

El manuscrito del arquitecto Antonio Ramos y su aplicación a la iglesia del Sagrario de la catedral de Sevilla

Ana M^a Bravo Bernal

El arquitecto Antonio Ramos desempeñó el cargo de maestro mayor de la Catedral de Málaga desde el año 1760 hasta su muerte en 1782. En este periodo de tiempo fue requerido por el Cabildo Hispalense, concretamente en abril de 1776, para emitir un informe¹ sobre la iglesia del Sagrario.²

Tras la visita a la Catedral de Sevilla, el maestro inspeccionó la fábrica tomando sus dimensiones de longitud, latitud, alturas, espesor de los muros, arcos, bóvedas, adornos exteriores, desplome de muros y grietas que plasmó en su escrito, indicando que las grietas eran debidas a asientos antiguos, la construcción de los muros estaba viciada y los adornos del trasdosado de la cúpula suponían un peso excesivo para la misma.

Centrado en este último punto propuso dos intervenciones, una eliminar dichos adornos pétreos y colocar una figura de la Fe de madera forrada con finas lámina de plomo y otra cuestionarse las dimensiones que debe tener un pie derecho para soportar los empujes de un arco. Esta pregunta puso el dedo en la llaga, pues este era el tema más delicado, y que ningún maestro de arquitectura, según Antonio Ramos, ni los más grandes, como Hermógenes, Vitruvio, Andrea Palladio, Sebastián Serlio, Jacobo Vignola, León Baptista Alberto, Blondel, Wolfio y otros, habían conseguido saber de manera razonada, y que siempre lo hacían según la experiencia de cada uno, quedando la duda si habrían acertado adecuadamente, de manera que el material empleado era el justo o no desperdiciándolo, pues no se conocía donde estaba el límite. Este tema fue trata-

do por varios autores como Gautier, Bellidor y Felipe de la Hire, de quien transcribió literalmente párrafos pero, en la opinión del maestro Ramos, no consiguieron extraer unas reglas claras para saber el espesor del pie derecho según el empuje que recibe del arco.

El informe que finalmente emitió sobre el Sagrario supuso una ocasión para poner en práctica sus conocimientos sobre el dimensionado de los estribos mediante un estudio sobre la estabilidad del edificio, cuyo cálculo analítico no conocemos, pero sí su representación gráfica a través de uno de los cuatro planos que lo acompañaban.

Por tanto para entender la intervención que realizó Ramos en el Sagrario analizaremos dos documentos: uno, su manuscrito³ titulado «Sobre la gravitación de los arcos contra sus estribos y sobre el cálculo para la resistencia de éstos» donde explica las claves de su proceder y dos el plano que ilustra su informe.

Comenzando por el manuscrito, es un documento que actualmente se encuentra depositado en la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando de Madrid, donde en su día lo entregó a Ventura Rodríguez, arquitecto real de Carlos III y amigo de Ramos con objeto de entrar a formar parte del contenido del nuevo plan de estudios de Arquitectura que se estaba trazando en dicha Academia, aunque finalmente no sucedería así.

El texto está compuesto por una serie de siete cuadernillos, en los que desarrolla un proceso de cálculo pormenorizado del peso de cada parte del arco y el empuje que estas hacen sobre el estribo, y conse-

cuentemente cuanto tiene que medir éste para soporarlo y no volcar.

Parte de las siguientes premisas:

