

Lunetas y arcos avanzados. El trazado de un elemento constructivo en los siglos XVI y XVII

José Calvo López

Hablando del problema de abrir un hueco en la superficie de una bóveda de cañón, decía Jean-Marie Pérouse de Montclos: «La cúpula octogonal de la cripta de la capilla del Palacio de Carlos V en Granada está penetrada por lunetas [...] aparentemente los primeros lunetos aparejados de la arquitectura de los tiempos modernos. [...] A favor de los franceses sólo se puede decir que el luneto español presenta durante todo el siglo XVI un trazado delgado y agudo que no es comparable al trazado amplio de los lunetos de Le Mercier».¹

Ahora bien, durante los siglos XVI y XVII se emplean en España las dos soluciones a las que se refiere Pérouse de Montclos. El luneto «delgado y agudo» aparece con gran frecuencia en las obras del período, y recibe en las condiciones el nombre de «luneto apuntado y capitalizado». La solución se basa en trazar la intersección de las dos superficies de la bóveda y el luneto como dos arcos de elipse, pero esto da lugar a una superficie reglada alabeada en el intradós de la pieza.

El luneto amplio y elegante es menos frecuente en la práctica, pero se encuentra construido en obras españolas muy anteriores a la época de Le Mercier, como la cripta y la sacristía de catedral de Jaén, el hospital de Santiago en Úbeda y el zaguán occidental del Palacio de Carlos V en Granada. Conocida en los cuadernos de cantería del siglo XVI como «Arco avanzado en bóveda», esta solución se basa en disponer un cilindro de diámetro menor que la bóveda de cañón, lo que da dos superficies de replanteo sencillo que se encuentran en una curva alabeada.

Tras estudiar los antecedentes medievales del problema, nos proponemos examinar los métodos de trazado

de una y otra pieza en el tratado de Fray Laurencio de San Nicolás, en los libros de cantería de Alonso de Vandelvira y Ginés Martínez de Aranda y en el cuaderno llamado de Juan de Portor y Castro, para terminar exponiendo el empleo de ambas soluciones en un caso concreto, la bóveda en pescante de la iglesia abacial de La Mota en Alcalá la Real.

ANTECEDENTES MEDIEVALES

En el románico ibérico y francés, el problema de la apertura de huecos en una bóveda se resuelve en muchas ocasiones mediante la intersección de dos cilindros de ejes horizontales y perpendiculares, uno de mayor diámetro que corresponde a la bóveda y otro que permite abrir el hueco y termina en un arco de medio punto. La intersección de uno y otro es una curva de cuarto grado, el «luneto cilíndrico recto» de los textos de Geometría Descriptiva de los siglos posteriores.

Este concepto geométrico se materializa de diversas maneras. En el Panteón Real de San Isidoro de León la mayoría de las bóvedas sirven de soporte a los conocidos frescos, pero se puede observar que en las dos que no están revestidas la ejecución no fue especialmente cuidada. En la colegiata de Toro existe un arco aparejado con independencia de la bóveda, dispuesto de tal manera que las dovelas que lo forman muestran sus testas en el paramento del cañón, sobre el que se marca con claridad el trasdós del arco, interrumpiendo las juntas de intradós de la bóveda. Sin embargo, en un arco

simétrico de éste, al otro lado del crucero, el problema se resuelve de forma completamente diferente, pues las alturas de hilada del arco y la bóveda están coordinadas, de forma que las testas de las dovelas del arco son las caras de intradós de las dovelas de la bóveda; de esta manera, las juntas de intradós de la bóveda se quiebran al llegar a la arista común entre bóveda y arco, pero continúan horizontalmente en el intradós del arco.

Esta segunda solución es de gran interés si la comparamos con los ejemplos contemporáneos en otras regiones de Europa Occidental. Pérouse de Montclos señala que la solución típica del problema en el románico francés es la que viene dada por la independencia de arco y bóveda, con el trasdós del arco marcado en el paramento de la bóveda, la que él denomina «pénétration extradossée», tal como aparece en la primera solución de Toro, el claustro de la abadía de Le Thoronet, las naves laterales de Sant Miquel de Cuxà, la central de la catedral de Elna, el castillo de Loarre o la cabecera de la iglesia portuguesa de Rio Mau. Sin embargo, en el románico leonés sucede lo contrario, pues encontramos la solución de continuidad entre arco y bóveda, la «pénétration filée» de Pérouse de Montclos, no sólo en Toro, sino también en la catedral de Zamora, ligada por tantas razones a la colegiata toresana.²

La solución sorprende por su sofisticación, pues los tratados del siglo XVIII, como el de Frézier, resuelven el problema trazando el arco de medio punto, construyendo la arista de intersección entre los dos cilindros, y disponiendo las juntas de la bóveda de forma que se corten con las juntas del arco en la arista común. No es realista pensar que en la época en que se construyeron la catedral de Zamora y la colegiata de Toro, contemporáneas de los trazados a tamaño natural medievales más antiguos que conocemos, los de las abadías de Bylands y Jervaulx, y muy anteriores a los dibujos de proyecto del palimpsesto de Reims, se realizara un trazado o un dibujo tan complejo.³ Es muy posible que los arcos de Toro y Zamora se construyeran presentando las dovelas de la bóveda y labrando el arco en estas dovelas ya colocadas; Leopoldo Torres Balbás planteó en su día la posibilidad de un método de construcción similar para las trompas de los cimborrios de la colegiata y la catedral.⁴

Durante el período gótico el problema desaparece prácticamente, pues apenas se emplea la bóveda de cañón. Sin embargo, algunos conceptos propios de la época tendrán un efecto apreciable en los desarrollos posteriores del problema. Como se ha repetido tantas veces, los valores de masa del románico se ven sustituidos por

los valores lineales del gótico. Por expresarlo en términos geométricos, hasta ese momento la intersección de dos superficies simples, la bóveda del cañón mayor y el cañón menor que aloja el hueco, da lugar a una curva compleja, alabeada y de cuarto grado. A partir del gótico del siglo XII la situación se invierte. Dos curvas simples, un arco ojivo generalmente semicircular y un arco de círculo perteneciente a un fornero o perpiaño apuntado, actúan como directrices de una superficie compleja, casi siempre una reglada alabeada. Es decir, se pasa de una situación en la que las superficies son el punto de partida y la arista de su intersección la consecuencia, a otra en la que los nervios son los datos del problema y la superficie de la plementería el resultado.⁵

