

**La semielipse peraltada.
Arquitectura, geometría y mecánica
en las últimas décadas del siglo XVI**

José CALVO LÓPEZ
Universidad Politécnica de Cartagena

- I. Arcos peraltados.**
- II. Cálculo de estribos.**
- III. Innovación formal y estructural y reciprocidad hispano-francesa.**

El Monasterio de San Lorenzo del Escorial ocupa un lugar central en la arquitectura española y europea del siglo XVI no sólo por sus valores tipológicos y compositivos, sino también por el interés que ofrecen muchas de sus soluciones constructivas como documentos de historia de la técnica. Incluso las piezas más humildes y menos visibles de la fábrica escorialense plantean problemas complejos y abren una cadena de asociaciones e influencias que nos lleva mucho más lejos de lo que cabría pensar a primera vista.

Algunos tramos de los corredores dispuestos tras las ventanas terminales de la basílica escorialense, que permiten acceder al cimborrio, se cubren con bóvedas trazadas de tal forma que su sección recta viene dada por una semielipse peraltada; las directrices de los arcos fajones que soportan estas bóvedas tienen, también, forma de semielipse peraltada. Probablemente fueron ejecutados en 1581 o principios de 1582, con Juan de Minjares como aparejador de cantería y Juan de Herrera como arquitecto real¹. Estos arcos y bóvedas son muy raros, tanto en la arquitectura construida del Renacimiento como en la tratadística del período, pero no únicos, como veremos, pues cuentan con

1. El 12 de mayo de 1579 se conciertan «los andamios y cimbrías que fueren menester para la boueda del coro [...] conforme a la traça que se le a entregado firmada del señor Juan de Minjares». Las cimbrías de la bóveda del coro están hechas el 16 de octubre de ese año. Sin embargo, algunas obras del coro se retrasan y un memorial de 7 de febrero de 1581, firmado por García de Brizuela y Juan de Minjares, hace constar que se ha contratado con Diego de Sisniega «que hara el coro con sus capillas y pilares [...] por aber puesto buena diligencia en su partida pues la ba ya acabando [...] y porque ha puesto mas diligencia que ninguno de los de las otras partidas que tenían parte en el dho coro y lo a de dar acabado desde aquí al mes de febrero del año que viene de quinientos ochenta y dos». El contrato se hace el 8 de abril de 1581, y especifica que «Diego de Sisniega hara [...] toda la obra de canteria del coro de la yglesia principal del dho monasterio con sus capillas y pilares conforme a la traça que se le diere y hordenare por los señores de la congregacion y aparejador de canteria de la dha fabrica». V. al respecto BUSTAMANTE GARCÍA, A., *La oc-tava maravilla del mundo ...*, Madrid, Alpuerto 1994, pp. 491-493, 501-502.

algunas secuelas; en este trabajo examinaremos estos tipos constructivos desde el punto de vista geométrico y estructural.

I. ARCOS PERALTADOS

Sebastiano Serlio expone, como es sabido, cuatro métodos de construir óvalos de proporciones fijas, pero también un procedimiento que permite trazar un arco semielíptico de cualquier proporción entre luz y flecha, descrito en estos términos:

Tomando la luz del arco que se quiere hacer, y hallado su punto medio, se traza un semicírculo perfecto, y se hace un semicírculo menor con la flecha que se quiere dar al arco, después se divide el círculo mayor en partes iguales, y sean todas llevadas al centro, y de éstas se bajan líneas dejadas caer a plomo, y donde las líneas que van al centro intersecan al círculo menor, se toman puntos, y de estos puntos a las líneas a plomo se tiran líneas rectas [...] y donde esas líneas rectas encuentran las líneas a plomo, se toman puntos, y así de un punto a otro de las líneas a plomo sea tirada una línea curva, que no se puede hacer con el compás, sino con la discreta y práctica mano [...].

Y cuando el arco, o otra bóveda que se quiere hacer, sea de menor altura, hágase un círculo menor del modo dicho arriba [...] y con esta regla se pueden hacer las cimbras de las bóvedas por arista y de lunetos. He querido hacer la figura de abajo, como la superior, para demostrar la diferencia de alturas [...] ².

2. SERLIO, S., *Tutte le opere di architettura*, Venecia 1600, l. 1, f. 11 v.: «Presupposto la larghezza dell' arco, che si vorrà fare, & trouato il mezo, sia fatto un mezo cerchio perfetto, & quanto si vorrà poi che habbia di altezza il detto arco, sia fatto vn' altro mezo cerchio minore di quella altezza, dipoi sia diuiso il cerchio maggiore in parti vguali, et tutte tirate al centro, et le medesime sian lassate cadere a piombo, et doue le linee che vanno al centro intersecaranno il cerchio minore, li sian fatti de' punti, et da essi punti alle linee a piombo sian tiratte linee rette [...] et doue esse linee rette toccaranno quelle a piombo, li sia fatti de' punti e cosi dall' vn punto all' altro delle linee a piombo sia tirata vna linia curua, laquale non si può fare col compasso, ma con la discreta, et pratica mano sarà tirata [...] / Et quando l' arco, ò altra volta si vorrà fare di minore altezza, sia fatto vn cerchio minore tenendo il modo che s'è detto di sopra, & [...] con questa regola si possono fare le armature delle volte a crociere, & a lunette. Ho voluto far l'altra figura quì a canto, benche sia come la superiore, per dimostrare la differentia delle altezze [...]».

Así, Serlio incluye dos figuras, en las que aplica el trazado a arcos de la misma luz y flechas diferentes³, para mostrar el carácter general del método y dejar bien claro que es válido para arcos con cualquier proporción entre luz y flecha. Ahora bien, los dos arcos que muestra son rebajados, ya que en ambos la flecha es menor que la semiluz. Los manuscritos de Hernán Ruiz y Alonso de Vandelvira recogen la construcción a lo largo del siglo XVI, pero en ambos se expone únicamente el caso del arco rebajado⁴.

