son inclinados sólo en los principales y horizontales en los secundarios, lo que lleva a pensar que esta última disposición es la que penetra en el grueso de la cúpula, y confirma, además, la existencia de dovelas de lecho acodado, presentes también en las cúpulas de las torres (López Mozo 2002, 515) y en el cupulín de la linterna, como se ha mencionado anteriormente. La solución propuesta para el despiece de la zona central del grueso de la cúpula, estableciendo acuerdo entre todos los condicionantes planteados, propone lechos horizontales en la cara externa y dovelas acodadas en la linterna, según la inclinación que muestran los resaltos interiores.<sup>12</sup>

La cúpula podría haber sido construida sin cimbra, por lechos fundamentalmente horizontales, hasta la hilada 18, comprendiendo un ángulo de casi 30° (29,65° en la medición efectuada). Tras una hilada alta de transición, y ya con cimbra, se habría completado por lechos radiales hasta el óculo de base de la linterna.<sup>13</sup> Los lechos horizontales más altos están formados por dovelas acodadas, tanto en la cúpula principal como en el cupulín de su linterna. En este último caso, la reducción de cimbra en una estructura de 4,47 m de diámetro no parece apremiante, y quizá se utilizaron lechos horizontales hasta arriba para reducir la entrada de agua de lluvia, como sugería Luis Pérez de Prada, arquitecto de Patrimonio Nacional a cargo de las obras de restauración, acodándose por el interior los lechos para impedir el deslizamiento.

## ESTABILIDAD

La argumentación que justifica el mayor tamaño exterior de la hilada alta para no resultar demasiado estrecha en el intradós, porque constituye la pieza de cambio de lechos horizontales a radiales, no es válida en el caso de la cúpula principal de la iglesia escurialense: al estar constituida todavía por dos hojas de bóveda, se podrían disponer dos hiladas de tamaño normal en la hoja exterior, en lugar de una sola. A pesar de que el equilibrio estructural de la cúpula es incuestionable, la intuición de un posible problema

de deslizamiento en el centro de la sección, en la parte superior de la zona aparejada horizontalmente, condujo a plantear un análisis gráfico de estabilidad: la idea era determinar una de las infinitas situaciones de equilibrio de la estructura y comprobar los ángulos entre la línea de empujes y la dirección normal a los planos de lechos.<sup>14</sup>

El cálculo se ha realizado sobre un sector radial que comprende 1/16 del total de la cúpula, despreciando resaltos interiores y exteriores. Dicho «gajo» se ha despiezado a su vez en diez partes, de las que se ha determinado, a partir de su modelado tridimensional por vía informática, volumen y posición del centro de gravedad. El volumen de la porción correspondiente de linterna se ha calculado como 1/16 del total, para repartir uniformemente el peso de las pilastras. El centro de gravedad de esta parte se ha calculado conjuntamente con la primera dovela. Los pesos se han determinado tomando como densidad del granito 2,8 t/m<sup>3</sup>. Este gajo de la cúpula se equilibra gracias a la existencia de otro igual diametralmente opuesto: esta situación de simetría equivale a disponer un empuje horizontal en la primera dovela en el análisis de un solo gajo (Huerta Fernández 2004, 40).

La magnitud y posición de la resultante P de pesos verticales se ha obtenido a partir del volumen y centro de gravedad del gajo completo (figura 10). El punto de aplicación del empuje se ha situado en la parte superior, donde su magnitud es mínima y el peralte de la línea de empujes es máximo. El encuentro entre P y la dirección del empuje define uno de los puntos de paso de la fuerza resultante R, que incidiría también en un punto arbitrario en la base de la cúpula, elegido en este caso a 1/3 del borde exterior. La dirección de esta resultante R determina el valor del empuje E y el diagrama definitivo de fuerzas, con cuyas direcciones se ha dibujado en el interior de la sección la composición del empuje horizontal y los sucesivos pesos.