Por otra parte, el trazado de la bóveda gótica se resuelve en planta; se construye la proyección horizontal de los nervios y claves por encima o por debajo de su posición definitiva, y por medio de plomadas se controla la correspondencia de la bóveda construida con el trazado. Disponemos de una descripción de este procedimiento en el *Compendio de arquitectura y simetría de los templos* de Simón García, tomada con toda probabilidad del manuscrito de Rodrigo Gil de Hontañón, de mediados del siglo XVI.⁶ Quizá los métodos empleados en los siglos XII y XIII fueran más sencillos, pero todo parece indicar que la idea básica, la concepción del trazado y el control de la ejecución a partir de la planta, ya estaba presente desde el inicio de la época gótica.⁷

En la arquitectura ojival tardía surgen dos innovaciones en la construcción de bóvedas que también se verán reflejadas en las soluciones renacentistas del problema. En el siglo XIII aparece en Inglaterra la bóveda de terceletes, que vista en planta resuelve el encuentro con el arco fornero con un triángulo isósceles de poca altura en comparación con la base; a lo largo del siglo XIV se extenderá por Europa continental. En el gótico español de los siglos XV y XVI las bóvedas pasan a tener un rampante apreciable; es decir, la clave polar de la bóveda está muy por encima de las claves de los forneros, frente a lo que sucede en el gótico del siglo XIII, donde la sección transversal de la bóveda a la altura del polo es prácticamente horizontal.⁸

LUNETAS

El luneto reaparece en el Quattrocento italiano, en edificios como los palacios Pitti, Strozzi, Gondi y Rucellai de Florencia, el Venezia o de San Marco de Roma, el

Piccolomini de Pienza, el ducal de Urbino, la villa medicea de Poggio a Caiano, o la capilla Sixtina, por citar algunos ejemplos ilustres, y generalmente se asocia a bóvedas esquifadas o de cañón construidas en ladrillo. Pero en este momento no se recupera la solución basada en la intersección de dos cilindros, sino que se acude a una solución intermedia entre la idea románica de superficies generadoras y la gótica de curvas directrices. La bóveda principal es un semicilindro o cuarto de cilindro, en un primer momento rebajado y ya en el siglo XVI de sección recta circular. En lugar de hallar la intersección de este cilindro con otra superficie curva, muy difícil de trazar, se emplea la intersección del cilindro con dos planos verticales oblicuos a su eje, pero simétricos respecto al eje del hueco que se pretende abrir. Estas intersecciones serán elipses si la bóveda es de cañón o elíptica, o curvas mixtas formadas por dos arcos de elipse si la sección de la bóveda es un óvalo, pero en cualquier caso su proyección en planta es una recta y es fácil trazarla a tamaño natural en el suelo para controlar la realización del luneto. Por otra parte, la albañilería ofrece la posibilidad de realizar la bóveda de cañón completa y después romperla para abrir el hueco.

El Renacimiento español recoge la solución como otras muchas procedentes de Italia, pero se emplea en su construcción la piedra tanto o más que el ladrillo. Entre los primeros ejemplos están los lunetos de la cripta del palacio de Carlos V en Granada, realizada de 1538 a 1542.⁹ Se trata desde luego de ejemplos atípicos, pues no se abren en una bóveda de cañón sino en una bóveda poligonal. Pero precisamente eso acredita el dominio de esta figura, ya que los gajos de la bóveda poligonal tienen también planta triangular; podemos hablar de lunetos dentro de lunetos.

La implantación definitiva de la solución llegará con la construcción del Monasterio del Escorial, donde la figura recibe el nombre de «luneta».¹⁰ La encontramos en toda la fábrica: en el acceso al patio de los Reyes, en el nártex de la basílica, en los patios de Palacio y de los Evangelistas. Se plantea aquí una disyuntiva que ya estaba presente en los ejemplos italianos: la sección del cilindro de la bóveda da lugar a dos elipses que se cortan en ángulo; la proyección de estas elipses sobre un plano vertical que pasa por la imposta de la bóveda de cañón da lugar a un arco apuntado, lo que es difícil de aceptar en la arquitectura clásica.¹¹ Por lo general, el problema se resuelve por otra vía; si el arco que se quiere abrir en el muro es de medio punto, su clave estará más baja por lo general que el punto de encuentro de las

dos elipses; el luneto tendrá un rampante apreciable, como las bóvedas de crucería de la época, y recibe el nombre de «luneto apuntado capialzado», precisa denominación que aparece en las condiciones del Panteón de El Escorial.¹²

La construcción de este elemento no se expone de forma explícita en los textos españoles de cantería del siglo XVI, pero sí en el tratado de Fray Laurencio de San Nicolás, que construyó la pieza en la iglesia de Novés.¹³ En primer lugar, recomienda disponer el hueco que abre luces como un arco de medio punto levantado en el plano vertical que pasa por la imposta de la bóveda y darle un diámetro igual a la mitad de la luz del cañón. A continuación, se ha de dividir la sección de la bóveda en tres partes, lo que nos da el vértice del luneto, X, y trazar una línea que une la clave del arco de medio punto, Y, con el vértice del luneto, para obtener el perfil de la figura. También se puede trazar fácilmente el alzado del luneto, pues aquí su vértice se representa por B, que está en el eje del arco de medio punto y a la misma altura que X; trazando sendos arcos de circunferencia que unan los arranques del arco de medio punto con B tendremos construido el alzado.

La clave de esta operación está en la división de la circunferencia de la bóveda en tres partes; el radio que une el eje del cañón con el vértice del luneto forma con la horizontal un ángulo de 60° , o $\pi/3$; su coseno valdrá $1/2$, y por tanto, la proyección del vértice del luneto en planta distará del eje de la bóveda la mitad del radio de ésta, y se separará otro tanto de la imposta del cañón. Dado que San Nicolás recomendaba dar al hueco que abre luces un radio igual a la mitad del radio de la bóveda, la proyección del luneto en planta será un triángulo isósceles rectángulo, en el que los dos catetos formarán ángulos de 45° con la hipotenusa, esto es, la imposta de la bóveda. La ventaja de esta disposición es que las proyecciones de las dos elipses que delimitan el luneto sobre el plano vertical que pasa por la imposta de la bóveda, tales como A B, son dos arcos de círculo, puesto que el plano en el que se disponen las elipses es el plano bisector del ángulo formado por un plano perpendicular al eje de la bóveda y el plano vertical que pasa por la imposta de ésta. Por tanto, la proyección de una elipse sobre el plano vertical que pasa por la imposta será simétrica a su proyección sobre el plano perpendicular al eje, pero como ésta coincide con la sección recta de la bóveda, vendrá dada por un arco de círculo.