Sólo a principios del siglo XVII, en los *Cerramientos y trazas de montea*, de Ginés Martínez de Aranda, se explica la construcción mediante dos arcos, uno rebajado y otro peraltado; parece que se quiere mostrar cómo se puede generalizar el procedimiento para los arcos en los que la flecha supera la semiluz. Aranda explica el método en términos concisos:

Supongo que quieres bajar la circunferencia **E** que es la grande con la circunferencia **F** que es la pequeña repartirás entrambas circunferencias en partes iguales y de los puntos de la pequeña sacarás unas líneas paralelas que toquen en los plomos que bajaren de los puntos de la circunferencia grande y adonde tocaren harás unos puntos después cogerás los dichos puntos de tres en tres y quedará formada la circunferencia endulcida **G**⁵.

Ahora bien, si se quiere trazar no sólo el intradós del arco, sino también su trasdós, el método es engorroso y propenso a errores, porque se entremezclan las líneas a plomo del trasdós y el intradós. Para este caso, Aranda propone otro trazado, derivado indirectamente de Durero y De L'Orme, que parte de los mismos principios, pero dispone por separado los dos arcos, uno de igual luz que el arco que nos proponemos construir, y otro con luz doble de la flecha del arco rebajado que queremos obtener. Como en el método anterior, se bajan plomos «de las juntas y mitades» de las dovelas de ambos arcos hasta su intersección con la línea de impostas; pero las

3. Existe una pequeña diferencia entre las luces de los dos arcos, pero parece deberse a la técnica del grabado en madera más que a la voluntad de diferenciar una y otra.

4. RUIZ, H., *Libro de arquitectura*, c. 1550, f. 37, 37 v. (ed. facsimilar, Madrid, Escuela de Arquitectura, 1974); VANDELVIRA, A. DE, *Libro de trazas de cortes de piedras*, c. 1580, f. 18 v. (ed. facsimilar, Caja Provincial de Ahorros, Albacete 1977).

5. MARTÍNEZ DE ARANDA, G., *Cerramientos y trazas de montea*, c. 1600, pl. 2 (ed. facsimilar, CEHOPU, Madrid 1986).

distancias de estas intersecciones al arranque del arco mayor y las alturas respecto a la línea de impostas del arco menor se llevan al arco que se quiere construir, también dispuesto por separado, uniendo los puntos resultantes con arcos de círculo, con lo que obtiene el intradós de un arco elíptico rebajado; invirtiendo las operaciones, Aranda generaliza los procedimientos de Durero o De L'Orme para obtener arcos peraltados.

Además de exponer estos procedimientos para trazar arcos elípticos en su manuscrito, Martínez de Aranda los construyó, con toda probabilidad, al participar en la reconstrucción de la iglesia de Santa Cruz o Catedral vieja de Cádiz, muy afectada por el saqueo del conde de Essex en 1596. En 1595 se había elevado a Felipe II una propuesta para levantar una nueva catedral. Confrontando el plano de Cádiz incluido entre las peticiones a la Corona, publicado por Alicia Cámara, con la documentación escrita que lo acompañaba en un principio, se comprende que el plano de 1595 incluye una planta de la catedral existente, muy similar a la actual iglesia de Santa Cruz. Por tanto, la destrucción de la iglesia en la incursión británica de 1596 no fue total, lo que viene a confirmar las tesis que mantenía Antón Solé en 1975. Habían ardido el alfarje de madera, y el coro y los elementos de separación entre las tres naves y soporte de la cubierta debían de estar en muy mal estado, pero quedaban en pie la caja de muros y algunas capillas laterales⁶.

Al retirarse los ingleses, la ciudad se vio obligada a renunciar al proyecto de nueva catedral de 1595 y abordar la reconstrucción de la

6. Memorial del Deán, Cabildo y Concejo de Cádiz a Felipe II, pidiendo licencia para edificar la nueva catedral del año 1595, s. m., s. d.: «y que sea en el sitio que es señalado en la planta de la ciudad por que a parecido a todos mas acomodado y el obispo ha ofrescido y se ha obligado a dar cada año de los q[ue] esta obra dure dos mill du[os] para ella y mill y qms. ducados luego para ayuda a comprar el sitio»; Informe de Tiburzio Spanocchi acerca de la petición de licencia para hacer una nueva catedral, s. f. (1595-1596): «E visto el sitio que se le representa por las traças que v[ra. Magd. ha mandado entregarme y me parece muy apropiado para este efeto porq[ue] esta en lugar llano y en la mejor comodidad para los vezinos de la ciudad aprouechandose en parte de la comunicacion de la plaça maior porq[ue] esta de junto las cascas que estan en este nuebo sitio q[ue] se propone creo son de poco valor pues estan arrimadas a una vieja muralla de la ciudad»; ambos documentos en el Archivo General de Simancas. Patronato eclesiástico, leg. 52, documentos sueltos. V. también ANTÓN SOLÉ, P., «La catedral vieja de Santa Cruz de Cádiz...», *Archivo Español de Arte*, XLVIII, 1975, pp. 84-88, 96; CÁMERA MUÑOZ, A., *Fortificación y ciudad en los reinos de Felipe II*, Baren, Madrid 1992, p. 130.

antigua iglesia. En un primer momento se envían al Consejo de Castilla trazas de Cristóbal de Rojas. El obispo, don Maximiliano de Austria, protector de Aranda, impulsa las obras; la Corona, el cabildo y la ciudad aportan fondos; el 27 de abril de 1600 se remata en Martínez de Aranda la ejecución de parte de la obra, y el 2 de junio de 1602 se puede reanudar el culto⁷.