La línea de empujes para las premisas expuestas, para unos planos de corte coincidentes con los lechos reales entre hiladas, se ofrece dibujada en la figura 11. La línea se encuentra sobradamente contenida en el interior de la fábrica, condición indispensable de equilibrio, que asegura que no se produzcan tracciones en un sistema que sólo resiste compresiones. Los ángulos entre la línea de empujes y la dirección normal a los planos de lechos en la hilada alta y las tres inmediatamente inferiores son: 35,55°, 32,12°, 32,12°

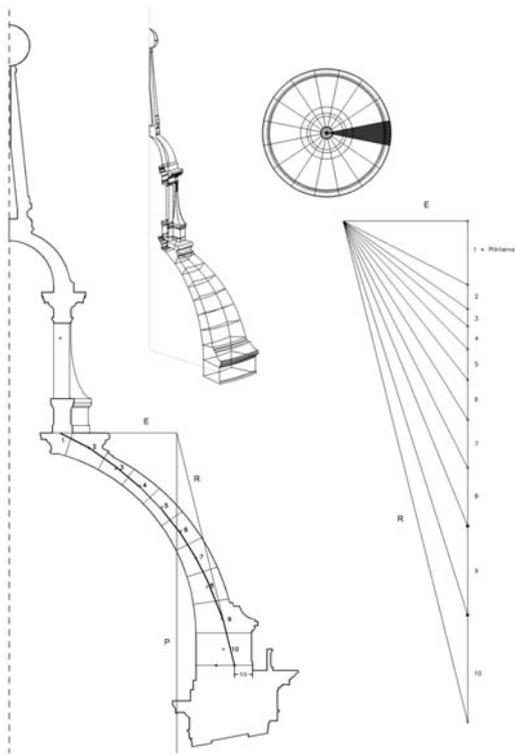


Figura 10  
Cálculo gráfico de la composición del empuje y los sucesivos pesos de las dovelas de una porción de la cúpula

y  $28,21^\circ$  respectivamente. El ángulo de rozamiento que impide el fallo por deslizamiento se sitúa habitualmente por debajo de  $30\text{--}35^\circ$  (Huerta Fernández, 2004, 65), por lo que el apoyo de la hilada alta se encuentra en situación comprometida. Quizá sería posible plantear que el papel de estas piezas grandes fuera impedir un posible deslizamiento. Las dos hiladas inmediatamente inferiores, con ángulos superiores a  $30^\circ$ , presentan —según la hipótesis que plantea este trabajo— lecho acodado. Esta configuración, que aumentaría la seguridad frente a deslizamientos, afecta sólo a las hiladas de cada nivel situadas en la cara interna de la cúpula, por lo que frente a estos razonamientos se podría argumentar que la cara externa, apoyada en planos horizontales —salvo los resaltos que también presentan lecho acodado— podría deslizarse hacia fuera. Sin embargo, el análisis de la línea

