

Claude Perrault, la columnata del Louvre y la invención de la fábrica armada

Santiago Huerta
Universidad Politécnica de Madrid

Resumen

La columnata del Louvre es la obra maestra de Claude Perrault, no sólo por su atractivo estético, sino también por la solución técnica que adoptó. Perrault puede considerarse el inventor de la fábrica armada, en la que la piedra resiste las fuerzas de compresión y el hierro las de tracción. Este artículo examina el proyecto, la construcción y el comportamiento estructural de la columnata del Louvre, y evalúa su seguridad mediante un análisis de equilibrio dentro del marco del Análisis Límite de Heyman. La columnata es estable, bien proyectada, y los únicos problemas que ha sufrido a lo largo de su historia se deben a la corrosión de los elementos de hierro.

Palabras clave: Museo del Louvre; Claude Perrault; fábrica armada; Análisis Límite de Heyman.

Claude Perrault, the Louvre colonnade and the invention of the reinforced masonry

Abstract

The colonnade of the Louvre is Claude Perrault's masterpiece, not only for its aesthetic appeal, but also for the technical solution he adopted. Perrault can be considered the inventor of the reinforced masonry, in which stone resists compressive forces and iron resists tensile forces. This article examines the design, construction and structural behavior of the colonnade of the Louvre and assesses its safety by means of an equilibrium analysis within the framework of Heyman's Limit Analysis. The colonnade is stable, well designed, and the only problems it has suffered throughout its history are due to corrosion of the iron elements.

Keywords: Louvre museum; Claude Perrault; reinforced masonry; Heyman Limit Analysis.

En memoria de Jöel Sakarovitch

El hierro se empezó a usar en la construcción en la antigua Grecia como un elemento auxiliar para fijar la posición de los sillares o las esculturas en los templos. Los romanos siguieron su ejemplo en este empleo del hierro. Desde entonces, casi en cada época el hierro se ha empleado como un elemento auxiliar, sin una función estructural principal. La primera vez que se emplea el hierro en elementos estructurales esenciales para la estabilidad de la obra es en la columnata del Louvre, proyectada y construida por Claude Perrault. En esta obra, el sistema de elementos de hierro son indispensables para la estabilidad de la fábrica, que se convierte así en una «fábrica armada».

La columnata del Louvre está considerada como la obra maestra de Perrault. Construida entre 1669 y 1670 despertó la admiración de sus coetáneos, y lo ha seguido haciendo lo largo del tiempo hasta la actualidad. El motivo no es solo su belleza y originalidad

formal, sino que constituye un alarde técnico-constructivo (Figura 1). En efecto los dinteles sobre las columnas pareadas, muy esbeltas, dejan luces libres superiores a los 4 m y las columnas están separadas del muro posterior por luces también de unos 4 metros. En la segunda mitad del siglo XVII esas dimensiones se consideraron excepcionales; se pensaba que ni siquiera los antiguos se habían atrevido a salvar tan grandes vanos (hoy sabemos que hay algunos ejemplos con luces superiores a los que se aludirá más adelante). El reto técnico al que se enfrentó Claude Perrault suponía entrar en un terreno desconocido y lo resolvió usando arcos planos reforzados con elementos de hierro, de una manera completamente original.

El largo proceso del proyecto y la construcción de la columnata del Louvre ha sido objeto de numerosos estudios —y de un animado debate que se ha prolongado durante décadas— siendo los trabajos más completos

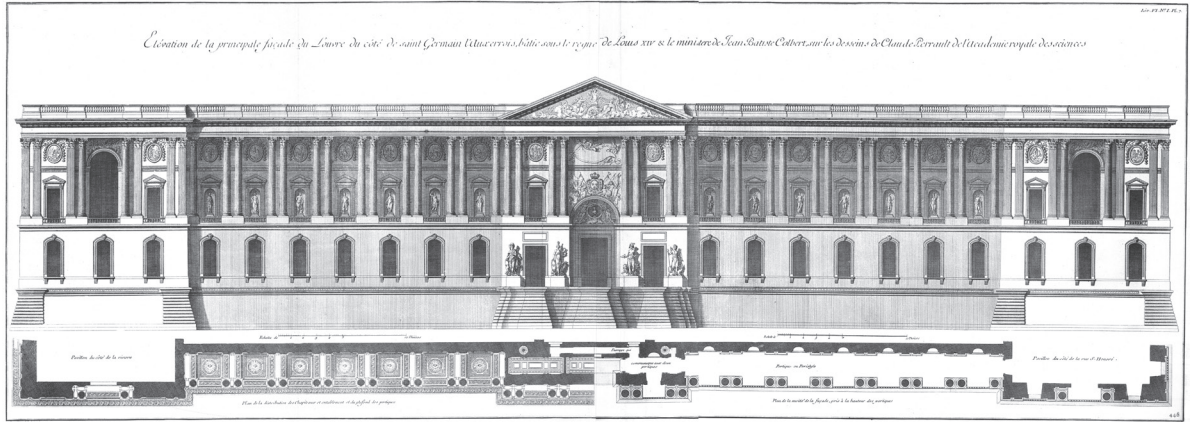


Figura 1. Alzado de la columnata del Louvre (Blondel 1756).

los de Berger (1993) y Petzet (2000). Claude Perrault ocupa un lugar central en esta historia. Pero, como dice Berger, el proyecto de la columnata es, en cierto sentido, una obra colectiva, siendo los otros personajes importantes Le Vau y Le Brun que formaron junto a Perrault el «Petit Conseil», formado por Colbert como responsable de las obras ante el rey Luis XIV. De lo que al parecer no hay duda es de que la solución técnica adoptada es obra exclusiva de Perrault.

Este trabajo tiene el objetivo de poner en contexto la invención técnica de Perrault, tanto históricamente, buscando precedentes de las soluciones adoptadas, como estructuralmente, discutiendo dentro de la moderna teoría del Análisis Límite de las Fábricas de Heyman las distintas soluciones adoptadas (Heyman 1999, 2011).

En primer lugar, se describirá la construcción de la columnata, tomando como base la detallada exposición de Pierre Patte en el capítulo VII de sus *Mémoires* de 1769. Claude Perrault produjo decenas de planos y varios modelos durante la construcción. Su hermano Charles recogió y encuadernó los planos y dibujos que pasaron al Palacio de las Tullerías a su muerte (Perrault 1909). El incendio de las Tullerías en 1871 destruyó esta inapreciable evidencia. Queda sin embargo numerosa documentación escrita en forma de libros de cuentas, e informes de distintos artesanos y arquitectos. Toda esta documentación ha sido analizada y recogida en los libros antes citados de Berger y Petzet, y en otras fuentes que se irán citando a lo largo de este artículo.