Se trata de una iglesia-salón de planta muy alargada, con siete tramos y tres naves, resuelta con columnas toscanas sobre las que apoyan arcos de cantería, tanto en dirección transversal como longitudinal. El perímetro estaba fijado por los muros conservados, pero las columnas se colocan cuidadosamente de manera que respeten los machones entre capillas laterales y determinen tramos de profundidades aproximadamente iguales. Se disponen arcos elípticos rebajados en los perpiños de la nave central y algunos de separación entre naves, arcos de medio punto en la mayoría de los de separación entre naves y arcos elípticos peraltados como perpiños de las naves laterales, de trazado comparable a los arcos de los corredores de la basílica escurialense. También son singulares las bóvedas, compuestas de cuatro paños unidos en ángulo, como en las bóvedas que ahora llamamos de rincón de claustro, pero apoyadas sobre cuatro arcos, como en las de arista. Este sistema de arcos y bóvedas goza de gran flexibilidad gracias a los arcos elípticos peraltados, lo que permite resolver con soltura las distintas situaciones que se van presentando en función de la anchura de las naves central y laterales, y en las distintas profundidades de los tramos, y responder así a los pies forzados que impone la reconstrucción de la iglesia.

Los arcos elípticos peraltados se relacionan directamente con la obra escrita de Martínez de Aranda, pero también existen vínculos indirectos con la *Teórica y práctica de fortificación* de Cristóbal de Rojas, que, como hemos visto, había dado trazas para la iglesia. Rojas presenta en su tratado un arco esviado con embocaduras de medio punto; al proyectar la embocadura oblicuamente a su plano se obtiene un semicilindro elíptico peraltado. Dicho de otro modo, tenemos un semicilindro en el que la sección por un plano perpendicular al eje es una semielipse peraltada, pero al cortar por los planos verticales de las testas, oblicuos al eje, obtenemos secciones semicirculares.

Alonso de Vandelvira ya había abordado el problema en su *Libro de trazas de cortes de piedras*, pero la solución que expone, aur-

7. ANTÓN SOLÉ, P., *La catedral vieja de Santa Cruz*..., pp. 89, 93.

siendo muy ingeniosa, es iterativa y propensa a acumular errores; Rojas ofrece un método original, más práctico. Es significativo comprobar que en su segundo *Arco viaje contra viaje por plantas y por cara*, Aranda recoge el procedimiento de Rojas, pero incluye una construcción de la sección recta del cilindro, con lo que aparece explícitamente el arco elíptico peraltado. La solución coincide, en lo que nos interesa aquí, con la de las bóvedas peraltadas de los corredores del Escorial; incluso podemos entender que las semielipses peraltadas de la basílica se generan al proyectar oblicuamente un semicírculo, pues las bóvedas peraltadas enlazan oblicuamente con otras bóvedas de sección semicircular⁸.

No hay nada en la biografía de Aranda que lo vincule al mundo escurialense; en cambio, Rojas se formó en El Escorial, y pudo tener relaciones con Juan de Minjares en su etapa sevillana, según Mariátegui; *La Teórica y práctica de fortificación* deriva de las lecciones de arquitectura militar que impartió su autor en la Academia de Matemáticas dirigida por Juan de Herrera. Los vínculos entre la Academia y los ingenieros que se ocupaban de las fortificaciones de Cádiz son muy estrechos. Hacia 1590 había pasado por la ciudad Giuliano Firrufino, que después sería catedrático de la Academia; también está por aquella época en la ciudad Tiburzio Spanocchi, maestro de Rojas, que se había ocupado del proyecto de nueva catedral de 1595 y que sería director de la Academia en su etapa vallisoletana. Con Rojas acude a Cádiz Juan Cedillo Díaz, discípulo suyo, que había leído en la Academia de Matemáticas «la materia de los senos». También se relaciona indirectamente con el mundo escurialense Alonso de Vandelvira, pues sabemos que en 1596 reclama una copia del *Libro de trazas de cortes de piedras*, que se hallaba en El Escorial en poder de Juan de Valencia, discípulo de Juan Bautista de Toledo, junto a Juan de Herrera, al principio de la brillante carrera de este último. Por aquella época, Vandelvira era colaborador de Juan de Minjares en la Lonja sevillana, sustituyéndolo en sus frecuentes viajes a Gra-

8. VANDELVIRA, A. de, *Libro de trazas de cortes de piedras*, f. 27 v.; ROJAS, C. de, *Teórica y práctica de fortificación*, f. 99 v. (ed. facsímil en *Tres tratados sobre fortificación y milicia*, CEHOPU, Madrid 1985); MARTÍNEZ DE ARANDA, G., *Cerramientos y trazas de montea*, pl. 16. v., al respecto, CALVO LÓPEZ, J., «Los trazados de cantería en la "Teórica y práctica de fortificación" de Cristóbal de Rojas», en *Actas del Segundo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Instituto Juan de Herrera, Madrid 1998, pp. 67-75, y «*Cerramientos y trazas de montea*» de Ginés Martínez de Aranda, tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 1999, T. II, pp. 77-83.

nada. No es de extrañar que en 1607 Cristóbal de Rojas recomiende que se le contrate en las fortificaciones de Cádiz, diciendo que «si estuviera en Roma se había de ir por él para la ejecución de estas fábricas»⁹.

De esta manera, los arcos y bóvedas elípticos peraltados y rebajados aparecen en los corredores de la basílica escorialense, en la iglesia de Santa Cruz de Cádiz, en los manuscritos de Vandelvira y Aranda, y en el tratado de Rojas, como un medio para dotar al léxico de la arquitectura clásica de flexibilidad suficiente para resolver problemas métricos derivados de irregularidades y pies forzados. Se recupera así la eficacia formal de los arcos apuntados que, como ha expuesto recientemente Rabasa, se adaptan a la luz de un vano sin dificultades de replanteo, sea cual sea su curvatura; también admiten errores y cambios sobre la marcha gracias a la presencia de una pieza especial, la clave, o al juego de dos dovelas ordinarias cortadas oblicuamente, que resuelven el encuentro de las dos ramas en los arcos con junta en la clave¹⁰.