Hasta aquí la construcción es exacta, muy económica y muy sensata; pero San Nicolás comete un error cuan-

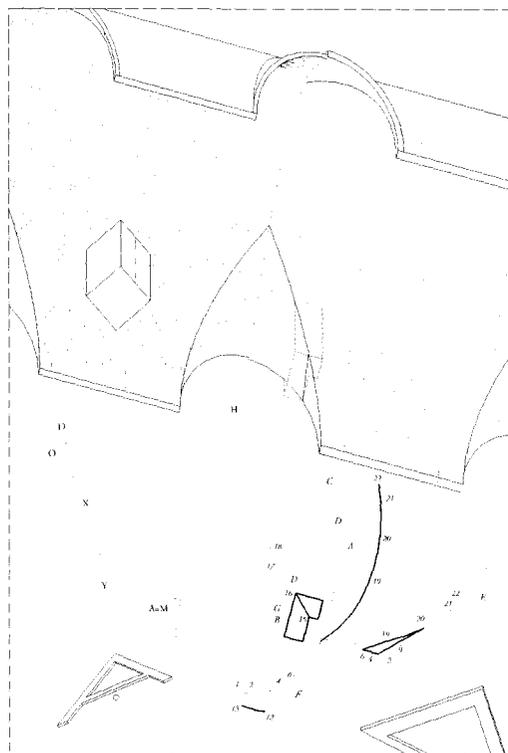


Figura 1.
A la izquierda luneta según Fray Laurencio de San Nicolás.
A la derecha, luneta en cañón derecho según Juan de Portor y Castro

do se plantea hallar la «cimbra» o desarrollo en verdadera magnitud de A B. En primer lugar, asimila esta curva, que como hemos visto es una elipse, a un arco de círculo; esta simplificación es aceptable en la práctica y se plantea con cierta frecuencia en los textos de la cantería española del siglo anterior.¹⁴ A continuación, Fray Laurencio toma la distancia X M y la lleva sobre la línea de impostas. A continuación añade una cuarta parte de esta longitud para obtener el punto H, traza un arco con centro en H y radio igual a H M, que será la «cimbra» buscada; para fijar su extremo, a continuación traza otro arco con centro en M y radio igual a H M; donde interseque el anterior estará para San Nicolás el extremo de la «cimbra».¹⁵

Fray Laurencio hace referencia a otras soluciones menos rígidas para el mismo problema: «Otros traçan la luneta, formando de su ancho vn quadrado y de los an-

gulos tiran cordeles, que se cruzen por la diagonal y hasta el tocamiento que hazen en la cruz, tienden la luneta. [...] mas es de aduertir, que en bobedas de medio punto sube poco esta luneta y en bobedas rebaxadas tiende mucho».¹⁶ El comentario no es fácil de entender, pues de nuevo se forma el triángulo rectángulo isósceles al que nos referíamos antes, y la solución es esencialmente la que acabamos de explicar; pero hay que tener en cuenta que aquí no se aplica la recomendación de dar de ancho a la luneta la mitad de la luz de la bóveda, y puede suceder lo que dice San Nicolás, aunque también lo contrario.

Otras soluciones dependen del material. Si la bóveda es tabicada y no se quiere construir la bóveda completa para romperla después al realizar la luneta, será preciso construir dos cimbras en la unión de luneto y bóveda, y el trazado anterior podrá ser útil. Si por el contrario se piensa materializar la bóveda completa para abrir más adelante el luneto, San Nicolás nos propone una solución práctica tan sencilla como marcar la línea de separación entre bóveda y luneto tomando un cordel de longitud igual a la luz del arco de medio punto del luneto, fijar un extremo a A y marcar con el otro la línea de separación;¹⁷ repitiendo la operación con centro en el otro extremo tendremos las dos ramas de la línea de separación entre bóveda y luneto. Una operación tan simple en apariencia equivale a hallar la intersección de la esfera descrita por el extremo del cordel con el cilindro de la bóveda. Aunque San Nicolás no lo dice, puede entenderse que el luneto en sí se obtiene después de romper la bóveda, materializando una superficie reglada que pasa por las curvas de intersección de esfera y bóveda y por el arco de medio punto que abre luces.

Cuando la pieza se ha de construir en piedra, Fray Laurencio dice que «Si fueren de cantería, guardaras el orden en los cortes que en la capilla por arista [...]».¹⁸ Ahora bien, la «Capilla por arista» de Fray Laurencio es de planta cuadrada y los arcos que se disponen en los lados de la planta son iguales; por lo tanto la capilla viene dada por dos cilindros de igual radio y flecha, el centro de la bóveda está a la misma altura que las claves de los arcos laterales y no se plantea el problema del «capijalzo» del luneto. Para encontrar una descripción clara del procedimiento de traza y labra es necesario acudir a un manuscrito posterior, el *Cuaderno de Arquitectura* de Juan de Portor y Castro, de 1703. Allí sí encontramos una «Luneta capitalzada en cañón derecho» que deja bien claro cuál es la naturaleza del problema.¹⁹

Siguiendo a Portor, para construir esta pieza es nece-

sario trazar en primer lugar la planta del tramo de bóveda en el que se dispone el luneto, ABC ; aunque no se dice explícitamente, en su planta las líneas de intersección entre bóveda y luneto, D , forman ángulos de 45° con la imposta de la bóveda, como en San Nicolás. A continuación se trazan el arco de medio punto F y la sección de la bóveda E y se reparte el dovelaje en el arco F .

Esta operación aparentemente trivial no lo es tanto, pues en esta pieza las juntas de lecho de luneto y bóveda se cortan en la intersección de ambas superficies, dando lugar a la disposición que Pérouse denomina «pénétration filée». Por tanto, la distribución de juntas del luneto condiciona la de la bóveda, y viceversa. En principio, puede pensarse en dividir en partes iguales el cañón, hallar su intersección con la arista y trazar las juntas del luneto desde estos puntos a los que dividen el arco en partes iguales. Pero otras veces se buscan soluciones en las que las juntas del luneto sean, no paralelas entre sí, que no pueden serlo a causa del «capialzo» de la pieza, pero sí al menos paralelas en planta, vistas desde abajo. En tal caso, es imposible que las juntas de la bóveda y el luneto estén distribuidas a intervalos regulares, por lo que es necesario optar por la regularidad de la bóveda o la del luneto.