LA CONSTRUCCIÓN DE LA COLUMNATA

La columnata consta, a cada lado del cuerpo central, de siete tramos separados por un sistema de columnas pareadas. Los vanos mayores son de 12 pies y 2½ pulgadas (1 *pie* = 0,325 m), es decir, 4,06 m y los arcos planos perpendiculares a la fachada salvan una luz igual. Como se ha dicho la construcción de la columnata está descrita con todo detalle en las *Mémoires* de Patte. Como ha señalado Middleton (1985), Patte publicó antes, en 1755, unos planos de la columnata. Pero en éstos sólo figuran los tirantes visibles. En los doce años transcurridos Patte debió consultar documentos hoy desaparecidos o, quizá, asistió a la primera restauración de la columnata que, según Saddy se realizó en 1767, y que, dice, fue una verdadera reconstrucción. Lamentablemente Saddy no da las referencias documentales a estas intervenciones.¹

La lámina de Patte se muestra en la Figura 2. Hay dos elementos que llaman la atención: el empleo de arcos planos y la enorme cantidad de elementos de hierro presentes. Los arcos planos de dovelas se conocen desde la antigüedad clásica (DeLaine 1990). El hierro también se había venido usando desde entonces en forma de grapas o espigas, para impedir el movimiento de los sillares; en la Edad Media también se emplearon elementos de hierro, en forma de tirantes o atados, pero al parecer su función se limitaba a asegurar la obra durante su construcción; más tarde, en el Renacimiento italiano pueden observarse

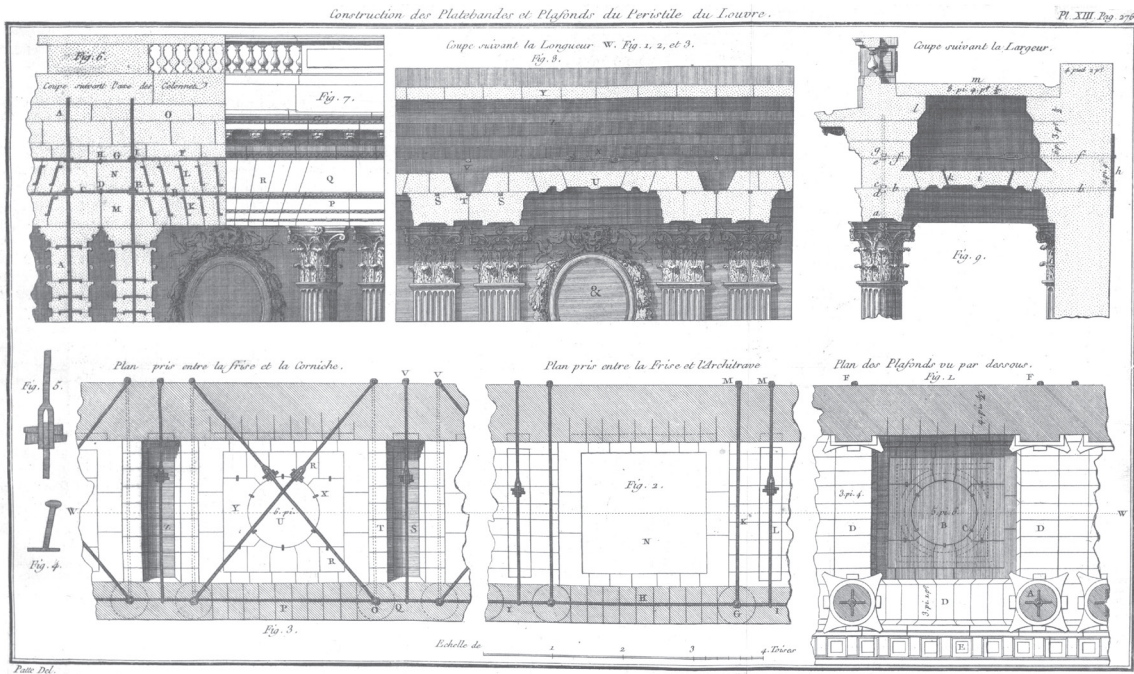


Figura 2. Construcción de la columnata del Louvre según Patte (1769).

con frecuencia tirantes vistos de hierro en las arca-das exteriores que soportan bóvedas, y las cúpulas llevaban con frecuencia zunchos o cadenas de hierro (Werner 1980, Wilcox 1981). Pero lo que se ve en la lámina de Patte es completamente nuevo. Berger y Mainstone (1993) han descrito minuciosamente estos elementos y comentado algunos aspectos estructurales que más adelante intentaremos completar.

Resumimos a continuación la fábrica de sillería y de la disposición de estas armaduras de hierro con referencia a las figuras de la lámina de Patte, Figura 2.

Estereotomía. La columnata está formada por un pórtico de columnas pareadas que soporta un gran entablamento. Las columnas son corintias. Su fuste está dividido en una serie de tambores. Sobre los capiteles apoyan dos grandes piedras que forman los salmeres que reciben a los arcos planos del arquitrabe. Sobre estos salmeres hay otros dos, aproximadamente del mismo tamaño, que reciben los arcos planos del arquitrabe y del friso. (Fig. 6)

- Estos arcos del arquitrabe y del friso salvan luces de unos 4 m entre salmeres, están compuestos de 9 dovelas (*claveaux*), y tienen un espesor de alrededor de 0,9 m; su esbeltez (relación espesor/luz)

es, por tanto, algo menor de 1/4. Las dovelas del arquitrabe están «acodadas» (*coupe à crossettes*), esto es, presentan un quiebro y la parte interior de la junta (aprox. 1/5 de la altura) es vertical. En ambos arcos, la inclinación de las juntas de las dovelas respecto a la vertical es de unos 18° (aproximadamente una relación horizontal-vertical de 1:3).

- Las dovelas del friso tienen, además, una sección muy particular pues su parte inferior se prolonga hacia el interior en un saliente con junta inclinada para recibir las piedras de los techos (*plafonds*), como puede verse en la Fig. 9.

- Perpendiculares a la fachada, y apoyando en los salmeres del arquitrabe hay unos grandes arcos planos pareados, uno por cada salmer, Fig. 8. (Sin embargo en la Fig. 1 no se ha dibujado la junta vertical entre los dos arcos. En la actualidad esta junta no se aprecia.) Su espesor es de unos 0,9 m, su ancho de casi 1,5 m, y salvan una luz de 4 m (su esbeltez es casi de 1/5). Están compuestos de 9 dovelas. En la lámina de Patte no se refleja, pero en la actual columnata estas dovelas están acodadas, como en el arquitrabe.