Esto se percibe con toda claridad en la iglesia de Santa Cruz, donde esta flexibilidad permite a los arcos elípticos rebajados y peraltados ocupar el lugar de los arcos góticos desaparecidos. Es revelador observar que los planos de lecho de las primeras dovelas de los arcos peraltados, pero también de los semicirculares de apoyo en la caja de muros, se disponen en horizontal, como en la jarja o «tas-de-charge» gótica, un recurso empleado en algunas bóvedas escorialenses y en

9. MARIÁTEGUI, E., *El Capitán Cristóbal de Rojas, ingeniero militar del siglo XVI*, Memorial de Ingenieros, Madrid 1880 (ed. Madrid, CEHOPU, 1985, pp. 12, 38, 88); SORALUCE BLOND, J. R., «Ciencia y arquitectura en el ocaso del Renacimiento. Notas para la historia de la Real Academia de Matemáticas de Madrid», *Academia*, 1987, pp. 71, 73, 76, 78, 79, 82, 83; CÁMARA MUÑOZ, A., «La arquitectura militar y los ingenieros de la monarquía española: aspectos de una profesión. (1530-1650)», *Revista de la Universidad Complutense*, 1981, pp. 259-260; «Juan de Herrera y la arquitectura militar», en *Juan de Herrera y su influencia*, Universidad de Cantabria, Santander 1992, pp. 93-94; *Fortificación y ciudad en los reinos de Felipe II*, pp. 186, 189, 220; BUSTAMANTE GARCÍA, A., *La octava maravilla del mundo...*, pp. 18-19; VICENTE MAROTO, M.^o I., «Juan de Herrera, científico», *Juan de Herrera, arquitecto real*, Lunwerg, Barcelona 1997, p. 162; PLEGUEZUELO HERNÁNDEZ, A., «La Lonja de Mercaderes de Sevilla: de los proyectos a la ejecución», *Archivo Español de Arte*, 1990, pp. 26-34.

10. RABASA DÍAZ, E., *Forma y construcción en piedra. De la cantería medieval a la estereotomía del siglo XIX*, Akal, Madrid 2000, pp. 43-46.

algunos arcos de los *Cerramientos* de Martínez de Aranda¹¹. Esto no es óbice para decorar los arcos con tres fajas al modo clásico; podemos entender los arcos elípticos peraltados como un trasunto «al romano» de los arcos apuntados de la tradición medieval.

Pero si en la iglesia de Santa Cruz el recurso a los arcos elípticos se emplea para resolver problemas graves de una construcción real, en la basílica escurialense su uso parece un tanto caprichoso: no se comprende con facilidad qué necesidad hay de disponer arcos peraltados, que plantean incómodos problemas de construcción, tanto en la labra de las dovelas, que requiere un baivel o cercha diferente para cada una, como en la construcción de la cimbra. Las bóvedas peraltadas, es cierto, resuelven con elegancia el encuentro de dos corredores de ejes oblicuos, pero podría buscarse una solución más sencilla sin más que disponer arcos fajones de medio punto en los encuentros entre bóvedas, y hacer acometer contra ellos a las bóvedas oblicuas. Se diría que los arcos y bóvedas de los corredores responden a un propósito experimental, lo que cuadra con su situación en un lugar apartado.

II. CÁLCULO DE ESTRIBOS

Algunos indicios indirectos parecen señalar que el experimento tenía una finalidad no sólo, o no tanto, formal o geométrica, sino también mecánica o estructural. Ginés Martínez de Aranda expone en los *Cerramientos y trazas de montea* una regla para dimensionar el canto de los estribos de los arcos. Se trata de dividir el intradós del arco en tres partes, bajar una vertical hasta su intersección con la línea de impostas y tomar la distancia desde esta intersección hasta la jamba como ancho del estribo. Como es lógico, a mayor luz del arco, más ancho será el estribo; para arcos de la misma luz, cuanto más peraltado sea el arco, más estrecho será el estribo.

Aparentemente, la regla no tiene relación alguna con los arcos elípticos peraltados. Ahora bien, como ha señalado Huerta, el méto-

11. MARTÍNEZ DE ARANDA, G., *Cerramientos y trazas de montea*, pl. 14, 18. V al respecto RABASA DÍAZ, E., *Forma y construcción en piedra...*, p. 167, y ALONSO RODRÍGUEZ, M. A., y LÓPEZ MOZO, A., «Levantamiento de la cúpula de la iglesia del monasterio de San Lorenzo de El Escorial», en *X Congreso Internacional Expresión Gráfica Arquitectónica*, Universidad, La Coruña 2002, pp. 305, 308, y CALVO LÓPEZ, J., «*Cerramientos y trazas de montea*» de Ginés Martínez de Aranda, t. II, p. 65-68.

do de Aranda reaparece en *L'Architecture des voûtes*, del jesuita François Derand, sin ninguna variación sustancial: en lugar de bajar una perpendicular desde el tercio del desarrollo del arco, intersectar con el plano de impostas y medir la distancia a la jamba, Derand traza una recta que pasa por el tercio del desarrollo del arco y por la jamba, y después traza un arco con centro en la jamba que pasa por el tercio del desarrollo del arco; por el punto donde este arco intersecta a la recta antes trazada ha de pasar la cara exterior del estribo. La solución conduce siempre al mismo resultado que la de Aranda, pues los dos segmentos que van del tercio del desarrollo a la jamba y de ésta a la cara exterior del estribo presentan simetría central respecto a la jamba y, por tanto, son de igual longitud y pendiente; de tal manera sus proyecciones sobre el plano de impostas son iguales; por tanto, el ancho del estribo es igual a la distancia entre la proyección del tercio del desarrollo y la jamba, como en Aranda. Derand ilustra la regla con tres arcos de medio punto, escarzano y apuntado, exactamente igual que Aranda, pero además añade un arco elíptico peraltado. El jesuita conocía, sin duda, los arcos peraltados de la iglesia del colegio de La Flèche, de Jacques Martellange, pues estudió y enseñó matemáticas allí, y también construyó arcos de esta traza en la iglesia parisina de Saint-Paul-Saint-Louis, en la posición que ocuparían los arcos apuntados de las ventanas altas de una iglesia gótica¹².