En el nártex de la basílica de El Escorial, o en la galería baja del Patio de los Evangelistas, se escoge la regularidad de la bóveda, pero en general se disimula con habilidad la desigualdad del luneto, y sólo comparándolo con el arco formero en el que apoya se puede percibir la irregularidad. En cambio, Portor elige la regularidad del luneto, como hará años después Frézier para los «arcos avanzados», sabiendo que, precisamente por el mayor tamaño de la bóveda, las pequeñas desigualdades de las fajas inferiores pasan desapercibidas.²⁰

De esta manera, una vez trazado el luneto F , se bajan perpendiculares desde los vértices de sus dovelas, $6, 4, 2$, hasta intersectar con D , que nos darán las juntas de lecho del luneto; a partir de estas intersecciones, se llevan líneas ortogonales que representan las líneas de lecho del cañón, y se prolongan hasta encontrar la sección de la bóveda. Como en otros trazados de cantería, Portor aprovecha las virtudes de una construcción que entrelaza íntimamente alzado y planta para resolver el problema con una gran economía de líneas.²¹

A continuación, Portor pasa a reflejar el perfil de las juntas de lecho del luneto para conocer su inclinación o «capialzo». Con este fin, toma las cotas de los puntos $6, 2, 4$, del arco F y las lleva a la sección de la bóveda so-

bre una línea vertical que pasa por la imposta de ésta; a continuación, va uniendo cada uno de estos puntos, 2 , por ejemplo, con la junta de lecho correspondiente de la bóveda, $2I$ en este caso, y así sucesivamente, con lo que dispone de los perfiles que le permiten conocer la pendiente de las juntas de lecho del luneto.

Hecho esto, se plantea hallar la proyección vertical de las juntas perpendiculares a los lechos, o «despiezos». Para ello prolonga la proyección horizontal de uno de ellos, por ejemplo G , hasta intersectar el perfil de las dos juntas de lecho que delimitan el «despiezo» y así conocer el desnivel entre sus dos extremos, que es casi todo lo que necesita para trazar dicha junta. En efecto, Portor pretende conocer la forma del «despiezo» con precisión, hasta el punto de obtener también la diferencia de cotas entre el punto medio y el extremo inferior, para construir la proyección vertical de la junta que busca «por la regla de coger tres puntos», es decir, uniéndolos con segmentos de recta, trazando las mediatrices y hallando el centro del arco que los enlaza. En cambio, se despreocupa de la posición del «despiezo», hasta el punto de trazarlo por debajo del arco de medio punto, cuando en realidad está por encima de éste, a causa del «capialzo» de la luneta. Es decir, el autor del cuaderno no pretende representar la pieza completa en el sentido moderno, sino únicamente disponer de los elementos geométricos imprescindibles para ejecutarla con precisión.

Para terminar el trazado, Portor aborda la construcción de la «sercha» o desarrollo de la línea de intersección entre luneto y bóveda; para ello, no tiene más que levantar perpendiculares a su proyección horizontal por los extremos de las juntas de lecho, $15, 16, 17, 18$, y llevar sobre éstas sus cotas tomadas de la sección de la bóveda, $19, 20, 21, 22$.

Portor no expone en esta «traza» la labra de la piedra, pero sí lo hace en la siguiente, la «Luneta capitalzada en un cañón derecho perlongado».²² Para labrar las dovelas que corresponden a la intersección de bóveda y luneto recomienda desbastar primero un prisma mixtilíneo con la forma de la envolvente de la dovela en planta, y darle la altura total de la pieza. A continuación, se va aproximando a la forma definitiva «robando» o eliminando cuñas sucesivas; para ello marca en cada una de las aristas verticales del prisma mixtilíneo su altura, que toma de la sección de la bóveda. Después irá eliminando material por debajo de estos puntos para dar forma al intradós de la dovela; en cambio, no nos dice nada del trasdós, que se debía desbastar de forma muy grosera, como era habi-

tual en la cantería española. Tampoco nos dice nada de la labra de una dovela del luneto que no se encuentre con la arista de separación entre luneto y bóveda, pero hay que entender que este caso más sencillo se resolvía de la misma manera, desbastando una envolvente de la pieza con su forma en planta y marcando sobre cada arista las cotas tomadas de la sección de la bóveda para «robar» cada cuña e ir dando forma a la dovela.

ARCOS AVANZADOS

A mediados del siglo XVI comienza a aparecer en la práctica una alternativa al luneto apuntado, que coincide a grandes rasgos con la solución románica de Toro y Zamora. Se trata de invertir una vez más el problema, trazando el luneto como una superficie cilíndrica sencilla que dará lugar a una curva compleja, alabeada y de cuarto grado, en la intersección con la bóveda de cañón. Al menos desde el siglo XVIII este elemento constructivo se denomina en castellano «luneto», por influencia francesa.²³ Pero en el siglo XVI estas piezas, junto con los arcos abiertos en taludes, reciben el nombre genérico de «arcos avanzados»; son «Arco avanzado en cercha» para Alonso de Vandelvira y «Arco avanzado en bóveda» para Ginés Martínez de Aranda.²⁴

Los ejemplos más antiguos aparecen en obras ejecutadas por Andrés de Vandelvira. La cripta de la catedral de Jaén, hoy museo, construida hacia 1560, se cubre con una bóveda esquifada muy rebajada, y en ella se abren lunetos de intradós cilíndrico. Ni la forma esquifada ni el rebaje afectan a la naturaleza del problema, pues se trata siempre de intersecciones de cilindros; al contrario, el rebaje permite apreciar bien la forma de la pieza, pues permite un vuelo apreciable sin necesidad de grandes luces en el luneto, y esto se aprovecha resolviendo el encuentro entre luneto y bóveda en «pénétration extradossée», esto es, remarcando la rosca del luneto con varias fajas y separándola de la bóveda. En la sacristía de la misma catedral volvemos a encontrar intersecciones de cilindros, pero el efecto es muy diferente; al ser la bóveda de cañón y las luces de los lunetos reducidas, los vuelos son inapreciables, especialmente en los intervalos más pequeños del conocido ritmo binario; de nuevo se remarca la rosca del luneto mediante fajas. También sucede lo mismo en el tramo central de la iglesia del Hospital de Santiago en Úbeda, un cañón corto que sirve de transición entre dos vaídas; se abren lunetos de intradós cilíndrico rematados en un arco de-