- Sobre el friso va la cornisa, formada por grandes piedras que vuelan hacia al exterior y también hacia el interior, *Fig. 9*. Son piedras muy grandes; en la parte superior alcanzan una longitud de unos 2,70 m. Hacia el interior se prolongan en falsa bóveda y, como se verá, equilibran casi exactamente el vuelo de la cornisa (esto es, su centro de gravedad está casi sobre el plano del eje de las columnas). La cubierta está formada por losas de piedra de 4,5 m de largo, 1 m de ancho y 0,30 m de espesor, aproximadamente (la luz libre entre apoyos es de 2,7 m).
- apoyados entre los arcos planos transversales y el saliente inferior de las dovelas del friso (dejan un recuadro libre, ver *Fig. 2*) se apoyan una serie de piedras que forman los techos planos (*plafonds*), *Figs. 1, 2, 3*. El espacio es prácticamente cuadrado y se adopta una disposición alrededor de una gran piedra circular central de 6 pies de diámetro por arriba y de 5½ por debajo (1,95 m y 1,79 m) con un espesor de 1 pie y 8 pulgadas (0,54 m); la relación de esbeltez es cerca de 1/10. La piedra circular está rodeada por otras que hacen la transición al cuadrado. La piedra circular está unida a las perimetrales por unos hierros en «T» invertida.

Barras en las columnas. Las columnas están perforadas por unas barras que penetran en el entablamento hasta llegar a la cornisa superior (*Figs. 6 y 9*). Estas barras, dice Patte, están formadas por tres partes unidas entre sí, y tienen unas 3 pulgadas de espesor (algo más de 8 cm). Este espesor lo supone Patte, que reconoce la imposibilidad de ver las barras; les da, entonces, algo más del espesor de 2¼ pulgadas de los tirantes vistos.

Sistema de tirantes. Hay un complejo sistema de tirantes. Están situados a dos alturas:

- en el plano inferior, entre el arquitrabe y el friso, *Fig. 2*, forman una retícula cuadrada. Hay un tirante *H* longitudinal, paralelo a la fachada, que presenta unos ojos que atraviesan las citadas barras verticales de las columnas. Perpendicular al tirante longitudinal hay tres tirantes: dos, *K*, que se anclan en las barras de las columnas y, entre éstos, otro *L* que se ancla en el tirante longitudinal. Este último está dividido en dos partes conectados por una unión con ojos y cuñas (*moufle*), *Fig. 5*, que permite tensar el tirante. Los tres tirantes atraviesan el grueso muro posterior donde se anclan en barras verticales *M*, *h*

en la sección de la *Fig. 9*. Estos tirantes se empostran en unas canales labradas en la parte superior de las dovelas del arquitrabe y tienen un espesor de alrededor de 2¼ pulgadas (unos 6 cm).

- en el plano superior, entre el friso y la cornisa, *Fig. 3*, hay otro sistema de tirantes. Un tirante longitudinal *P* que se conecta a las barras de las columnas. Perpendiculares al plano de fachada hay dos tirantes *S* y *Z* (entre las columnas) que se anclan al tirante longitudinal *P* y por el otro extremo atraviesan el muro y se anclan en la misma barra vertical *M* de la *Fig. 2* (aquí marcada *V*). Finalmente, por cada tramo hay dos tirantes diagonales *R* que forman una cruz de San Andrés. Se anclan en las barras verticales de las columnas y atraviesan el muro anclándose en las barras verticales en que se anclan los tirantes inferiores *K* (*Fig. 2*). Estos tirantes, como se ha dicho, tienen 2¼ pulgadas de espesor.

Sin duda es un sistema complejo. Berger descubrió un dibujo, que fecha hacia 1668, donde posiblemente un herrero explica la distribución del sistema de tirantes con vistas a su ejecución, *Figura 3*. Se trata de un dibujo de obra, que excluye la decoración (simplifica los capiteles como troncos de cono y las columnas como cilindros) pero es muy preciso en cuanto al sistema de tirantes: todas las dimensiones están acotadas en pies, pulgadas y líneas (una línea = 1/12 pulgada = 2,2 mm). La única diferencia con el dibujo de Patte es que en el plano superior añade otros dos tirantes que se anclan en el tirante que une las barras verticales de las columnas. No aparecen las grapas de hierro entre las piedras, ni en los arcos planos, ni en las columnas.

Grapas y elementos singulares de conexión entre piedras. Los otros elementos de hierro son grapas, de distintos tipos, de conexión entre piedras.

- entre las dovelas de los arcos planos hay grapas en forma de «Z» (*Fig. 7*). Estas grapas tienen una longitud de unas 15 pulgadas (unos 40 cm).
- entre los tambores de las columnas hay otras grapas que forman una cruz (*Fig. 1, Fig. 7*), que se anclan en el tambor superior e inferior.
- en los techos planos entre la piedra circular central y las piedras perimetrales (*Fig. 3, Fig. 9*), hay unas piezas en forma de «T» invertida (*Fig. 4*).