1. En la primera trata el modo de actuar el esfuerzo que hace el arco sobre el estribo, considerándolo como una palanca de segundo grado; luego extrae unas conclusiones de proporcionalidad entre las medidas del machón y el lugar donde actúa la fuerza y el grado de inclinación de ésta, tomadas del *Compendio Matemático* del padre Tosca.⁴
2. La segunda está basada en la teoría del francés Belidor,⁵ quien a su vez parte de la doctrina de Felipe de la Hire,⁶ aunque también menciona a otros autores, como Gautier,⁷ de los que incluye textos completos en su manuscrito, pero a la vez los critica por no haber sido capaces, según él, de proporcionar unas reglas que permitan dimensionar los estribos. Todas estas teorías se basaban, para el cálculo de los estribos, entre otros principios, en la ausencia de rozamiento entre las dovelas que componen el arco, lo que implicaba que las reacciones que se producían entre ellas tenían que ser perpendiculares a sus planos de unión para que no cayeran por deslizamiento. Esto, que hoy día se ha comprobado que no es cierto, sirvió de base a los tratadistas del siglo XVIII.⁸
3. En tercer lugar, los arcos con los que trabaja son de medio punto, aunque su estudio sirve para cualquier tipo y considera solo la mitad por razón de simetría, como era tradicional en el «Arte de la Montea». También parte de que el arco y el estribo deben tener igual espesor y ser del mismo material, lo que le permite simplificar los pesos y trabajar de esta manera sólo con las respectivas superficies.
4. En cuarto lugar dice que el medio arco y el pie derecho son una sola cosa, y si éste no soporta el empuje se mueve todo el conjunto sobre el hipomodio o punto de giro del estribo, pero si éste es débil, entonces a un tercio del medio arco se agrieta, quedando el primer tercio unido al pie derecho y el resto tiende a bajar, o deslizarse hacia abajo. Es en este punto donde difiere Ramos de Bellidor, pues éste considera el punto de ruptura del arco hacia la mitad, es decir a los 45° en lugar de los 30°, aproximadamente.

A partir de aquí realiza el cálculo de la siguiente manera:

- Toma un arco de medio punto al que proporciona unas medidas concretas.
- Divide el semiarco en dos partes, una hasta los 35°, que considera unida al pie derecho, y la otra la divide en 5 dovelas de 10° cada una, más la clave, que al ser la mitad equivale a 5°, teniendo así el total de los 90° del medio arco.
- Calcula el peso propio de cada dovela y el de la parte del arco unida al pie derecho junto con éste.
- Divide la sobrecarga del arco por planos verticales, coincidentes con las divisiones del trasdós según las dovelas, y calcula sus pesos.
- Suma los valores de los pesos de las sobrecargas y de las dovelas.
- Halla el empuje de cada valor anterior sobre el pie derecho según el ángulo que forma la junta de cada dovela con el plano horizontal, partiendo del vector que representa el peso, y forman 90° con la horizontal, y aplicando reglas de tres va calculando la incidencia de cada peso según su ángulo, así, por ejemplo, la media clave tiene un ángulo de 85° y un peso propio más sobrecarga P, entonces P es proporcional a 90°, como la incógnita lo es a 85°.
- Los esfuerzos hallados, según la inclinación de cada dovela, los considera aplicados en el centro de la superficie de unión entre piezas.
- Halla las distancias de estos puntos medios, donde están aplicadas las fuerzas, hasta el hipomodio o punto de giro del estribo, que está situado en la parte exterior de la base del pie derecho.
- Ahora aplica la teoría de la palanca de 2° grado, multiplicando cada esfuerzo por su distancia al hipomodio y como resultado obtiene el empuje de cada dovela sobre el estribo. La suma de todos ellos es el empuje total que tiene que contrarrestar el estribo con su peso.
- Necesita hallar las dimensiones del estribo para calcular su peso, que aplicado en su centro de gravedad y por la distancia de éste al hipomodio debe equilibrarse con el empuje anterior del arco.