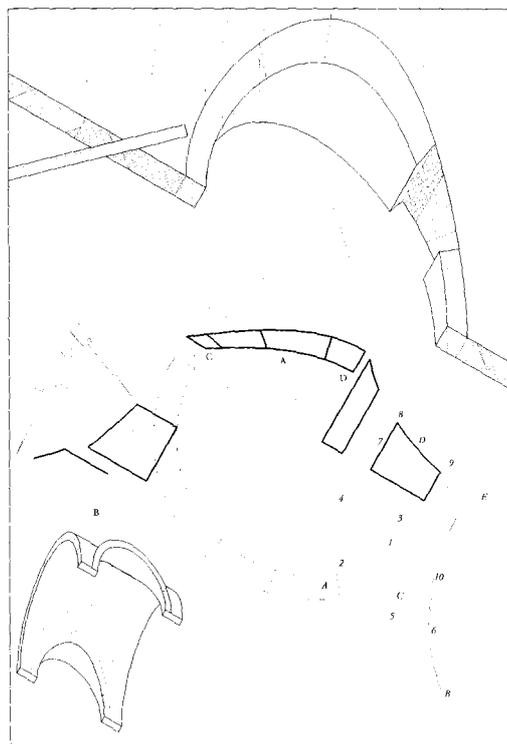


Figura 2.
A la izquierda, arco avanzado en cercha según Alonso de Vandelvira. A la derecha, arco avanzado en bóveda según Ginés Martínez de Aranda

corado con fajas que lo separa claramente de la bóveda. Como en la sacristía de Jaén, la luz del luneto es relativamente pequeña comparada con la flecha del cañón, por lo que los vuelos son casi inapreciables.²⁵ Estas piezas son coetáneas de los lunetos franceses más antiguos, como los de la iglesia de Saint-Jean de Joigny, construida entre 1557 y 1596 por Jean Chéreau, autor de uno de los manuscritos de cantería más importantes del Renacimiento francés.²⁶

En los tres ejemplos giennenses, como hemos visto, el encuentro entre el luneto y el cañón se resuelve remarcando la rosca del luneto, sin intentar coordinar las hiladas del «arco avanzado» y la bóveda. En cambio, en el zaguán occidental del palacio de Carlos V en Granada, realizado desde 1592 a 1594, bajo la maestría de Juan de Minjares, las cosas se plantean de otra forma.²⁷ Tanto la bóveda como el luneto se despojan de toda de-

coración, para lucir mejor su despiece, y el reparto del dovelaje de los lunetos se adapta con destreza al de la bóveda, dividiendo una dovela en tres partes en la clave o uniendo dos dovelas en los arranques para evitar deformaciones excesivas. Tenemos aquí un antecedente de los elegantes lunetos franceses del siglo XVII, incluyendo la solución que Pérouse de Montclos denomina «pénétration filée» y considera canónica.²⁸

Ginés Martínez de Aranda ofrece en sus *Cerramientos y trazas de montea* tres variantes del «arco avanzado»; una recta, en la que los ejes de cañón y luneto se cortan en ángulo recto, y dos oblicuas. Centrándonos en la primera, comenzaremos trazando el arco de medio punto *A* que representa la sección recta del luneto. A continuación se reparte el dovelaje en partes iguales, puesto que esta solución no pretende coordinar el dovelaje del «arco avanzado» y la bóveda. Después se ha de trazar la semicircunferencia que representa la sección recta de la bóveda, *B*, y una línea vertical *C* que corresponde al plano vertical que pasa por la línea de impostas.

Seguidamente Aranda pasa a obtener las «plantas por cara», es decir, las plantillas del intradós del luneto. Para obtener la «planta por cara», se abate con eje en la recta de punta que pasa por el punto *I*. El segmento *3* contenido en la charnela no se desplaza en el abatimiento, pero su extremo no estará sobre la línea de impostas *E*, sino que se separa de ella en una distancia igual a lo que se separa la bóveda del plomo de la imposta a la altura de *I*. Podemos tomar esta distancia de la sección y llevarla sobre *3* para obtener el punto *9*. La recta de punta que pasa por *2* se convierte en la recta *4*, situada a una distancia de la *3* igual a la distancia entre *I* y *2*, que podemos tomar del alzado. De nuevo tomamos la posición de su extremo de la sección: estará separado de la línea *E* lo mismo que se separa la bóveda del plomo de la línea de impostas *C* a la altura de este punto *2* que estamos tratando de situar. Por tanto, llevaremos esta separación entre bóveda y plomo, *5 6*, sobre la línea *4* a partir del punto *7*, obteniendo así el punto *8*, con lo que tendremos definidos los cuatro vértices de la «planta por cara».

Pero ahora nos encontramos con un problema, puesto que tres lados de la «planta por cara» son rectos, pero el que corresponde encuentro de luneta y bóveda no; es la intersección de dos cilindros, una curva alabeada de cuarto grado. Ahora bien, Aranda no pretende representar esta curva con mayor o menor fidelidad, sino construir una plantilla rígida para desbastar la cara de intradós y realizar las cuatro tiradas que la definen; más adelante robará material para obtener el cilindro del in-

tradós. Por tanto, lo que le interesa no es el desarrollo de la cara de intradós, sino su proyección sobre el plano definido por sus cuatro vértices. Como el luneto es una línea alabeada, su proyección sobre este plano será una curva, que Aranda identifica con un arco de circunferencia.

Si el tamaño del arco hace aconsejable trazar esta curva se sigue un procedimiento con un detalle muy sofisticado. Hay que tener en cuenta que lo que le interesa a Aranda no es lo que se separa el arco de círculo *I 2* de su cuerda, sino lo que se separa la proyección del arco *I 2* sobre el plano definido por los cuatro vértices de la «planta por cara» de su cuerda. El plano definido por los cuatro vértices es paralelo a una recta horizontal perpendicular al eje de la bóveda. Por tanto, lo que nos interesa saber es cuánto dista el arco de su cuerda medido en paralelo a una recta horizontal perpendicular al eje de la bóveda. Y esto se puede realizar fácilmente sobre la vertical *C* y la sección *B* de la bóveda, que al mismo tiempo es la proyección del luneto sobre un plano vertical. Aranda traza la cuerda del arco de círculo *10 6* y toma la distancia desde su punto medio al arco de círculo, medida en horizontal. Después lleva esa misma distancia horizontal al punto medio del segmento *9 8*, obteniendo así un tercer punto que le permite trazar el arco *9 8*, con lo que tiene la curvatura buscada. Por un método prácticamente idéntico obtiene las «plantas por lecho», o plantillas de las caras de lecho de la bóveda; con las plantillas de lecho y las de intradós que ha obtenido antes, puede labrar las dovelas de la pieza con toda precisión y sin ninguna dificultad.