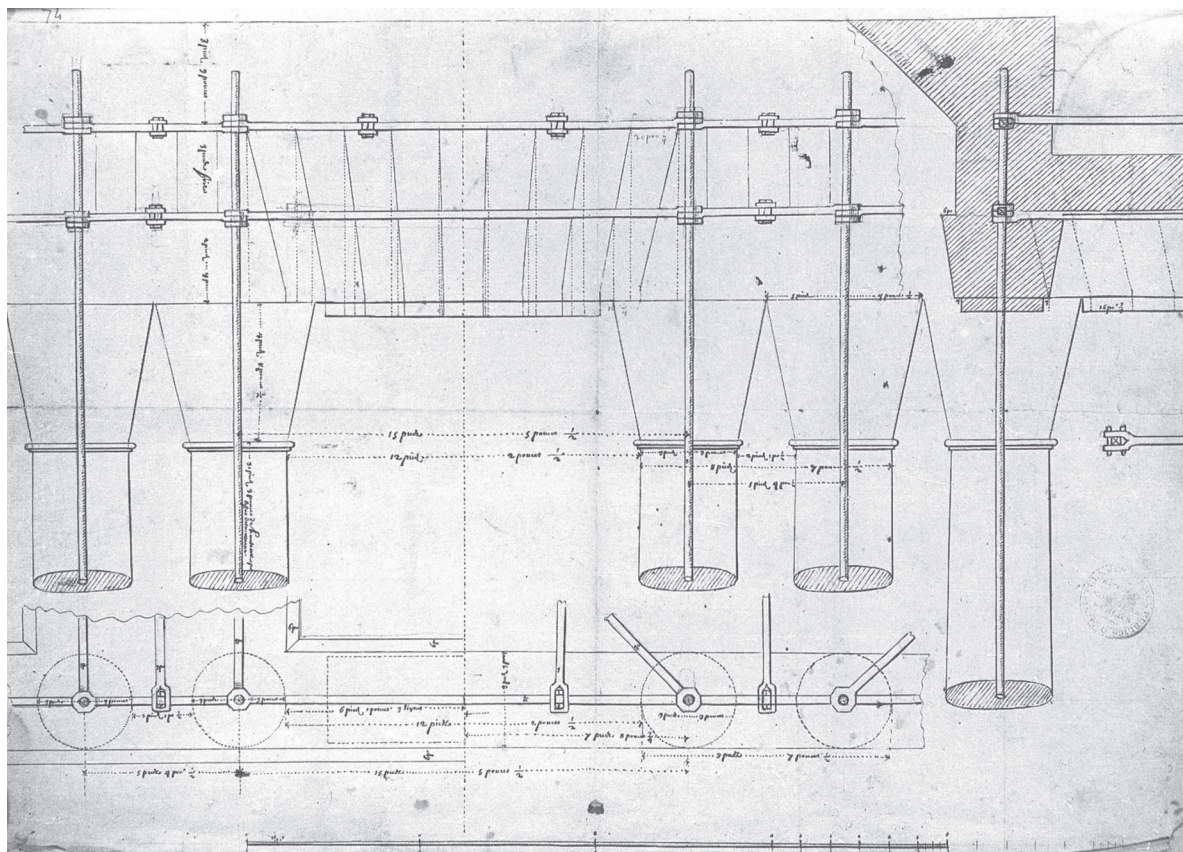


Figura 3. Dibujo anónimo del sistema de tirantes y barras de hierro en la columnata del Louvre, fechado hacia 1668 (Berger 1993, Fig. 78).

La lámina no explica cómo se pudieron introducir algunos de estos elementos. Patte (1769) en la explicación de su *Pl. XIII* (Figura 2) da algunas indicaciones. Middleton (1985) descubrió un manuscrito, que atribuye a Nicolas-Marie Potain, y que fecha a mediados de los años 1760, con el título «Essay en forme de traité sur la construction ou l'on propose une portion d'église pour modèle avec une observation sur les parties de construction que ne sy rencontrent pas» (Ensayo en forma de un tratado de construcción en el que se toma la parte de una iglesia como modelo con observaciones sobre las partes de la construcción que no se encuentran) donde se explican con detalle la forma y las uniones de estos elementos de hierro, con referencia a un proyecto teórico de iglesia.² Por ejemplo, en la Figura 4, puede verse la extrema complicación que supone la colocación de las grapas en «Z».

Al final de su exposición Patte muestra su admiración por el proyecto de la columnata, en el que todo ha sido previsto, incluso si, por algún accidente extraordinario como un rayo u otras causas, desapareciera uno de los tramos, el resto de la columnata permanecería en pie (Patte 1769, 273):

Cette description doit convaincre combien la construction du péristyle du Louvre est solide et bien entendue; tout y a été prévu et obvié, tellement que, si par événement un entre-colonnement venoit à être renversé, soit par l'effet de la foudre, soit par d'autres causes, il ne seroit pas à craindre que celui qui est voisin pût être entraîné par sa chute. (Esta descripción debería convencernos de que la construcción del Louvre es sólida y bien pensada; todo ha sido planeado y todo ha sido previsto y pensado, de modo que, si por alguna causa uno de los intercolumnios fuera derribado, bien por un rayo o por otras causas, no habría motivo para temer que el vecino fuese afectado por su caída).

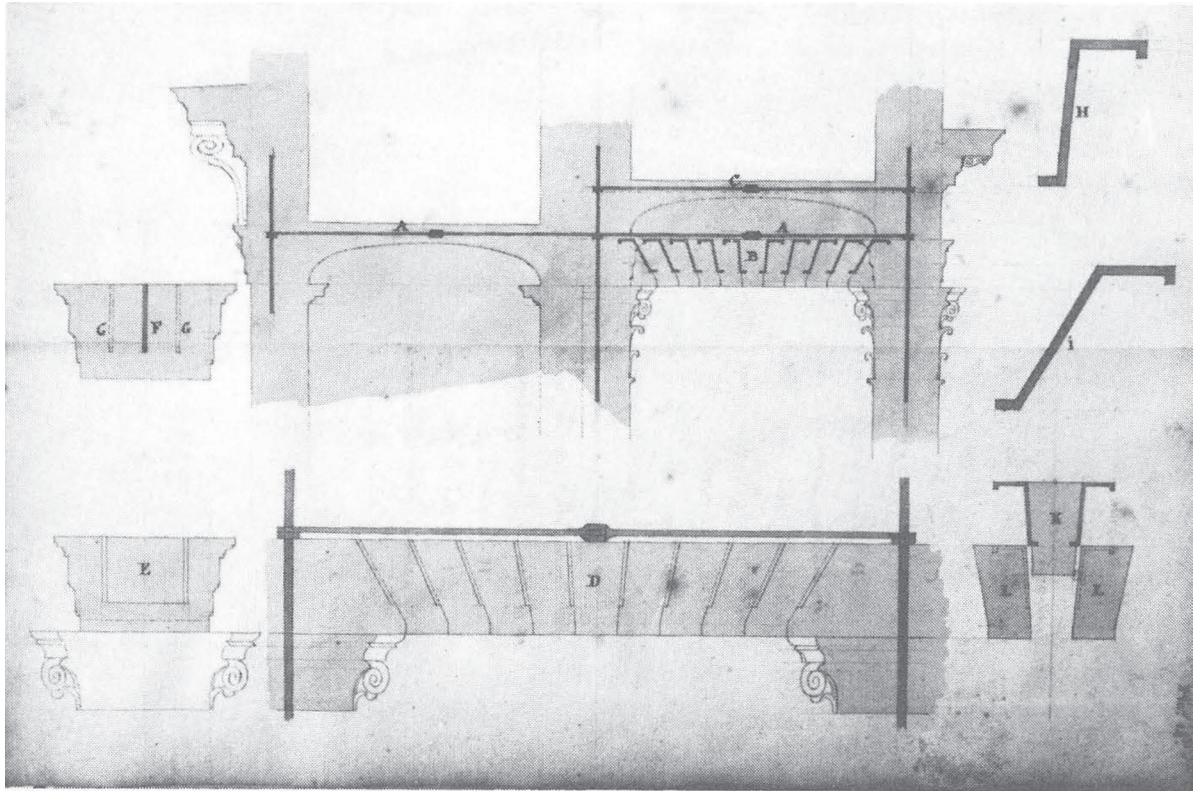


Figura 4. Disposición de tirantes y grapas en arcos planos. Nótese a la derecha la dificultad en la colocación de las grapas en «Z» (Middleton 1985, 60).