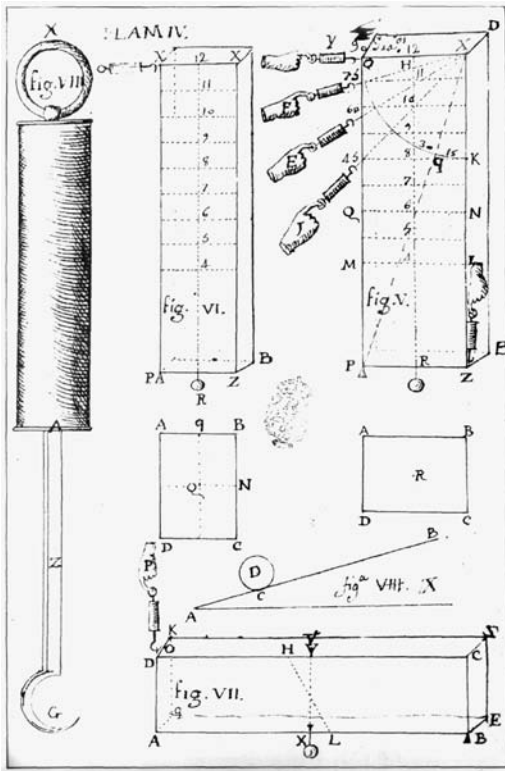


Figura 1
Lámina IV, Manuscrito de Antonio Ramos

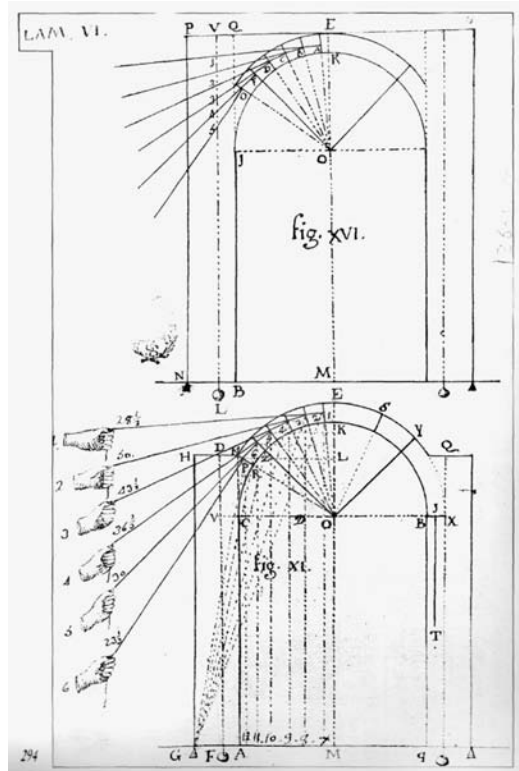


Figura 2
Lámina VI, Manuscrito de Antonio Ramos

Es en este punto donde está poco claro el cálculo pues para hallar el espesor del pie derecho, que es lo que está persiguiendo en todo el proceso, realiza unas extrañas operaciones sumando el alto, más la luz, más el semidiámetro, más la superficie de todas las dovelas y la potencia que hacen sobre él; a esta cantidad le halla la mitad y de nuevo la mitad, le extrae la raíz cuadrada y sale el espesor que busca. Este cálculo, en el que mezcla unidades de longitud, superficie y potencia, no es creíble desde mi punto de vista, siendo más razonable lo que hace Belidor, al resolver una ecuación de segundo grado, donde la incógnita es el espesor del contrafuerte, y cuyo planteamiento es el siguiente: «Peso de los volsores por distancia al hipomodio» es igual al «Peso del estribo por distancia de su centro de gravedad al hipomodio». Siendo en estos dos últimos términos donde in-

terviene la incógnita, que se obtiene resolviendo la ecuación.

Curiosamente, Ramos traduce en su manuscrito, parte del capítulo segundo del tratado de mecánica de Belidor⁹ donde explica esta cuestión, pero la parte correspondiente al desarrollo de dicha ecuación, no la contempla, no sabemos si no lo entendía o el texto que él manejó le faltaba esta página; quizás ello le lleva a criticarlo, y decir que no resuelve el problema tan crucial e importante de dimensionar el estribo.

Todo el proceso que realiza el maestro de Málaga es principalmente analítico y nada gráfico, representando exclusivamente aquellos dibujos necesarios para entenderlo.

La teoría general en la que se enmarca, se desarrolla en el siglo XVIII, y parte de una serie de premisas como son: la ausencia de rozamiento entre las distin-

tas partes en que dividen el arco, y el ángulo de rotura del mismo, que conocen por experiencia y por el empleo de modelos a escala; Antonio Ramos, además de éstas, propone en su manuscrito otras proposiciones que le sirven de base y que habría que cuestionarse, como:

1. Uno, el punto de actuación del peso de los volsores y su sobrecarga en el punto central de la superficie de contacto, cuando debería ser en el centro de gravedad del conjunto, como hace De la Hire.
2. Otro muy importante es el método final para establecer la estabilidad entre ambas partes, arco y estribo. Lo que se hace, realmente, es un equilibrio de momentos, multiplicando las fuerzas por su distancia, en dirección perpendicular a la misma, al punto en que se toma momento, en este caso el hipomodio, pero Ramos la distancia que toma no es esta sino la que une en línea recta el punto de actuación de la fuerza con el punto de momento, siendo esta mayor, por lo que aunque no es correcto, está del lado de la seguridad.