Es interesante comparar esta solución con la que ofrece Alonso de Vandelvira en el *Libro de trazas de cortes de piedras*;²⁹ las dos son similares en lo esencial, pero hay importantes diferencias de detalle entre una y otra. Vandelvira traza las plantillas de lecho e intradós abatiendo sobre un plano vertical, y no sobre un plano horizontal como Aranda, para no «entoscar» la proyección en planta de las testas de las dovelas, que ha trazado bajando «plomos» o líneas que representan verticales, desde el alzado, y llevando sobre ellas sus alejamientos al plano frontal.³⁰

La finalidad de esta construcción es curiosa: «la cimbría [...] ha de estar echada en el suelo a nivel y como se fueren asentando las piezas del arco se han de ir aplomando con ella». Es decir, el trazado se ha de realizar en el suelo y a tamaño natural, pero no en cualquier sitio, y desde luego no en las casas de trazas que sabemos que existían en las obras del Renacimiento,³¹ sino preci-

samente debajo del arco, para poder controlar la ejecución. Esta forma de trabajar recuerda al pasaje del manuscrito de Simón García al que nos hemos referido antes, en el cual se construye la planta de una bóveda de crucería en un andamio situado inmediatamente debajo de la bóveda.³²

Vandelvira expone la construcción de palabra en un apéndice al «Arco avanzado a regla», es decir, el abierto en el trasdós de un muro en escarpa, pero advierte que «desta manera se an de labrar todas las cimbrías de los arcos que abancaren», por lo que se debe entender que se aplica también al «Arco avanzado en cercha».³³ Para ello, va tomando las distancias de los vértices de las dovelas y de las mitades de sus cuerdas al plano de simetría del arco del alzado, y marcándolas sobre la línea horizontal *CAD*.

A continuación, Vandelvira toma las distancias de cada punto al plano vertical que pasa por la imposta de la bóveda en el perfil B. Esto no presenta ningún problema en el «Arco avanzado a regla», ya que se abre en un paramento plano y el perfil es una recta. Ahora bien, en nuestro caso el problema es muy complejo, porque para desarrollar adecuadamente la testa del arco es preciso resolver el problema de la rectificación de la circunferencia, que obsesionaba a los matemáticos de la época. Sin embargo, en los textos de cantería españoles del siglo XVI y comienzos del XVII el problema se evitaba por completo; simplemente se iban tomando las longitudes de las cuerdas de cada segmento, como hace Martínez de Aranda al abordar un problema muy similar, el desarrollo de la testa del «Arco en torre redonda», que también viene generado por una intersección de cilindros;³⁴ cabe pensar que Vandelvira pensaba en aplicar esta solución sin más, pues de lo contrario sería necesario emplear un procedimiento específico para el «Arco avanzado en cercha» y ya no se podría afirmar alegremente que todas las «cimbrías» de los arcos avanzados se construyen como la del «Arco avanzado a regla». A partir de aquí, sólo falta llevar estas distancias a lo largo de los «plomos» que se han trazado para cada punto para obtener su imagen en la «cimbría» y unir estos puntos de tres en tres con el compás.

LA DISYUNTIVA EN LA PRÁCTICA: LA IGLESIA ABACIAL DE ALCALÁ LA REAL

Se habla en ocasiones del luneto apuntado como un trazado «erróneo»; el trazado correcto sería el elegante lu-

neto de Le Mercier, el «arco avanzado» de Vandelvira y Martínez de Aranda. Esto es un anacronismo, fruto de los textos de Estereotomía y Geometría Descriptiva de los dos últimos siglos. Como hemos visto, en una obra como El Escorial, que ejerció una influencia decisiva en la arquitectura durante muchas décadas, se emplean lunetos apuntados de manera sistemática. Sin embargo, existe un episodio que parece indicar, no un rechazo del luneto apuntado, pero sí una cierta preferencia por el arco avanzado; y además reviste un interés excepcional porque uno de sus protagonistas es el autor de uno de los dos textos esenciales de la cantería de nuestro Renacimiento.

La iglesia abacial de La Mota, en Alcalá la Real, se cierra de una manera muy singular. La nave, única y muy ancha, se cubre con una bóveda en pescante que recorre sus cuatro lados, por encima de la cual se dispuso una bóveda rebajada de ladrillo, desaparecida en la invasión napoleónica.³⁵ La bóveda en pescante sí ha llegado a nosotros; en tres de sus lados abren lunetos apuntados, con objeto de abrir luces por medio de unos óculos. Estos tres primeros lados fueron realizados entre 1589 y 1599, con proyecto de Ambrosio de Vico, dirección de Ginés Martínez de Aranda y Miguel de Bolívar y ejecución de Marcos López, Sebastián Ruiz y otros canteros. La solución es singular, y puede derivar de algunas secciones de Serlio y De L'Orme, que al cortar por la clave algunas bóvedas de lunetos, pueden sugerir la bóveda en pescante; pero en cualquier caso, hasta donde llega nuestro conocimiento, Ginés Martínez de Aranda no tiene especial reparo en construir los lunetos apuntados.³⁶

Sin embargo, a lo largo de la redacción de los *Cerramientos y trazas de montea*, en la primera década del siglo XVII, las cosas se ven de una forma diferente. Aranda no nos ofrece en la parte conservada de su obra escrita la solución al problema del «luneto capialzado y apuntado»; no es fácil decir si lo incluyó en la porción hoy perdida. Por una parte, Portor expone su luneta entre las bóvedas, y otro tanto podría haber hecho Aranda; tratar de ella en la cuarta parte de su manuscrito, hoy desaparecida, que recogía pechinas y bóvedas. Por otra, hay que tener en cuenta el precedente de Vandelvira, que no habla del luneto apuntado en las copias, en principio bastante completas, que han llegado hasta nosotros.

Ahora bien, se pueden encontrar en los *Cerramientos* dos «trazas» especialmente próximas a la temática abordada en la iglesia abacial; dos «cortes» que no sólo

recogen el problema de las agrupaciones de arcos o «corredores» de Alcalá y de Joigny, sino que también insinúan el encuentro en la esquina de una sala o patio de dos de estos corredores, presente en la iglesia alcaláina y del todo ausente en la francesa.³⁷ Una de estas trazas emplea el «arco avanzado en bóveda», pero la otra no utiliza el luneto apuntado que conocemos, sino medias bóvedas de arista. La elección es curiosa, porque la bóveda de arista es un caso particular tanto del «arco avanzado» como de la «luneta». Puede entenderse como la superficie mixta formada por dos cilindros de igual radio, que da como intersección no dos curvas de cuarto grado, sino dos elipses; pero también puede pensarse que una de las superficies de la pieza es una reglada que pasa por dos elipses que se cruzan en la clave de la bóveda de cañón.