Proyecto de la columnata

¿Cómo llegó Claude Perrault a esta disposición tan complicada y sin precedente? Desde luego se trataba de dar solución a un problema técnico. En primer lugar, la columnata debía ser estable. Había que buscar una manera de resistir los grandes empujes hacía afuera de los arcos planos transversales y de los techos. Era evidente que la columnata, muy esbelta, no sería capaz de resistir estos empujes. En segundo lugar, había que evitar cualquier pequeña distorsión producida por el natural asiento de la fábrica. Como se verá, los arcos planos son muy sensibles a cualquier pequeño cedimiento de los apoyos. Un pequeño movimiento no altera en absoluto su seguridad, pero sí puede producir un agrietamiento con un descenso de la clave (más improbable, pero también posible, es que alguna dovela o conjunto de dovelas deslice hacia abajo). Así, se conocía el peligro de que las líneas horizontales de

los arcos de fachada pudieran presentar quiebros en alguno de los vanos, rompiendo la perfección que la obra requería.

Aunque los arcos planos eran conocidos desde la antigüedad; había también algunos ejemplos en Francia: H. Gautier en su *Dissertation* de 1717 cita un gran arco plano en la iglesia de los Jesuitas en Nîmes con una luz de 8,60 m y sólo 0,65 m de espesor, con una relación espesor/luz de 1/13 (para los arcos planos en Francia, ver (Fantin 2017)). Pero se trataba de un arco inusual y no había una experiencia asentada sobre su construcción y comportamiento. Por otra parte, los arcos planos nunca se habían aplicado a pórticos de columnas exentas, estando siempre confinados entre grandes masas de fábrica. Durante el proceso de discusión dentro del Petit Conseil, donde Claude Perrault ya defendió su proyecto de columnata, cuenta su hermano Charles que Le Vau y Le Brun decían siempre que la idea era bonita «en pintura» pero que

sencillamente era irrealizable (Perrault 1909, 87): «M. Le Vau et M. Le Brun ne pouvoient approuver le dessein de mon frère, disant toujours qu'il n'étoit beau qu'en peinture» (M. Le Vau y M. Le Brun no aprobaban el diseño de mi hermano, diciendo siempre que sólo era bello en pintura).

Finalmente, Perrault decidió hacer un modelo a escala, con todas las piedras labradas con su forma original y disponiendo el sistema de tirantes también. Charles Perrault describe en sus memorias cómo la construcción de este modelo disipó todas las dudas (Perrault 1909, 87):

Pour lever toutes les inquiétudes que M. Colbert pouvoit avoir sur la construction de cet édifice, je lui proposai de trouver bon qu'on fit un petit modèle du péristile avec de petites pierres de taille de même figure et en même nombre que l'ouvrage en grand se devoit faire. Quand il fut achevé et retenu par de petites barres de fer, grosses proportionnellement à celles qu'on employeroit dans l'ouvrage effectif, M. Colbert demeura tellement convaincu de la fermeté et de la solidité de tout l'ouvrage. (Para disipar cualquier duda que el Sr. Colbert pudiera tener sobre la construcción de este edificio, le sugerí que sería una buena idea hacer una pequeña maqueta del peristilo con pequeños sillares de la misma forma y en el mismo número que la obra a gran escala que se iba a realizar. Cuando estuvo terminada y sujeta por pequeñas barras de hierro, con tamaño en proporción a las que se utilizarían en la obra real, el Sr. Colbert quedó completamente convencido de la firmeza y solidez de toda la estructura).

Este modelo no se conserva y debía ser de gran tamaño para poder replicar todas las piedras de la columnata real. Patte se refiere a este modelo, repitiendo palabra por palabra la descripción anterior, pero añade de forma crucial la escala (Patte 1769, 268): «Perrault eut produit un modèle de cette construction, *poûce pour pied*, avec de petites pierres de taille de même figure, et au même nombre que l'ouvrage en grand» (Perrault realizó un modelo de esta construcción, pulgada por pie, con pequeños sillares de la misma forma y en el mismo número que la obra de tamaño real [cursiva añadida]).

En un modelo como el que refiere Patte con una escala de una pulgada por pie, 1:12, las dimensiones de las piedras «de la misma forma y en el mismo número» son muy pequeñas. Los vanos entre las columnas pareadas de 12 pies, tendrían 1 pie, 32,5 cm; las dovelas de los arcos planos del arquitrabe y del friso,

tendrían una dimensión de unos 7,5 cm de alto por unos 3,5 cm de ancho en su parte inferior. El espesor de los techos entre los arcos planos sería de unos 4,5 cm. Si a estas piedras diminutas hay que añadir el complejo sistema de barras (que tendrían una sección de unos 6 mm), realmente su construcción sería un trabajo de precisión. (El hecho de que las barras disminuyan de espesor proporcionalmente no invalida el modelo: no se trata de un problema de resistencia sino de estabilidad y un modelo de estas características sin duda serviría para demostrar que la estructura atirantada de pequeñas piedras era estable.)

Petzet (2000, 306) menciona un gran modelo de piedra sobre un zócalo de 13 pies de largo y 4 pies de ancho y sugiere que pudiera corresponder a parte de la columnata y del cuerpo central. Si este ancho de zócalo correspondiera a la profundidad de la columnata –incluyendo el muro posterior y dejando espacio para la cornisa, son unas 4 toesas ó 24 pies, *Fig. 9* en la Figura 2– daría una escala de 1:6, un pie una toesa (6 pies). La altura de este modelo sería entonces de 2,6 m (sin contar con la plataforma de apoyo).

Pero el texto citado por Petzet quizá admite otra interpretación; lo citamos a continuación con una traducción tentativa (Petzet 2000, 307): «le modèle de partie de la Fassade du Louvre ayans quinze pouces despesse^s, Contiennent XIII p. de long sur IIII p. de large» (el modelo de parte de la Fachada del Louvre que tiene quince pulgadas de espesor, tiene trece pies de largo y cuatro pies de ancho). Si consideramos que el espesor que se cita de 15 pulgadas corresponde al fondo de la columnata, entonces, el modelo se adaptaría a la escala de una pulgada-un pie (1:12), citada por Patte, y las otras dimensiones en planta permitirían acomodar los siete tramos de una de las alas de la columnata que tendría, entonces, una altura de aproximadamente 1,3 m.

Desde luego en una obra de esta magnitud y dificultad con seguridad se hicieron muchos modelos a diversas escalas, y tanto Berger como Petzet citan varios, en madera, yeso o piedra. No se conserva ninguno de ellos.