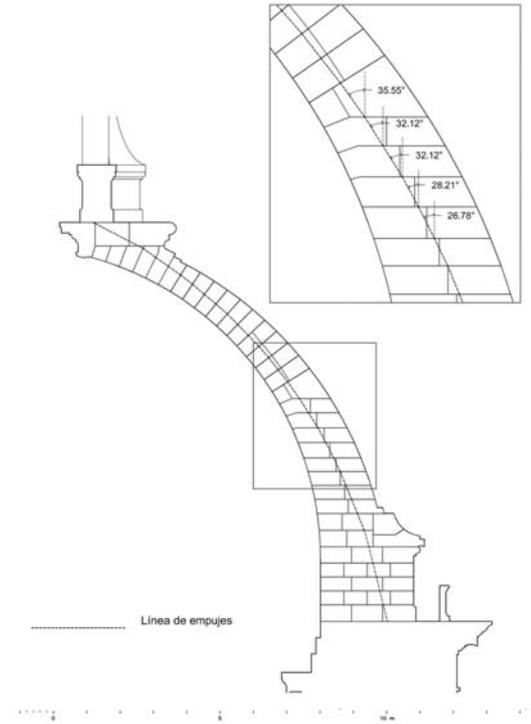


Figura 11  
Línea de empujes

de empujes elegida ofrece nuevos datos: los puntos de paso en la zona que nos ocupa están situados en las dovelas interiores, que son las acodadas. Atendiendo a los experimentos de W. H. Barlow de 1846 referidos por Huerta Fernández (2004, 51), el comportamiento del arco —o gajo en este caso— en las zonas no coincidentes con una cierta línea de empujes no influye en el equilibrio global. Descendiendo hacia el arranque, cuando el ángulo entre la resultante de fuerzas y la normal al lecho es cercano o inferior a  $30^\circ$ , la superficie de contacto entre hiladas parece ser perfectamente horizontal.

La existencia de ángulos de valor comprometido entre la línea de empujes y la dirección normal a los lechos en las últimas hiladas cortadas horizontalmente, habría sido intuitiva por nuestros artífices, diseñando una hilada de piezas grandes y lechos acodados en las dos anteriores para evitar deslizamientos. Quizá la hilada alta es también fruto de la necesidad de estabilizar el último lecho horizontal en el propio pro-

ceso de asentamiento, evitando el desplazamiento hacia dentro de las dovelas de la cara interna. Otra de las razones que pudo aconsejar la disposición de lechos acodados en la media naranja de la cúpula, por debajo de la hilada alta, es evitar la aparición en el intradós de una hilada demasiado estrecha en el cambio de lechos horizontales a radiales.

## CONCLUSIONES

El diseño proporcional podría haber sido una de las principales premisas consideradas en el proyecto estructural de las cúpulas escorialenses: Herrera ideaba la cúpula de la iglesia manteniendo rigurosamente las proporciones del proyecto anterior de Juan Bautista de Toledo que refleja la *Sección C* y después diseñaba la cúpula inicial de las torres proporcional a la principal. Algo ocurrió, esta tendencia de proyecto se vio alterada, y el diseño estructural definitivo para torres y templete muestra una secuencia de secciones proporcionalmente más gruesas al reducirse el tamaño real de las cúpulas.

Sobre configuración constructiva de cúpulas pétreas trasdosadas no había documentación escrita o precedentes construidos que pudieran servir de referencia a los artífices escorialenses. Este trabajo sólo ha encontrado el planteamiento de un problema parecido en las trazas de Gaspar de Arce para la torre de la catedral de Lugo, realizadas entre 1570 y 1575 (figura 12). La cúpula es parcialmente trasdosada, de espesor variable y doble hoja de cantería y está rematada con linterna. La traza de la sección contiene una descripción gráfica completa del despiece de la torre, y constituye uno de los escasos ejemplos en que un dibujo de construcción del siglo XVI llega hasta nosotros. No hay más coincidencias con las cúpulas escorialenses, que no tienen medidas ni proporciones similares ni solape de las piezas del trasdós tallado en cada dovela.

El principal objetivo de la cantería es trocear un elemento constructivo en piezas que, adecuadamente dispuestas, conformen el conjunto. El despiece ha de permitir, además, transportar y asentar los sillares sin dificultad, asegurar su estabilidad durante el proceso de construcción y después de retirada la cimbra, transmitiendo adecuadamente los esfuerzos hasta la cimentación, y, en ocasiones, resolver problemas constructivos como impedir la entrada de agua. A pe-