No es descabellado pensar que aquí Aranda está estudiando nuevas soluciones para las bóvedas de Alcalá, que en aquel momento todavía tenían el testero por construir. No pudo ponerlas en práctica; el cuarto lado de la bóveda en pescante fue realizado entre 1622, después de la muerte de Ginés Martínez de Aranda, por Mateo de Santa Cruz, según traza y condiciones de Ambrosio de Vico, que probablemente derivan de otra traza anterior de Aranda y Vico. Hoy en día se encuentra en muy mal estado, aunque se puede apreciar que los lunetos que se abren en él son de diseño diferente a los de los otros tres lados, más redondeados. Quizá se trate de arcos avanzados, pues en 1624 se acuerda poner unas claves de yeso, hoy desaparecidas, para disimular la diferencia entre los nuevos arcos, «extendidos», y los anteriores arcos apuntados, por recomendación de Luis González, yerno de Aranda.³⁸ Es decir, Mateo de Santa Cruz, y quizá Vico y Aranda, prefieren el arco avanzado al luneto apuntado de los tres primeros lados de la bóveda; pero Luis González y los clientes no piensan lo mismo, o al menos consideran que esta sutileza no justifica la desigualdad entre los lunetos de este tramo de bóveda y los otros tres tramos, y que es necesario ocultarla, aunque sea con la solución de fortuna de las claves de yeso.

Esta moderada preferencia por el «arco avanzado» parece responder, más que a una voluntad formal, a la búsqueda de soluciones óptimas para la construcción en piedra, ya que el «arco avanzado» se traza por medio de abatimientos y se da forma a las dovelas con ayuda de plantillas, mientras que en el luneto apuntado se emplean proyecciones ortogonales y se labra «por robos», método que da lugar a una apreciable pérdida de trabajo y material, como señalan uno tras otro los tratadistas de

cantería desde Philibert De L'Orme en adelante; por el contrario, el «luneto apuntado y capialzado» se sigue empleado de preferencia en la construcción en ladrillo.

NOTAS

Agradezco a Enrique Rabasa su amabilidad al leer un borrador de este trabajo y la agudeza de sus comentarios.

1. Pérouse de Montclos, J.M.: *L'Architecture a la française*. Picard. París, 1982, p. 208.
2. *Ibid.*, p. 112-114.
3. V. Fergusson, P. J.: «Notes on two engraved cistercian drawings», *Speculum*, 1979, pp. 1-17; Branner, R.: «Villard de Honnecourt, Reims and the origin of gothic architectural drawing», *Gazette des Beaux-Arts*, 1963, pp. 129-146.
4. Torres Balbás, L., «Los cimborios de Zamora, Salamanca y Toro», *Arquitectura*, Madrid, 1922 (Ahora en *Anales de Arquitectura*, nº 7, 1996, pp. 125-137); Pérouse de Montclos, J. M.: *L'Architecture a la française*, p. 114.
5. Rabasa Díaz, E.: *La traza en el acuerdo entre forma y construcción*, 1997, p. 26-27. (Memoria inédita de la oposición a la cátedra de Geometría Descriptiva de la Escuela de Arquitectura de Madrid.)
6. Gil de Hontañón, R.: *Manuscrito*, incluido en García, S.: *Compendio de Arquitectura y simetría de los templos*, f. 24 v.-25 v (Ed. facsímil con transcripción. Colegio de Arquitectos en Valladolid. Valladolid, 1991) «Para cortarlas al alto que requieren, se les toma en esta manera. el andamio se hace al nibel de donde comiençan a mover las bueltas, [...] Y porque alli estara vajo por allarse los jarjamentos con sus abançamentos mas altos. Y no se alcançara a asentar los cruzeros sobre ellos, se ara otro segundo andamio como S. Y este tan cuajado de fuertes tablonos, que en ellos se pueda trazar, delinear y montear, toda la cruceria ni mas, ni menos de lo que se ve en la planta. Esto echo y señaladas todas las clauas en su lugar sobre los tablonos dejar caer perpendiculos, de la buelta a ellas, esto es para las que estan en los cruzeros o diagonales. Mas para las maças de todas las otras se hara assi. puesta la clabe maior al alto que le toca, arás vna çercha tan larga que alcance desde [...] el pie de Gallo a la claua maior con la buelta de la diaGonal, y desde estas zerchas dejar caer plomos a las clauas que estan señaladas en los tablonos [...]».
7. Rabasa Díaz, E.: «Técnicas góticas y renacentistas en el trazado y la talla de las bóvedas de crucería españolas del siglo XVI», *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Instituto Juan de Herrera. Madrid, 1996, pp. 424, 431; *La traza en el acuerdo entre forma y construcción*, 1997, pp. 42-43.