Probablemente, los constructores de los arcos elípticos del Escorial, Aranda, Martellange y Derand, adoptan estas novedades porque intuyen que su eficacia estructural es superior a la de los demás arcos

12. DERAND, P. F., *L'Architecture des voûtes ou l'art des traits et coupe des voûtes*, Sébastien Cramoisy, París 1643, f. 6: «Soit donée la voûte en plein cintre ABCD marquée en son milieu d'un P divisez la en trois également és points BC, puis par vn des tiers comme CD tirez la ligne droite CDF & vous servant du mesme point D pour centre, & ourant le compas de l'estendüe de la corde CD, faites au dessous, & an dehors oeuvre du dit cintre, l'arc EF. Et par le point F, où le dit arc coupe le ligne CF, tirez l'aplomb FG par le dehors de la muraille, qui doit porter la voûte ACD: & partant l'épaisseur de la dite muraille, pourra estre comprise entre les lignes EH, & FG & ainsi elle sera suffisante pour resister à la poussée de la voûte, comme la pratique & l'experience le font voir.» V. HUERTA FERNÁNDEZ, S., *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España ca. 1500- ca. 1800*, Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 1990, p. 136; EVANS, R., *The Projective Cast*, The MIT Press, Cambridge 1995, pp. 213-214; LE BOEUF, F., «Mathurin Jousse, maître serrurier...». *In situ*, 2001, 1. Disponible en <<http://www.culture.fr/culture/inventai/extranet/revue/001/flb001.html>> Consultado el 24/06/2002.

empleados en su época. Philibert de L'Orme era consciente de que los arcos rebajados requieren más estribos que los de medio punto:

las bóvedas hechas en horno según el círculo perfecto son más fuertes que si las hacéis rebajadas y carpaneles, porque son más débiles y piden un muro más grueso, y de mayor fuerza para sostener los empujes¹³.

La misma conclusión que se puede extraer de la regla de cálculo de estribos que expone Aranda, que también da a entender que los arcos apuntados precisan aún menos estribos que los de medio punto. Por tanto, se puede pensar que los arcos elípticos peraltados son para Rojas y Aranda una alternativa a los arcos apuntados, aún más eficaces, pues aplicándoles la regla del tercio del desarrollo, arrojan anchos de estribos ligeramente inferiores para la misma luz, como pone de manifiesto el grabado de Derand. De hecho, los arcos peraltados se asemejan más a las formas teóricamente ideales de nuestros días, como la catenaria y la parábola, y permiten alojar mejor el anti-funicular de cargas que el arco apuntado.

A partir de la publicación del tratado de Derand, la regla del tercio del desarrollo se convierte en un lugar común: aparece en Blondel, Milliet-Dechales, De la Rue, Tosca y García Berruguilla, y se pierde el recuerdo de su temprana aparición en España; un autor tan informado como Heyman se refiere a ella como «regla de Blondel»¹⁴. Si fuera imprescindible atribuir la fórmula a una sola persona, sería más apropiado llamarle «regla de Aranda», puesto que aparece por primera vez de forma explícita, sistemática y generalizada en los *Cerramientos*, hasta donde llega nuestro conocimiento.

Ahora bien, se ha defendido en ocasiones que la regla es de origen medieval, pero pocas veces se presentan pruebas de este aserto.

13. L'ORME, PH. de. *Le premier tome de l'Architecture*, París, Sebastien, Gramois 1567, f. 113 v.: «[...] les voutes faictes en four selon le cercle parfait, sont plus fortes que si vous les faisiez surbaissées, & à anse de panier, car lors elles sont plus foibles & demandent plus grosse muraille, & de plus grande force pour soutenir les poulées qu'elles sont».

14. BLONDEL, F. N., *Cours d'architecture*, París 1683, p. IV, pp. 417-420; la p. 420 está foliada por error como 410; TOSCA, T. V., *Tratado de Arquitectura Civil, Montea y Cantería, y Reloxes*, tratado XV, p. 116-118 de la ed. de 1727; HEYMAN, J., «Calculation of abutment sizes for masonry bridges», *Colloquium on history of structures*, 1982, Institution of Structural Engineers, Londres 1984 (trad. española de Jorge Conde Conde, en *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica*, Instituto Juan de Herrera, Madrid 1995, p. 272).

Los escasos ejemplos aportados se refieren siempre a obras construidas y nunca a cuadernos de maestros, documentos de obra u otras fuentes escritas. En esos casos, nunca se puede afirmar taxativamente que se haya empleado una determinada regla, ya que se puede llegar al mismo resultado empleando otro método diferente o de forma casual¹⁵. En particular, los ejemplos presentados para sostener la tesis del origen medieval de la regla del tercio del desarrollo corresponden a arcos de medio punto o en cuadrante de círculo. En ese caso, la fórmula del tercio del desarrollo arroja un ancho del estribo igual a un cuarto de la luz;¹⁶ este resultado coincide con otra fórmula más simple, recogida en el *Compendio de arquitectura y simetría de los templos*, de Simón García, en los términos siguientes:

«nunca hallo regla que me sea suficiente, y también la he probado entre arquitectos españoles y extranjeros, y ninguno parece alcanzar verificada regla, mas de un solo albedrío y preguntando por qué sabremos ser aquello bastante estribo se responde por que lo ha menester, mas no porque razón, unos le dan el 1/4 y otros por ciertas líneas ortogonales lo hacen, y se osan encomendar a ello teniéndolo por firme»¹⁷.