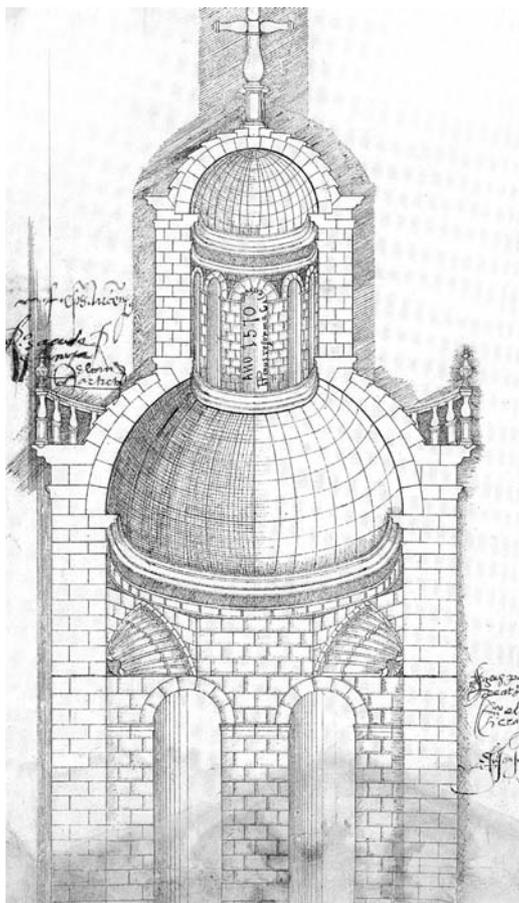


Figura 12  
Trazas de Gaspar de Arce para la torre de la catedral de Lugo (Aramburu-Zabala 1997, 282)

sar de que algunos autores consideran la estereotomía de la cúpula escorialense casi un problema de albañilería por el pequeño tamaño del dovelaje respecto al conjunto, su valor no está en el virtuosismo de la talla, sino en la propuesta de una solución viable para ser asentada con ahorro de cimbra, mecánicamente adecuada, y constructivamente capaz de formar tejado, para una cúpula de piedra maciza sobre tambor trasdosada, tipología inexistente en nuestro país en ese momento. La solución empleada en el cu-



Figura 13  
Trazo para la Capilla del Sagrario de la catedral de Segovia,  
s. XVII (Ruiz Hernando 2003, 55)



Figura 14  
Cúpula del ochavo de la Capilla Mozárabe en la catedral de  
Toledo, s. XVII (fotografía de la autora)

pulín de la linterna de la cúpula escurialense, con lechos horizontales hasta arriba, tendría réplicas ya en el siglo XVII: una traza anónima de la Capilla del Sagrario de la catedral de Segovia y el ochavo de la capilla mozárabe de la catedral de Toledo muestran disposiciones similares (figuras 13 y 14).

## NOTAS

1. La restauración dirigida por Luis Menéndez Pidal en el cimborrio de la catedral de Zamora en los años 40 del siglo XX constató que la cúpula está formada por dos hojas independientes, separadas 15 ó 20 cm —y casi 2 m en la clave— tanto en los nervios como en los gallones, con relleno de piedras irregulares y mortero de cal (Menéndez Pidal 1961, 210). Según Leopoldo Torres Balbás, el cimborrio de la colegiata de Toro, rematado por una cubierta de teja independiente, podría haber sido inicialmente ideado como trasdosado, pues las piedras de la clave tienen señales de haber sido labradas ([1922], 1996, 121).
2. La sacristía de la iglesia de San Miguel en Jerez de la Frontera, construida por Hernán Ruiz en 1564 (Morales 1989, 172), está cubierta por una cúpula semi-esférica trasdosada, aunque recubierta por material cerámico, sobre tambor y sin linterna. Al exterior el tambor, de planta octogonal, presenta unas generosas dimensiones y contrafuertes en las direcciones diagonales, por lo que se entiende más como un cuerpo casi independiente de la cúpula.
3. Este trabajo resume parte de la tesis doctoral de la autora, titulada «Bóvedas de piedra del Monasterio de El Escorial», dirigida por Enrique Rabasa Díaz y leída en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid en junio de 2009, y se encuadra en el proyecto de investigación «La construcción en piedra de cantería en el ámbito hispánico: fuentes escritas y patrimonio construido» (BIA2006-13649).
4. Las diferencias entre *Estampas* y realidad construida y la idealización que ofrecen del edificio son cuestiones ya señaladas por Javier Ortega Vidal (1999, 208). Como apoyo de la idea de considerar el proyecto inicial herreriano reflejado en dichos dibujos conviene recordar el caso de la cúpula de las torres, de las que sí se conserva la traza original de Herrera de 1579: las *Estampas* no reproducen lo realmente ejecutado, sino el proyecto inicial.
5. La toma de datos ha sido viable gracias a la posibilidad de utilizar el instrumental de que dispone el Departamento de Ideación Gráfica Arquitectónica de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid, especialmente la estación total