Este proceso lo realiza para arcos simples sin carga, con carga enrasada sobre su clave, con carga de un pie y de ocho pies. Y así obtiene unos resultado que plasma en unas tablas de fácil uso, para que todo el que trabaja en la construcción pueda entenderlas.

Primeramente muestra lo que denomina «Tabla fundamental» que contiene hasta 100 arcos.

Esta tabla está hecha para arcos de 30 pies (8,34 m) de diámetro, espesor del arco 3 pies (0,83 m), que es un décimo de la luz, y una altura de 52 pies (14,45 m); estos valores los mantiene constantes y va variando la carga por pies, de uno en uno; así el primero es el arco sencillo, que no tiene carga, solo su peso propio, el segundo es el que tiene la carga enrasada con su clave, el tercero tiene un pie (0,278 m) de sobrecarga sobre la clave y así sucesivamente. Y en las tres últimas columnas de la tabla proporciona las dimensiones que le corresponden al pie derecho para ese arco concreto, en pies, pulgadas y líneas.

Después ofrece otras tablas más desglosadas en las que llega hasta el centenar de arcos, donde mantiene constante el diámetro de 30 pies y varía la altura del estribo desde 30 (8,34 m) hasta 60 pies (16,68 m), y

*delos Arco de 18
pies yncluso elpe
ante de esa debe
la de 3. Pies*

A. B	—	C. D. E
30.30	—	12.8.1
30.31	—	12.8.8
30.32	—	12.9.3
30.33	—	12.9.10
30.34	—	12.10.5
30.35	—	12.11.0
30.36	—	12.11.7
30.37	—	13.0.2
30.38	—	13.0.9
30.39	—	13.1.4
30.40	—	13.1.11
30.41	—	13.2.6
30.42	—	13.3.1
30.43	—	13.3.8
30.44	—	13.4.3
30.45	—	13.4.10
30.46	—	13.5.5
30.47	—	13.6.0
30.48	—	13.6.7
30.49	—	13.7.2
30.50	—	13.7.9
30.51	—	13.8.4
30.52	—	13.8.11
30.53	—	13.9.6
30.54	—	13.10.1
30.55	—	13.10.8
30.56	—	13.11.3
30.57	—	13.11.10
30.58	—	14.0.5
30.59	—	14.1.0
30.60	—	14.1.7

Figura 3
Tabla el manuscrito de Antonio Ramos

finalmente nos da las dimensiones del estribo, al igual que antes, en pies, pulgadas y líneas. Para calcular arcos de otro diámetro, luz y carga distintos, tiene que hacer una proporcionalidad con los casos que se encuentran en la tabla, por ejemplo propone hallar el estribo de un arco de diámetro 20 pies, luz 50 pies y carga de 30 pies. La proporcionalidad que hay entre el diámetro de 20 y el de 30, que es el que tiene tabulado, es de 1.5, con esta relación afecta a las cargas de 30 pies y son 45 pies y la luz de 50 pies pasa a 75 pies, como las tablas solo llegan hasta los 60 pies los 15 restantes se equivalen a 7 líneas de altura por cada pie sobrante, que son 105 líneas, igual a 8 pulgadas y 9 líneas que se deben sumar al valor que da la tabla de entrar en un arco de carga 45 pies, diámetro 30 y luz 60 pies y hace la proporcionalidad. Avisa que esto es válido exclusivamente para arcos proporcionales. Finalmente traduce en su manuscrito el capítulo veintiséis del tratado de *Arquitectura Civil* del padre Guarino Guarini¹⁰ sobre distintos tipos de bóvedas.

El segundo documento base de esta investigación es un dibujo técnico que se ha convertido en la planimetría más antigua conocida de la iglesia del Sagrario, y que representa la sección transversal del templo por el crucero. Contiene una demostración gráfica del cálculo que ilustra y justifica su propuesta de actuación recogida en el informe que emitió el 19 de abril del año 1776.¹¹

Este plano titulado «Perfil en que se muestran los Pilares, Muros y Bóvedas del Crucero con parte de los adornos exteriores» constituye una visión parcial del edificio pero aporta valiosa información, comenzando por la leyenda:

- A. Espesor del muro en los Costados de Levante y Poniente.
- B. Espesor del muro en los Costados de Mediodía y Norte.
- C. Espesor del muro de los Costados del Crucero.
- D E. Espesor de los Pilares que reciben los Arcos Torales.
- F. Columna de dirección que demuestra la porción de cada volsoz que hace acción contra el Pie derecho.
- G. Trapecios que manifiestan la porción de bóveda que reciben los volsores del Arco Toral.