Por tanto, el autor de estos pasajes, que se atribuyen por lo general a Rodrigo Gil de Hontañón, diferencia la regla simple del cuarto de la luz de otra en la que intervienen «líneas ortogonales», y se refiere a esta última con escepticismo: si la regla del cuarto de la luz la usan los arquitectos ibéricos y foráneos «de un solo albedrío», la de las líneas ortogonales sólo la emplean algunos osados¹⁸. Parece existir un cierto debate entre el grupo mayoritario que acepta la regla tra-

15. HUERTA FERNÁNDEZ, S., *Diseño estructural...*, p. 37. El propio Huerta reconoce que la validez de los métodos que se basan en superponer trazados ideales a edificios reales es siempre discutible.

16. Siendo E el ancho del estribo, R el radio del arco y L su luz, el tercio del semicírculo es un arco de 60°, y la regla conduce al resultado $E = R \times \cos 60^\circ = 1/4 L$.

17. GIL DE HONTAÑÓN, R., *Manuscrito*, f. 18 v. V. (recogido en el manuscrito de GARCÍA, S., *Compendio de Arquitectura y simetría de los templos*, 1681. Ed. facsimilar y transcripción, Colegio de Arquitectos, Valladolid 1991); KUBLER, G. E., «A late gothic computation of rib vault thrusts», *Gazette des Beaux-Arts*, 1944, p. 142.

18. GIL DE HONTAÑÓN, R., *Manuscrito*, c. 1570, f. 18 v. También Rodrigo traza líneas ortogonales, como las de Aranda, desde los puntos que dividen al arco en tres y seis partes. Aunque las construcciones son similares, su función es completamente diferente. Una de las líneas ortogonales, precisamente la que baja desde el tercio del desarrollo, es innecesaria, como si Rodrigo quisiera mantenerse al día empleando los métodos de una escuela que no es la suya.

dicional del cuarto de la luz, los que defienden una fórmula basada en «ciertas líneas ortogonales», que debía tener cierta semejanza con la de Aranda, y otros autores, como el propio Rodrigo Gil, que se lanzan a proponer soluciones alternativas. Si hay debate, es difícil hablar de una tradición asentada, y el tono empleado por Gil de Hontañón cuando habla de «otros [que] se osan encomendar a [las líneas ortogonales] teniéndolo por firme» es el que emplean los maestros experimentados al referirse a novedades no probadas. Así, parece que la regla del tercio del desarrollo no había alcanzado una aceptación generalizada a mediados del siglo XVI, aunque no se puede descartar que se empleara en ocasiones. A partir de la época de su primera aparición documentada y explícita en los *Cerramientos*, se extiende con gran rapidez a lo largo del XVII, lo que hace sospechar que el procedimiento de las «líneas ortogonales» es relativamente reciente.

Todas estas reglas pueden parecer ingenuas en nuestros días, pero tienen más sentido estructural de lo que se puede apreciar a primera vista. Puede resultar extraño para los hábitos de nuestros días que en estos métodos no corresponda ningún papel al material ni a la escala. Pero en las construcciones de fábrica el material trabaja casi siempre a tensiones muy inferiores a las admisibles, y por tanto son decisivas las consideraciones de estabilidad, que dependen de la forma, y no las de resistencia, por lo que el planteamiento es perfectamente válido en principio. También puede llamar la atención que la altura de los estribos no desempeñe ningún papel en el procedimiento de Aranda, lo que ha llevado, en ocasiones, a considerar como más avanzada la tercera fórmula del *Compendio de arquitectura y simetría de los templos*. Pero como señala Heyman, ya en 1843 Moseley demostró que un estribo que soporta un empuje dado puede tener un espesor independiente de su altura. Por tanto, mientras no jueguen cargas dinámicas, el método de Aranda es conceptualmente válido en este punto. También Frézier critica la fórmula a mediados del siglo XVIII argumentando que no se tiene en cuenta el espesor del propio arco, pero se refiere a su formulación por Derand. Ahora bien, Aranda expone también una regla para hallar el *grueso*, o dicho en términos actuales, el canto del arco, haciendo que crezca en menor proporción que la luz¹⁹. En suma, y en palabras de Heyman, «la regla

19. HEYMAN, J., «Calculation of abutment sizes for masonry bridges», pp. 273-274 de la trad. española; «On the rubber vaults of the middle age and other matters». *Gazette des Beaux-Arts* 71, 1968 (Trad. española de María Teresa Valcarce Labrador. en *Teoría*.... p. 91); «The gothic structure». *Interdisciplinary science reviews*, 1977

[...] recogida por un hombre práctico para un uso práctico nos conduce, por supuesto, a un resultado muy sensato»²⁰.

III. INNOVACIÓN FORMAL Y ESTRUCTURAL Y RECIPROCIDAD HISPANO-FRANCESA

Casi todo lo expuesto hasta aquí son hechos comprobables. Sin embargo, al tratar de llegar a conclusiones, nos vemos obligados a entrar en el terreno siempre peligroso de las hipótesis, porque sigue siendo poco lo que sabemos acerca de dos puntos esenciales: el estado de la ciencia estructural en la España del siglo XVI y la influencia española en la arquitectura francesa del período. Pero precisamente por eso creemos que formular algunas hipótesis, aún siendo arriesgado, puede ser útil, porque señalan direcciones en las que se puede emprender un trabajo quizá fecundo.

En primer lugar, el limitado empleo de la semielipse peraltada en la arquitectura española del siglo XVI, como forma con sentido propio, parece derivar del Escorial, no sólo por la fecha anterior de los corredores de la basílica, sino por la vinculación de Rojas con este mundo. El interés de Martellange y Derand por este problema parece venir de España, ya que la presencia del arco peraltado en la exposición de la fórmula de cálculo de estribos apunta claramente a Aranda, los construyó, con toda probabilidad, en la iglesia de Santa Cruz de Cádiz. Ahora bien, no es verosímil suponer que Derand conociera los *Cerramientos*; sólo sabemos que el manuscrito de Aranda circuló en ámbitos restringidos en Granada y Jaén. Es más realista pensar que los arcos peraltados de La Flèche y Saint-Paul-Saint-Louis derivan de los escurialenses, aún contando con la dificultad que plantea su presencia en un lugar tan apartado. Obvio es decir que

(trad. española de María Teresa Valcarce Labrador, en *Teoría...*, pp. 229, 233; «The collapse of stone vaulting», *Structural Repair and Maintenance of Historical Buildings*, Computational Mechanics Publications, Southampton-Boston 1993 (trad. española de Jorge Conde Conde, en *Teoría...* Madrid, Instituto Juan de Herrera, 1995, p. 355); Sergio Luis SANABRIA, *The evolution ...*, 1984, p. 274, y «The mechanization of design in the XVIth century: The structural formulae of Rodrigo Gil de Hontañón», *Journal of the Society of Architectural Historians*, 1982, p. 291; HUERTA FERNÁNDEZ, S., *Diseño estructural...*, p. 62.