Claude Perrault era, además de arquitecto, un científico. (Picon 1988, Lee 1996) Por su trabajo estuvo en contacto con artesanos e ingenieros, con canteros y albañiles, y, sobre todo, le gustaba indagar. ¿Es posible que utilizara el modelo a escala de piedras pequeñas para hacer ensayos? En un modelo

a «pequeña» escala el tamaño de las piedras hace que ligeras imperfecciones permitan grandes movimientos (como sabe bien quien ha trabajado con pequeños modelos tridimensionales de arcos o bóvedas). Por otra parte, la labra de precisión requerida obligaría a dejar las juntas perfectamente lisas. Durante el montaje de los arcos planos sobre pequeñas cimbras, o al bajar las cimbras de arcos y techos, es muy probable que las dovelas rotaran, se articularan formando grietas o deslizaran sobre las juntas.

La mención anterior a que si desapareciera un intercolumnio el resto de la columnata permanecería en pie sugiere que este tipo de prueba se hubiera hecho en el modelo y, para evitar el hundimiento, se habrían incluido los tirantes diagonales.

Mi impresión es que la enorme cantidad de hierro de la columnata obedece a una obsesión por impedir cualquier tipo de movimiento de las piedras del modelo, sin tener en cuenta que, en la obra real, con piedras reales de juntas «rugosas», muchos de estos movimientos no se producirían. Por supuesto, lo que sí demostraría el modelo es la absoluta necesidad de anular los empujes de los arcos planos transversales y de los techos mediante un sistema de tirantes.

La fábrica armada

De cualquier manera, Claude Perrault tuvo muy clara la división del trabajo de los dos materiales implicados, la piedra y el hierro. Los arcos de piedra, el entablamento, las columnas y, en general, toda la obra de fábrica debía trabajar a compresión. La función principal del hierro, los tirantes que aseguran la estabilidad global, era equilibrar los empujes de los arcos planos y techos, trabajando a tracción. Su hermano Charles lo recoge en sus memorias (Perrault 1909, 89): «le fer ne porte rien et ne fait que retenir la pousse des architraves, en quoi il a une si grande force qu'il n'y a point de pesanteur, quelle qu'elle puisse être, qui puisse la rompre, ne faisant que river et ne portant rien». (el hierro no soporta ningún peso y se limita a retener el empuje de los arquivadas, para lo cual posee una fuerza tan grande que no hay peso, sea cual sea, que pueda romperlo, ya que se limita a retener y no soporta carga alguna).

Patte en sus *Mémoires* expresa la misma idea y enfatiza que son los tirantes de hierro trabajando a tracción los que anulan el empuje de los arcos planos, siendo esta fuerza de tracción la propia del material de hierro (Patte 1769, 273):

Ce qui me paroît principalement donner une force inébranlable a sa batisse, c'est que le fer ne porte rien & ne fait exactement que la fonction de tirer pour retenir la pousse des architraves & solidifier l'axe des colonnes; procede qui doit necessairement produire la plus grande resistance que l'on puisse esperer de la part du fer. (Lo que me parece ser lo principal que da a la estructura su inquebrantable resistencia es que el hierro no soporta peso y no hace más que tirar para contener el empuje de los arquivadas y solidificar el eje de las columnas; un proceso que necesariamente debe producir la mayor resistencia que puede esperarse del hierro).

Se trata de una idea completamente nueva: el hierro pasa de ser un elemento auxiliar a ocupar un papel fundamental en la estabilidad global, el equilibrio, de la obra. Hay una división clara: la fábrica trabaja a compresión y el hierro a tracción. Los seguidores de Perrault, como se verá más adelante, confunden con su profusión de elementos de hierro esta nítida separación del trabajo.

Tendrán que pasar dos siglos para que, hacia finales del siglo XIX, un arquitecto español emigrado a Estados Unidos, Rafael Guastavino (1842-1908) retomara esa idea de combinar los arcos y bóvedas de fábrica trabajando a compresión con un sistema de tirantes y zunchos de hierro trabajando a tracción.³ Así, en su último libro de 1904 Guastavino, tras discutir las ventajas de combinar fábrica con hierro afirma que, aunque la fábrica es el elemento principal, el hierro suministra la resistencia a tracción de manera que la obra tenga la misma solidez trabajando a compresión y a tracción (Guastavino 1904, II, 77-78): «masonry is the main support... iron is used mainly to increase the tension conditions... in order that the masonry shall have the same strength for tension as it has for pressure». (la fábrica es el soporte principal... el hierro se utiliza principalmente para aumentar las condiciones de tracción... con el fin de que la fábrica tenga la misma resistencia a la tensión que a la compresión).

EL EMPLEO DE LOS ELEMENTOS DE HIERRO

El sistema ideado por Claude Perrault fue una invención sin precedentes. Perrault tuvo que luchar contra la prevención que existía contra el empleo del hierro como un elemento estructural que garantiza la estabilidad de las construcciones. Para poner en contexto esta innovación es necesario resumir brevemente la actitud tradicional sobre el empleo del hierro.

Como se ha dicho, el hierro se usaba ya en la antigüedad clásica griega para asegurar la posición de los sillares de los templos ante los movimientos producidos por posibles asientos o por los terremotos. En una arquitectura construida con precisión milimétrica, que incluía refinamientos ópticos, esto era fundamental. Este empleo se reducía al uso de espigas y grapas de diversas formas para evitar el desplazamiento de los sillares (véanse, por ejemplo: Durm (1910), Orlandos (1966), Hellmann (2002)). Los romanos siguieron la tradición griega y utilizaban el mismo tipo de grapas de hierro para unir los sillares de sus obras. En Roma estos elementos no sólo aparecen en los templos, sino también en otros edificios y también en los puentes (Choisy 1873, Lugli 1957).

Lo que es común a los constructores griegos y romanos es el extremo cuidado con el que protegían los elementos de hierro de la oxidación, ya que el hierro oxidado aumenta de volumen y puede romper las piedras. Usualmente recubrían los hierros con plomo fundido; esto exigía una técnica sofisticada para que el plomo fundido recubriera por completo los elementos (véanse numerosos detalles en Durm (1910) y Durm (1885)).

En Bizancio vuelve a aparecer el hierro en forma de grapas uniendo sillares, pero, tratándose de una arquitectura abovedada de ladrillo, este hierro se utilizaba también en forma de zunchos en las cúpulas o de tirantes. También aparecen elementos de hierro en la arquitectura Islámica (Choisy (1883), Werner (1980), Wilcox (1981), Ousterhout (1999)). En ambos casos, a tenor del tamaño de los sistemas de estribo, estos tirantes o zunchos no trataban de anular el empuje de las bóvedas; muy posiblemente solo eran dispositivos auxiliares para asegurar la obra durante la construcción. Así, en una sala hipóstila el empleo de tirantes permitía ir construyendo las bóvedas tramo por tramo. Terminada la obra, los tirantes no trabajan para cargas estáticas, pero podrían ser útiles en el caso de terremotos.