- H. Líneas que salen de los lechos de los centros de gravedad de las Dovelas que manifiestan el ángulo de la dirección que hacen contra el Pie derecho.
- I. Columna de dirección que manifiesta el centro de gravedad que divide la mitad de la Bóveda y su Pie derecho en dos partes iguales.
- J. Hipomodio de las Bóvedas.
- K. Palancas que manifiestan las longitudes desde el Hipomodio al Centro de gravedad de los Volsores.
- L. Cubo proyectado.

Es una vista diédrica atravesada por una línea vertical que pasa por su centro y la divide en dos partes,

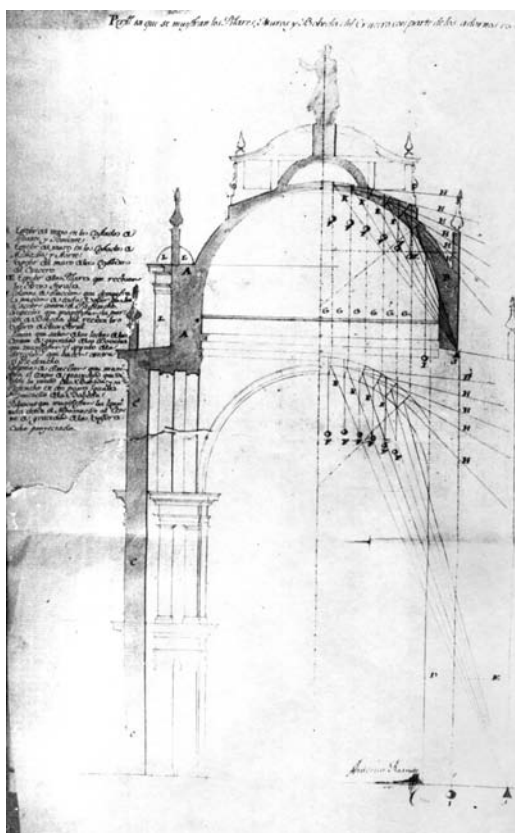


Figura 4
Sección del Sagrario por el crucero

a modo de eje de simetría. La mitad de la izquierda refleja la sección del muro colateral oeste, la del muro que circunda la cúpula y esta misma, al fondo, en proyección, el estribo y el arco sobre el que se sustenta y el cilindro de cantería que proyecta Ramos. En la parte superior de la media naranja, dibuja su óculo cerrado, y todos los adornos que la coronaban, la cupulilla, la estatua de la Fe sobre un pedestal y los arbotantes. En la mitad derecha tiene dibujado prácticamente lo mismo, pero con algunas simplificaciones, pues la utiliza para realizar mediante *Estática Gráfica* el cálculo del ancho del estribo toral, que repite dos veces, una en la cúpula y otra en el arco.

En dicha sección, sin embargo, el muro que rodea la media naranja está dibujado con menor espesor que en la otra mitad, y según la letra que lo señala, corresponde al espesor del muro que está al norte y al sur, que es de una vara (0,836 m), y el de la otra mitad, más grueso, es el espesor que tienen el orientado al este y al oeste, que es de dos varas (1,672 m), diferencia de grosor, que también refleja en su escrito. Siguiendo con el dibujo, el maestro malagueño sitúa el centro de la cúpula por encima del tambor y del friso; la divide en dos partes con una línea inclinada a 45°, a continuación la zona superior la vuelve a subdividir en cinco dovelas iguales más la clave, que es la mitad de las anteriores; la zona inferior de ésta, junto con el muro que circunda la cúpula, lo considera todo un conjunto que debe resistir el empuje de la parte superior de la misma.