20. HEYMAN, J., «Calculation of abutment sizes for masonry bridges», p. 274 de la trad. española. Se está refiriendo en realidad a Blondel, que recoge la regla casi ochenta años después que Aranda, pero las palabras pueden aplicarse perfectamente a éste.

la fábrica filipina era una obra más que conocida en Francia, donde cabe suponer que pasaría perfectamente desapercibida la prosaica reconstrucción de la iglesia de Santa Cruz después de la humillación de 1596.

Queda abierto el problema de la transmisión de la fórmula de cálculo de estribos. Tampoco es verosímil suponer que Derand la conociera a través del manuscrito de Aranda, y es preciso buscar una fuente común. La aparición de los arcos peraltados en *L'architecture des vouîtes* señala en dirección al Escorial, como la vinculación de Rojas con Herrera y otros indicios. Es sabido que Gil había sido llamado al Escorial a dar su parecer acerca del trazado del basamento de la fachada de mediodía y se había mostrado en desacuerdo con Juan Bautista de Toledo. Por otra parte, las polémicas estructurales se prolongan a lo largo del siglo XVII. Cuando Pedro de la Peña reprocha a Pedro Sánchez que haya proyectado unos muros de ancho igual a $1/9$ de su altura, este último responde que las medidas de los tratadistas eran las apropiadas para bóvedas de piedra, pero que las tabicadas exigían menor grosor; finalmente interviene Juan Gómez de Mora, que da de ancho a los muros $1/6$ de su altura. Pero para nuestros propósitos lo más interesante del suceso es saber que «los maestros del escorial escribieron un breve tratado» sobre el tema, hoy desgraciadamente perdido²¹. Sin entrar en cábalas acerca del contenido del «breve tratado» en su totalidad, lo que sabemos a ciencia cierta es que sale a colación cuando se trata del problema de dimensionar un muro en función de su altura y del comportamiento diferente del ladrillo con respecto a la piedra. Por tanto, parece claro que la obra del Escorial desempeña un papel de modelo, de foco de difusión de conocimientos para la arquitectura española; no sólo en el terreno formal, como es más que sabido, sino también en el estructural y mecánico.

Todo esto son, como adelantábamos, hipótesis pendientes de comprobación. Pero señalan dos campos de trabajo que podrían arrojar resultados quizá sorprendentes para las concepciones asentadas y rutinarias de la arquitectura del Renacimiento español: el de la innovación mecánica y estructural, y el de la influencia de la arquitectura española en Francia, y especialmente en la construcción, el saber estructural y la esterotomía, añadiendo nuevas prue-

21. MARÍAS, F., «Piedra y ladrillo en la arquitectura española del siglo XVI», en Jean Guillaume (ed.), *Les Chantiers de la Renaissance*, Picard, París 1991, pp. 75-76.

bas de esa reciprocidad de intercambios entre los dos países a la que se refería Jean-Marie Pérouse de Montclos en *L'Architecture a la Française*²².

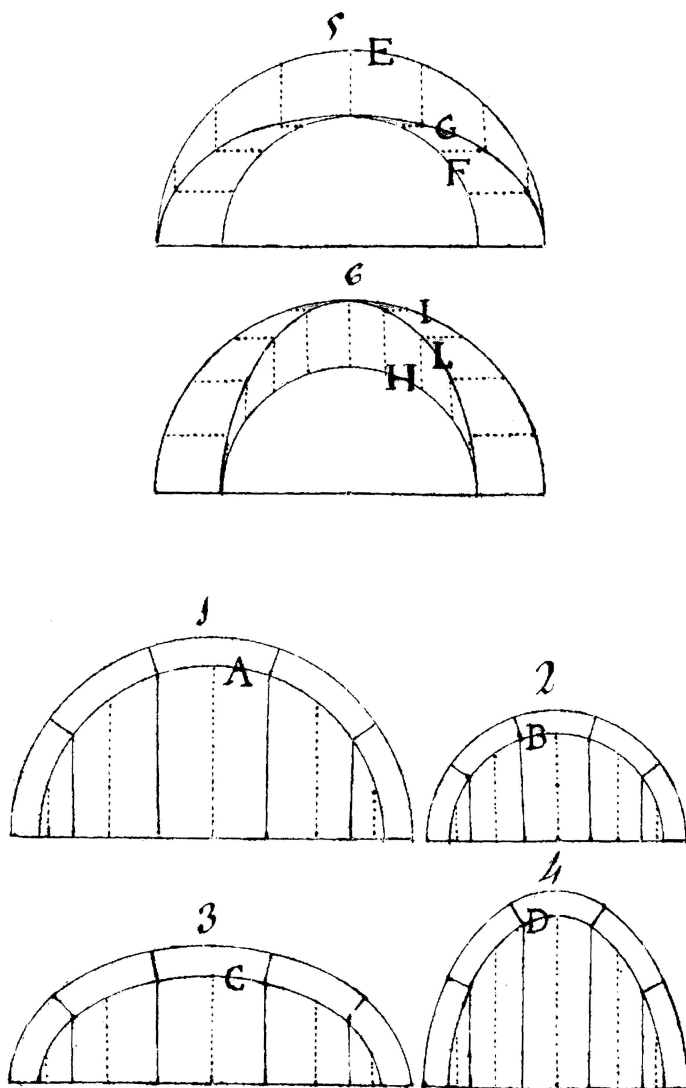


Figura 1. Semielipses y arcos rebajados y peraltados. Ginés Martínez de Aranda. *Cerramientos y trazas de montea*, pl. 2 y 1.