En la Edad Media hay también abundantes evidencias de este empleo auxiliar del hierro. Ya fue mencionado por Viollet-le-Duc en su famoso *Dictionnaire* (1854-1868). Recientemente L'Héritier et al. (2010) han descubierto que este empleo auxiliar del hierro estaba más extendido de lo que se pensaba.

En el Renacimiento y barroco italianos era frecuente colocar zunchos o cadenas de hierro en las cúpulas. De nuevo, la función no es anular el empuje radial que ejercen las cúpulas, sino mantener la forma durante el periodo de fraguado de los morteros de cal. Lo demuestra que, en muchos casos, estos zunchos aparecen rotos cuando se inspeccionan las cúpulas, como fue el caso de San Pedro de Roma (Poleni 1748); en cualquier caso, el contrarresto del tambor era suficiente para resistir el empuje de la cúpula, como puede comprobarse realizando sencillos análisis de equilibrio (Huerta 2004, 435-466). Precisamente del Renacimiento y barroco tenemos los primeros documentos que mencionan el uso del hierro. Citaremos los casos más conocidos.

Philibert de l'Orme, en sus *Nouvelles inventions pour bien bastir* de 1561, previene en términos inequívocos sobre el empleo del hierro, advirtiendo que el hierro es un gran mal para los edificios pues al corroerse aumenta de tamaño y rompe las piedras (De l'Orme 1561, 6-7):

l'ay ueu aduenir un autre grand mal aux bastimets pour mettre du fer dans les maçonneries & avec les pierres de taille: car le fer senrouille, & senrouillant il senfle & fait rompre les pierres & murs qui ne peuvent durer longuement.» (Hay que advertir que es un gran mal para los edificios incluir hierro en las mamposterías y en las obras de cantería: pues el hierro se corroe, y al corroerse se hincha y rompe las piedras y los muros, que no pueden durar durante largo tiempo)

Pone como ejemplo la acción de la hiedra cuyas raíces degradan los morteros y sueltan las piedras que están prontas a caer.

También tenemos el testimonio de un caso concreto. Se trata del debate que se produjo en el Duomo de Milano cuando el arquitecto Pellegrino Pellegrini propuso en el año 1570 una serie de actuaciones, entre ellas la construcción de un Baptisterio. Éste consistía en un templete soportado por cuatro columnas unidas por dinteles. Los dinteles salvaban un vano de seis diámetros de columna; como este vano era excesivo,

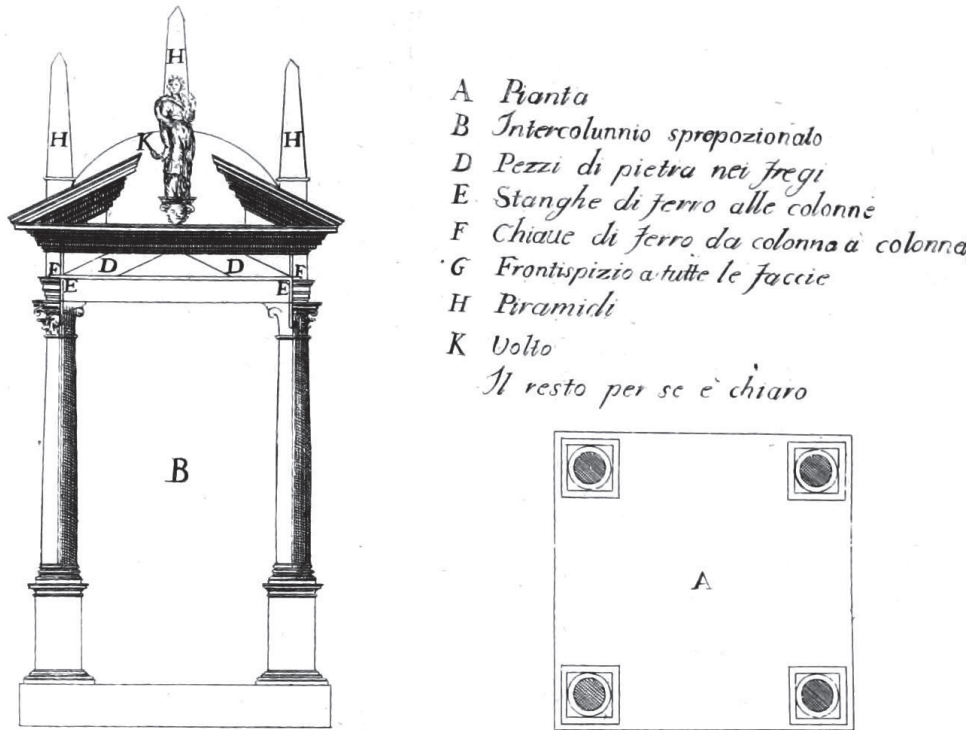


Figura 5. Templete para Baptisterio con dinteles muy esbeltos sobre columnas. Nótese el tirante de hierro E-E. (Bassi 1771).

propuso disponer unas cadenas o tirantes de hierro E (Figura 5). El entonces arquitecto del Duomo Martino Bassi se opuso vigorosamente a las propuestas de Pelegrino y, muy en particular al Baptisterio. Pidió opinión a cierto número de prestigiosos arquitectos (Palladio, Vignola y Vasari entre ellos) que contestaron por carta (Bassi 1771).

Nos interesa la respuesta de Giacomo Barozzi Vignola (1507-1573), famoso arquitecto y tratadista, que critica ferozmente la proporción de los dinteles y el empleo de los tirantes de hierro (Bassi 1771, 60; la cursiva es mía):

Quanto al Tempietto, ovver Battisterio... io lo reputo per mio parere debilissimo... ne accetto per buono il mettermi le chiavi di ferro; *perciocché le fabbriche bene intese vogliono reggersi per se stesse, e non stare attaccate con le stringhe...* (En cuanto al Templete que cubre el Baptisterio... en mi opinión es muy débil... y no me parece bueno que se incluyan elementos de hierro; porque las buenas fábricas deben regirse por sí mismas y no estar atadas con cuerdecillas [la cursiva es mía]).

Vignola usa la palabra «stringhe» (cuerdecillas) en vez de «stanghe» (barra) que aparece en la figura, seguramente para enfatizar la debilidad del dispositivo. La frase se hizo famosa y aparece citada y ampliada, por ejemplo, por Leonardo Vegni en su edición del *Manual de Architettura* de Branca (1790, 84) que alude a «la necesidad de tantos pobres jóvenes, que en los preceptos y obras de algunos que hacen de Maestros, no pueden aprender otra cosa en la construcción de bóvedas, que liarlas con cadenas de hierro, ó fiarlas á la tenacidad de la puzzolana; pero las fábricas bien entendidas (dice Viñola) quieren regirse por sí mismas, y no estar atadas con cabestros [cadenitas]».