En el gráfico desarrollado sobre la media naranja, encontramos un conjunto de líneas que utiliza para el cálculo de los estribos, y que identifica con una serie de letras: las verticales señaladas con una F, indican la dirección en la que actúa la fuerza gravitatoria del peso de cada volso, los rectángulos mixtilíneos que hay sobre el arco, indicados con la letra G, señalan la sobrecarga que tiene cada dovela, las líneas marcadas con una H, son las direcciones de actuación de las fuerzas compuestas por los pesos propios más sobrecargas de cada dovela, sobre el pie derecho, según la perpendicular a la inclinación de cada volso y la letra K, representa las líneas que unen el centro de la superficie de contacto entre cada dovela, que es donde considera que actúa el empuje, con el hipomodio o punto de vuelco del estribo, señalado con la J; éste último grupo de líneas marcan la distancia que Antonio Ramos utiliza al realizar el equilibrio de fuerzas entre los empujes de los volsores y el peso del estri-

bo, también existe en el dibujo una línea horizontal, que en principio no parece relacionar nada, pero que pensamos puede ser, a buen seguro, la altura de la sobrecarga que considera sobre el arco toral y que es la altura media del muro que rodea la cúpula.

Nos queda por decir, que hay un peso identificado como I situado en la vertical del centro de gravedad del conjunto, formado por el pie derecho y la parte de arco que actúa junto con él. Y en la zona inferior a la descrita, realiza otro gráfico igual al anterior, pero sobre el arco en lugar de la cúpula, donde utiliza la misma terminología sobre los mismos elementos. Para terminar con esta mitad derecha del plano, observamos la representación simplificada de la sección del muro del costado de la iglesia, pero no le interesa sino el espesor total del estribo.

Si aplicamos todos estos conocimientos al Sagrario para intentar recomponer el estudio que realizó a este caso concreto, obtenemos lo siguiente:

- a) Los arcos del Sagrario, no cumplen la condición de tener un espesor equivalente al décimo de la luz, que sería de 1,13 m pues tienen aproximadamente 40 cm, pero Antonio Ramos, en su dibujo, lo representa en la mitad derecha con un metro de grosor y a la izquierda, como el que tiene realmente.
- b) El punto de rotura del arco, considerado en el cálculo del manuscrito es 35°, pero en la sección que realiza del Sagrario la coloca en los 45°.
- c) De la mitad del arco que considera como tal, la divide también en cinco partes y media, igual a los realizados en su estudio, pero ahora no son de 10° como antes, sino de 8,18°, lo que hace más engorroso el cálculo.
- d) Sobre el dibujo de la sección representa dos gráficos distintos, como ya se indicó, uno para la cúpula, con el hipomodio situado en la parte exterior de la base del muro que la rodea, y otro para el arco toral con el punto de vuelco en la parte exterior de la base del estribo.
- e) La cúpula que considera es ciega, sin óculo, lo que hace que aumente el empuje, pues estas dovelas son las que más empujen producen por su ángulo de inclinación.

El resultado de todo ello es la construcción de unos cilindros de cantería sobre los estribos, para aumentar el peso de los mismos y centrar la resultante de estas fuerzas dentro de la base

del pie derecho. Pero según su teoría el no pensó de esta forma, pues el resultado obtenido debió de ser un estribo mayor que el que hay, pero en lugar de aumentar la magnitud horizontal, que era bastante complicado, ya que se salía del perímetro de la iglesia, optó por aumentar la dimensión vertical hacia arriba.

- f) Cálculo de los estribos según la teoría y las tablas del manuscrito de Antonio Ramos. Si este maestro llegó a proponer estos refuerzos en la fábrica del Sagrario, es que debió de haber realizado un cálculo, que intentaremos reproducir siguiendo su teoría y con ayuda de la sección del templo que dejó. Los datos que necesitamos para entrar en las tablas de su manuscrito son, la luz del arco, la altura del estribo y la carga, incluido el espesor de las dovelas:

Diámetro del arco 11,31 metros = 40,68 pies, consideraremos 41 pies.

Altura de los estribos 15 metros = 53,95 pies, consideraremos 54 pies

Carga, según su plano = 24,10 pies, medido sobre el dibujo de Antonio Ramos.

Para que dichas tablas sean efectivas tenemos que hallar la proporcionalidad entre este arco y uno de los definidos por él. Por ejemplo lo hacemos con el diámetro 41 / 30 = 1,36, esta es la relación con la que afectaremos a los otros datos, $54 / 1,36 = 39,70$ y $24,10 / 1,36 = 17,72$ pies.