22. PÉROUSE DE MONTCLOS, J. M., *L'Architecture a la française*, Picard, París 1982, p. 212.

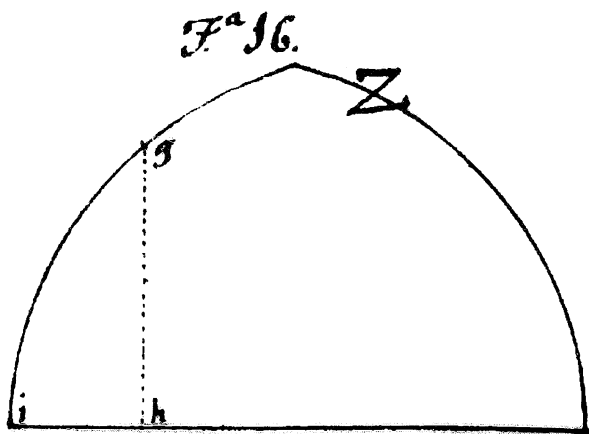
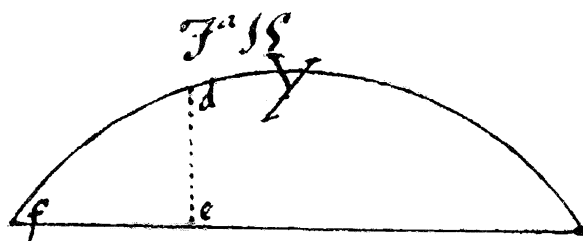
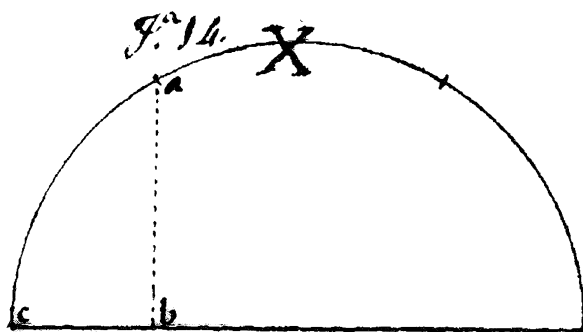


Figura 2. Cálculo de estribos de arcos de medio punto, escazanos y apuntados. MARTÍN DE ARANDA, G., *Cerramientos y trazas de montea*, pl. 5 y 6.

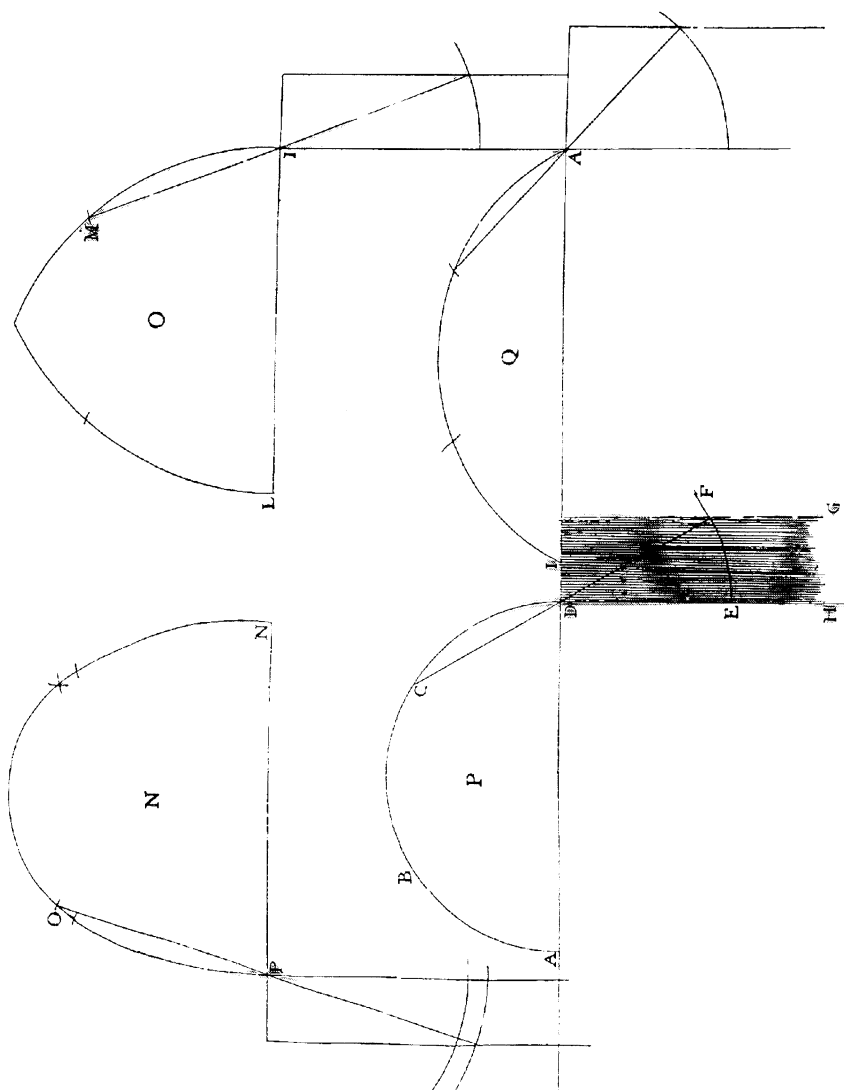


Figura 3. Cálculo de estribos de arcos peraltados, apuntados, de medio punto y escarzanos.
FRANÇOIS DERAND, P., *L'architecture des voûtes*.