- láser, y a la amable disposición de la delegación de Patrimonio Nacional en El Escorial, que facilitó el acceso para todas las visitas necesarias. Por otro lado, la participación de la autora en el levantamiento de la cúpula escorialense que realizó Miguel Ángel Alonso Rodríguez en 2001–02, fue clave para poder acometer este trabajo en solitario (Alonso Rodríguez 2001; Alonso Rodríguez y López Mozo 2002, 303–308). La idea de realizar un nuevo levantamiento surgió, por un lado, de la necesidad de constatar hipótesis de disposición constructiva que la autora venía perfilando desde años atrás; por otro, de la posibilidad de utilizar instrumentos de mayor alcance que permitirían medir también la linterna, y, finalmente, de la firme convicción de la importancia de ofrecer en una tesis doctoral sobre las bóvedas de piedra de El Escorial una propuesta personal de configuración geométrica y constructiva de la cúpula de la iglesia.
6. La única noticia original disponible sobre este episodio es la que ofrece fray José de Sigüenza (1605, II, XII). La información tiene que ser valorada sin olvidar que, en tiempos de la construcción, el fraile jerónimo no estuvo más que puntualmente en El Escorial (Rubio González 2006, 315–317); aún así, conoció a todos los artífices y contó con testimonios de primera mano. Sigüenza sitúa el problema en «uno de los cuatro pilares, que, por falta de los maestros asentadores, comenzó a hender y rajarse por algunas partes aun antes que tuviese otro peso encima más de su propia grandeza; así temieron que no había de poder sufrir la carga de tan gran cimborio el que a sí mismo no se sufría. Y trataron de aligerarlo, quitándole todo el peso de este pedestal, harto contra la voluntad del Arquitecto Juan de Herrera».
  7. La documentación gráfica de las cúpulas de las torres se basa en un levantamiento realizado por la autora en 2002, con resultados publicados ese mismo año.
  8. La consulta fue realizada con ocasión del Simposio «Historical perspectives on structural analysis», celebrado en homenaje al profesor Heyman en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid en noviembre de 2005.
  9. Archivo de la Biblioteca del Monasterio de San Lorenzo de El Escorial, VI-42, f<sup>o</sup> 180–183v; transcripción de Bustamante García, 1994, 494–496. Esta interpretación del texto de las condiciones fue señalada ya por Alonso Rodríguez y López Mozo (2002, 308).
  10. Alonso Rodríguez y López Mozo (2002, 306).
  11. Quiero agradecer expresamente a Luis Pérez de Prada, arquitecto de Patrimonio Nacional a cargo de la dirección de la obra, la amabilidad y solicitud con que atendió mis peticiones de visitas. Además, el personal de Quijano, empresa contratista de los trabajos de restauración de la cúpula, prestó toda su colaboración: la ayuda entusiasta de Elsa Soria en las tareas de medición y comprobación y la amabilidad de Gemma Martín, Marta Mendoza, Gerardo Núñez y Ángela Huete hicieron posible extraer el máximo de información de la cúpula, situada temporalmente al alcance de la mano.
  12. La hipótesis fue ya avanzada en la conferencia «La construcción de bóvedas en piedra: El Escorial», impartida por la autora en el curso de verano «El arte de la piedra. Teoría y práctica de la cantería», organizado por la Universidad San Pablo CEU en julio de 2007 (López Mozo 2009, 227).
  13. La argumentación sobre el cambio de orientación de lechos que indica la hilada alta en las cúpulas de las torres, corresponde a Enrique Rabasa Díaz (2000, 162–167).
  14. El análisis gráfico de estabilidad de la cúpula fue realizado con el asesoramiento de Santiago Huerta Fernández y Gema López Manzanares. Santiago Huerta, siguiendo a Jacques Heyman, sostiene que el fallo por deslizamiento en una estructura de fábrica es extraño, debido a los elevados coeficientes de rozamiento (2004, 31).