8. *Ibid.*, p. 431. Gómez Martínez, J.: *El Gótico español de la Edad Moderna. Bóvedas de crucería*. Universidad de Valladolid. Valladolid, 1998, pp. 125, 131.
9. Rosenthal, E. E.: *The Palace of Charles V in Granada*. Princeton University Press. Princeton, 1985. (Tr. española de Pilar Vázquez Álvarez, *El Palacio de Carlos V en Granada*. Alianza. Madrid, 1988, pp. 61-62).
10. Bustamante García, A.: *La octava maravilla del mundo*. Alpuerto. Madrid, 1994, pp. 237, 238.
11. En un brazo del transepto de Saint-Pierre de Dreux se intenta resolver este problema, con ciertos titubeos, mediante un arco apuntado que alberga en su interior un arco de medio punto que es el que abre luces y se muestra al exterior. V. Pérouse De Montclos, J.-M.: *De la renaissance à la Révolution*. Mengès-CNMHS. París 1989, p. 174.
12. Martín González, J. J.: «El panteón de San Lorenzo del Escorial», *Archivo Español de Arte*, Instituto Diego Velázquez, Madrid, 1959, p. 202; v. también Chueca Goitia, F.: «Sobre arquitectura y arquitectos madrileños del siglo XVII», *Archivo Español de Arte*, Instituto Diego Velázquez, Madrid, 1945, p. 366.
13. San Nicolás, Fr. L.: *Arte y uso de Arquitectura*. Imprenta de Juan Sanchez. S. I. [Madrid], 1639, ff. 103 r.-104 v.; Díaz Fernández, A. J., «Fray Lorenzo de San Nicolás y la iglesia de Novés (Toledo)», *Espacio, Tiempo y Forma. Serie VII: Historia del Arte*, UNED, 1996, p. 118-120.
14. Por ejemplo, Martínez De Aranda, G.: *Cerramientos y trazas de montea*. Pl. 227-229. (Manuscrito c. 1600. Ed facsímil, Madrid, CEHOPU, 1986). V. al respecto Calvo López, J.: '*Cerramientos y trazas de montea*' de Ginés Martínez de Aranda. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 1999, tomo III, pp. 196-197.
15. Si se ha dado a la luneta una luz igual a la mitad de la luz de la bóveda, como recomienda Fray Laurencio, el procedimiento expuesto equivale a dar a la cuerda de la arista de intersección una longitud igual a cinco cuartos de la semiluz de la bóveda. En realidad, esta cuerda es la hipotenusa de un triángulo rectángulo que tiene por catetos la distancia entre M y X, que es igual a la semiluz de la bóveda, y la distancia entre X y el vértice del luneto, que equivale a la mitad de esta semiluz. Por tanto la cuerda de la arista de intersección tiene por longitud la raíz cuadrada de cinco cuartos, o 1,1180 veces, la semiluz de la bóveda, mientras que Fray Laurencio le da 1,25 veces.
16. San Nicolás, Fr. L. : *Arte y uso de Arquitectura*, f. 104 r.- 104 v.
17. San Nicolás, Fr. L.: *Arte y uso de Arquitectura*, f. 104 r.: «mas cuando sin cimbras se pueden tabicar, lo harás, con solo poner vn cordel en el assiento de la luneta A y otro en la C que leuanten lo que tuuieren de ancho las lunetas, y con ellos iràs formando las aristas hasta cerrarlas [...]»
18. San Nicolás, Fr. L.: *Arte y uso de Arquitectura*, f. 104 r. V. también f. 103 v. «Es muy semejante en todo a la capilla por arista [...] y assi cuando llamamos a la capilla por arista, lunetas agregadas, o capilla de lunetas, no sería impropiedad [...] Muchos traçan, y labran las lunetas, guardando la orden de las capillas por arista [...]».
19. Portor Y Castro, J.: *Cuaderno de arquitectura*. 1708, f. 47 de la numeración original. (Madrid, Biblioteca Nacional, Ms. 9114.)
20. Frézier, A.-F.: *La théorie et la pratique de la coupe des pierres et des bois pour la construction des voutes et autres parties des bâtiments civils et militaires ou traité de stéréotomie a l'usage de l'architecture*. Jean Daniel Doulsseker-L. H. Guerin. Estrasburgo-París, 1737-1739, tomo III, p. 37-43.
21. V. Calvo López, J., '*Cerramientos y trazas de montea*' de Ginés Martínez de Aranda, tomo I, pp. 181-183, 189-192.
22. Portor Y Castro, J.: *Cuaderno de arquitectura*, f. 47 v.
23. La acepción aparece de forma un tanto confusa en R[e]jón D[e] S[ilva], D. A.: *Diccionario de las Nobles Artes para Instrucción de los aficionados ...* Antonio Espinosa. Segovia, 1788, p. 130-131; y Bails, B.: *Diccionario de Arquitectura Civil*. Viuda de Ibarra. Madrid, 1802, p. 62, y con toda claridad en Rovira Y Rabassa, A.: *Estereotomía de la Piedra*. Provincial de la Caridad. Barcelona., 1897, p. 84-85.
24. Vandelvira, A.: *Libro de Trazas de cortes de Piedras*, f. 23 v.(Ed. facsímil, *Tratado de Arquitectura*. Caja Provincial de Ahorros de Albacete. Albacete, 1977; Martínez De Aranda, G.: *Cerramientos y trazas de montea*. Pl. 48-50. (Manuscrito c. 1600. Ed facsímil, CEHOPU. Madrid, 1986)
25. Chueca Goitia, F.: *Andrés de Vandelvira, arquitecto*. Diputación de Jaén. Jaén, 1971, p. 176, 181, 184-189, 191, 193, 212-214.; Gila Medina, L., ; Ruiz Puentes, V. M. : «Andrés de Vandelvira: aproximación a su vida y obra», en *Arquitectura del Renacimiento en Andalucía. Andrés de Vandelvira y su época*. Consejería de Cultura de la Junta de Andalucía. Sevilla, 1992, pp. 105-106, 114.
26. Pérouse De Montclos, J.-M.: *De la Renaissance à la Révolution*, pp. 172-173.
27. Rosenthal, E. E.: *El Palacio de Carlos V en Granada*, pp. 143-144.
28. Pérouse De Montclos, J.-M.: *L'Architecture a la française*, p. 114.
29. Vandelvira, A.: *Libro de Trazas de cortes de Piedras*, f. 23 r; v. Palacios, J. C.: *Trazas y cortes de cantería en el Renacimiento Español*. Ministerio de Cultura. Madrid, 1990, pp. 62-63.
30. Sin embargo, García Berruguilla, J.: *Verdadera práctica de las resoluciones de la geometría*. Francisco Mojados. Madrid, 1747, p. 101, no traza la proyección ho-

- rizontal del arco, pero construye las «plantas» en sección.
31. Para la del Escorial, v. Cervera Vera, L.: *Años del primer matrimonio de Juan de Herrera*. Albatros. Valencia., 1985, pp. 84, 94; Bustamante García, A.: *La octava maravilla del mundo*, p. 228; para la de la catedral de Granada, Gómez-Moreno, M.: *Diego Siloé. Homenaje en el IV centenario de su muerte*. Cuadernos de Arte. Granada, 1963, p. 90; para la de la catedral de Sevilla, Pinto, F., Y Jiménez Martín, A.: «Monteas en la Catedral de Sevilla», *Revista de Expresión Gráfica Arquitectónica*, 1992, pp. 79, 80-83; Morales, A. J.: «El proyecto arquitectónico en la Sevilla del Renacimiento. Elementos y condicionantes». *Juan de Herrera y su influencia*. Universidad de Cantabria. Santander, 1992, pp. 343-344; del mismo autor, *Hernán Ruiz «El Joven»*. Akal. Madrid, 1996, pp. 45-46.
 32. Gil De Hontañón, R.: *Manuscrito*, f. 24 v.-25 v. V. Sanabria, S. L.: *The evolution and late transformations of the Gothic mensuration system*. Tesis doctoral, Universidad de Princeton, 1984, p. 52; «From Gothic to Renaissance Stereotomy». *Technology and culture*. Society for the History of Technology, 1989, p. 268.
 33. Vandelvira, A.: *Libro de trazas de cortes de piedras*, f. 24 r., según la numeración original del manuscrito.
 34. Martínez De Aranda, G.: *Cerramientos y trazas de montea*, pl. 4.
 35. Gila Medina, L.: *Arte y artistas del Renacimiento en torno a la Real Abadía de Alcalá la Real*. Universidad de Granada. Granada, 1991, pp. 53-57, 78.
 36. Gila Medina, L.: *Arte y artistas del Renacimiento ...*, pp. 71-72, 76-78.
 37. Martínez De Aranda, Ginés: *Cerramientos y trazas de montea*, pl. 109-112.
 38. Juan Lovera, C.: «Iglesia abacial de Santa María de La Mota de Alcalá la Real. La Pulchra Ignota», *Boletín de Bellas Artes*. Sevilla, 1988, pp. 154, 158-162; Gila Medina, L.: *Arte y artistas del Renacimiento ...*, pp. 80-84.