Entramos en la tabla de carga 18 pies de altura, diámetro 30 y altura del estribo 40 pies, que es más desfavorable, y obtenemos que el ancho del pie derecho, que debe ser 13 pies, 1 pulgada y 11 líneas, pasado todo a línea suman 1.895, que afectados por la proporcionalidad anterior ($1.895 \text{ líneas} \times 1,36 = 2.577,20 \text{ líneas}$), dan 17 pies, 10 pulgadas y 8 líneas, es decir 4,97 m.

Las dimensiones de los estribos torales del presbiterio son 3,70 y 3,89 m a izquierda y derecha mirando hacia el altar mayor y los torales del cuerpo de la iglesia miden 3,84 y 3,96 m en la misma posición que los anteriores; deducimos evidentemente, que los machones son escasos en su espesor, desde 1,27 m a 1,01 metros, lo que debió de llevarle a adoptar su propuesta, aunque probablemente el no usara este camino más corto, sino que realizara todo

el proceso analítico y pormenorizado de hallar los pesos de cada dovela y su empuje según su inclinación, etc.

Creo que tras este estudio podemos opinar que Antonio Ramos ha sido, quizás, uno de los maestros más preparados que han pasado por el Sagrario, a pesar de tener una teoría con errores intrínsecos, al igual que todos los ingenieros extranjeros del siglo XVIII ya citados, se preocupaba por temas como el cálculo de los estribos, que estudiaba y ponía en práctica en la catedral de Málaga donde trabajaba. Su actuación en la capilla del Sagrario de la Catedral de Sevilla fue razonable, aunque no muy vistosa, ya que no llegó a tapar todas las grietas, lo que produjo una nueva intervención.

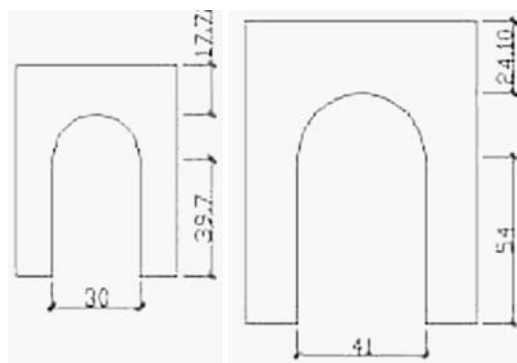


Figura 5

Dibujo A: Arco proporcional al del Sagrario, con el que se entra en las tablas de cálculo de Antonio Ramos, para hallar el espesor de los pies derechos

Dibujo B: Arco con las dimensiones del Sagrario expresadas en pies, y con el que suponemos realizó el estudio

NOTAS

1. Archivo Catedral de Sevilla —Libro de Actas Capitulares 1775–1776. (139). Fol. 228.
2. Bravo Bernal, Ana M^a: El Sagrario, un problema y su historia. Estudio arquitectónico y documental de la capilla del Sagrario de la Catedral de Sevilla. Sevilla, 2008.
3. Camacho Martínez, R: Ramos, Antonio: La gravitación de los arcos contra sus estribos. Manuscrito recogido en los archivos de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando, Madrid.



4. Tosca, V. 1715. *Compendio Matemático...*, vol. III, libro II, 280 y ss., Valencia.
5. Belidor, B. F. 1729. *La science des ingeniers dans la conduite des travaux de fortification et d'architecture civile*. París.
6. Hire, P. de la. 1695. *Traité de mécanique...*, París. «Sur la construction de voûtes, dans le édifices». *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de Paris*, París, 1712.
7. Gautier, H. 1755. *Traité de Ponts où il est parlé de ceux des romains et de ceux des modernes*. París.
8. Huerta Fernández, Santiago y Hernando de la Cuerda, Rafael. 1998. «La teoría de bóvedas en el siglo XVIII: La contribución de Philippe de La Hire». En *Actas del Segundo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, 233-244. A Coruña, 22-24 de octubre de 1998.
9. Belidor 1729.
10. Guarini, G. 1737. *Architettura Civile*, Torino.
11. A. C. S. - L. A. C. 1775-1776 (139). Fol. 228.

Figuras 6 y 7

Cilindros pétreos realizados por Antonio Ramos en el crucero de la iglesia del Sagrario