#### LISTA DE REFERENCIAS

- Alonso Rodríguez, Miguel Ángel. 2001. «Levantamiento topográfico del interior de la cúpula de la basílica del Monasterio de San Lorenzo de El Escorial», proyecto de fin de carrera para los estudios de Ingeniería Técnica Topográfica de la Universidad Politécnica de Madrid.
- Alonso Rodríguez, Miguel Ángel y Ana López Mozo. 2002. «Levantamiento de la cúpula de la iglesia del Monasterio de San Lorenzo de El Escorial». *Actas del IX Congreso Internacional de Expresión Gráfica Arquitectónica*, 303–308. La Coruña: Departamento de Representación y Teoría Arquitectónicas de la Universidad de La Coruña.
- Aramburu-Zabala Higuera, Miguel Ángel y Begoña Alonso Ruiz. 1997. «La arquitectura después de Juan de Herrera». *Juan de Herrera, arquitecto real*, catálogo de la exposición realizada por los Ministerios de Fomento y Educación y Cultura, la Comunidad de Madrid, el Gobierno Regional de Cantabria, el Ayuntamiento de Camargo, la Fundación Obra Pía Juan de Herrera y la Fundación Cultural del Colegio Oficial de Arquitectos de Madrid con motivo de la conmemoración del IV Centenario de la muerte de Juan de Herrera, 235–284. Barcelona: Lunwerk editores.
- Bustamante García, Agustín. 1994. *La octava maravilla del mundo. (Estudio histórico sobre el Escorial de Felipe II)*. Madrid: Alpuerto.

- Huerta Fernández, Santiago. 2004. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- López Mozo, Ana. 2002. «Las cúpulas de las torres de la iglesia del Monasterio de El Escorial». *Actas del Simposium «El Monasterio de El Escorial y la arquitectura»*, 504–519. Madrid: Ediciones Escorialenses.
- López Mozo, Ana. 2009. «La construcción de bóvedas en piedra: El Escorial». *El arte de la piedra. Teoría y práctica de la cantería*, 205–232. Madrid: CEU Ediciones.
- Menéndez Pidal, Luis. 1961. «Restauración del cimborrio y de las cubiertas pétreas de la catedral de Zamora». *Archivo Español de Arte*, Tomo XXXIV, núm. 135: 193–213.
- Morales Martínez, Alfredo J. 1989. «Tradición y modernidad, 1526–1563». *Arquitectura del Renacimiento en España, 1488–1599*, 99–249. Madrid: Cátedra.
- Ortega Vidal, Javier. 1999. *El Escorial; dibujo y lenguaje clásico*. Madrid: Sociedad Estatal para la Conmemoración de los Centenarios de Felipe II y Carlos V.
- Pfnor, Rodolphe. 1867. *Monographie du château d'Anet construit par Philibert de l'Orme en MDXLVIII, dessinée, gravée, et accompagnée d'un text historique & descriptif*. París: Chez l'Auteur. Disponible en <http://edb.kuilib.kyoto-u.ac.jp/exhibit-e/f09/f09cont.html>.
- Rabasa Díaz, Enrique. 2000. *Forma y construcción en piedra. De la cantería medieval a la estereotomía del siglo XI*. Madrid: Akal.
- Rivera Blanco, Javier. 1984. *Juan Bautista de Toledo y Felipe II. La implantación del clasicismo en España*. Valladolid: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Valladolid.
- Rubio González, Loreno. 2006. «Cronología del Padre José de Sigüenza». Homenaje al P. Fray José de Sigüenza en el IV Centenario de su muerte († 1606). En *La Ciudad de Dios*, vol. CCXIX, núm. 1: 315–317.
- Ruiz Hernando, José Antonio. 2003. *Las trazas de la catedral de Segovia*. Segovia: Diputación Provincial de Segovia y Caja Segovia.
- Torres Balbás, Leopoldo. [1922] 1996. «Los cimborrios de Zamora, Salamanca y Toro». *Anales de Arquitectura*, nº 7: 125–137.