Christopher Wren (1632-1723) tampoco recomienda el uso del hierro, salvo que sea estrictamente necesario. Por ejemplo, en su informe sobre la aguja de la catedral de Salisbury, escrito el 31 de agosto de 1668 (Wren 1750, Soo 2007) describe como en los muros de la torre hay tirantes de hierro, por dentro y

por fuera, que permitieron no emplear contrafuertes, pero advierte que esta manera de atar los muros en vez de construirlos con una forma tal que asienten por sí mismos va contra las reglas de la buena arquitectura (Wren 1750, 316): «this way of tying walls together with iron, instead of making them of that substance and form, that they shall naturally poise themselves upon their butment, is against the rules of good architecture». (Esta manera de atar los muros con hierro, en vez de hacerlos del tamaño y la forma necesarios, de manera que descansen de forma natural sobre sus estribos, va contra las reglas de la buena arquitectura).

En diversas partes de sus escritos expresa la misma opinión, y concluye, haciendo referencia a los zunchos de hierro en San Pedro de Roma, que el hierro es una buena precaución pero que el arquitecto debe disponer la obra de manera que no sea necesario (Wren 1750, 356): «Iron, at all adventures, is a good caution; but the architect: should so poise his work, as if it were not necessary». (El hierro, en todo caso, es una buena precaución; pero el arquitecto debe disponer su obra como si no fuera necesario).

François Blondel en su *Cours d'architecture* (1683) dedica un corto capítulo (4a. Parte, Cap. xiv) los arcos planos, «plate-bandes». Considera que funcionan como arcos formados por dovelas, cuyas juntas deben converger en un centro. Cuando tienen cierta luz deben disponerse arcos de descarga por encima. Finalmente, advierte que, algunas veces se refuerzan con barras de hierro, pero que esto hace que no tengan larga duración pues el hierro, con el tiempo, se oxida y rompe las piedras (Blondel 1683, IV, 434): «L'on y met même souvent des barres de fer pour les fortifier, mais cette precaution n'est pas pour les rendre de longue durée, car le fer ronge la pierre et la fait rompre avec le temps». (A menudo se disponen barras de hierro para fortificarlas [las platabandas], pero esta precaución no las hace de larga duración, pues el hierro se corroe y, con el tiempo, rompe las piedras.) Y continúa diciendo que los antiguos debieron usar también estos dispositivos, y el que no hayan llegado hasta nosotros demuestra que esta forma de construcción es débil y no puede subsistir durante siglos, «ce que nous peut faire connaître que cette maniere de bâtir a de soy par trop de foiblesse pour pouvoir subsister pendant plusieurs

siècles». (lo que puede hacernos ver que esta forma de construir tiene demasiados puntos débiles para poder sobrevivir varios siglos).

Quizá el resumen más completo de esta actitud contra el empleo del hierro en los elementos estructurales se encuentra en el curso de arquitectura de J. F. Blondel (1771-1777). En el tomo sexto hay un breve apartado que se ocupa del empleo de las ataduras de hierro en las construcciones, «De l'emploi des liens de fer dans une Construction». Pertenece a la parte de construcción del curso que según Middleton (1959) fue escrita casi enteramente por Patte. Resulta curioso que el mismo Patte que explica con precisión y objetividad el empleo de los elementos de hierro en sus *Mémoires*, da aquí una visión mucho más conservadora y expone las mismas prevenciones que hemos visto antes. Así, dice que el hierro no debe emplearse nunca como un elemento principal y sólo debe usarse como algo auxiliar, ya que se oxida y, aumentando de volumen, acaba rompiendo las piedras (Patte 1769, 47):

Le fer ne devoit jamais être employé dans un Edifice comme un agent principal... mais il faut s'en servir seulement, comme d'un moyen précaire, d'un moyen de surrogation... La raison en est, que par sa constitution physique, le fer n'est pas fait pour être de longue durée: la rouille l'altère peu-à-peu, quelque precaution que l'on prenne, et passe même, en augmentant son volume, pour faire éclater la pierre où on l'encastre. (El hierro nunca debe utilizarse en un edificio como agente principal... sino que sólo debe utilizarse como medio precario, como un medio redundante... La razón es que, por su constitución física, el hierro no está hecho para durar mucho tiempo: la herrumbre lo altera poco a poco, por muchas precauciones que se tomen y, al aumentar su volumen, puede llegar a hacer añicos la piedra en la que está colocado).

También especifica que la protección mediante pintura al aceite o barniz —precisamente la empleada en la columnata por Perrault— es inútil, pues se deteriora con el tiempo. Y añade que uno de los mayores reproches que se pueden hacer a numerosos edificios modernos es el empleo inmoderado del hierro y que la mayor parte de las columnatas que los decoran sólo se sostienen por estos medios artificiales (Blondel y Patte 1777, 49):

Un des grands reproches que l'on pourroit faire à nombre d'Edifices modernes, est l'usage immodéré du fer dans leur bâtisse. La plupart des colonnades, dont on les

décore, ne se soutiennent guères autrement que par ces moyens artificiels. (Uno de los grandes reproches que se puede hacer a los Edificios modernos, es el uso inmoderado del hierro en su construcción. La mayor parte de las columnatas con que se les adorna no se sostienen más que por medios artificiales).

Como regla general, hay que evitar el empleo del hierro y que cuando una construcción se ha hundido, en casi todos los casos, es porque tenía elementos de hierro: es la perfección del aparejo, la excelencia del mortero, la buena proporción de los apoyos y su relación con el empuje de las bóvedas, lo que debe dar fuerza a un edificio, cuya duración se desea asegurar (Blondel y Patte 1777, 50):

C'est la perfection de l'appareil des pierres, l'excellence du mortier, la bonne proportion des supports, leur relation avec la pousse des voûtes, qui doivent faire la force d'un Edifice, dont on veut assurer la durée; ce sont là les seuls et vrais principes de la solidité; agir autrement, ce serait la compromettre, et ne bâtir que pour un temp. (Es la perfección en el aparejo de las piedras, la excelencia del mortero, la buena proporción de los apoyos y su relación con el empuje de las bóvedas, que deben dar fuerza al Edificio, en lo que se debe basar su duración; son éstos los verdaderos y únicos principios de su solidez; actuar de otra forma sería comprometerla, y no construir más que para un corto tiempo).

Se podrían multiplicar advertencias, anteriores y posteriores a la construcción de la columnata, sobre el empleo del hierro. Sirva esta breve recopilación para enfatizar que, más allá de la inteligencia y el trabajo, Claude Perrault mostró un extraordinario coraje al defender una solución que contradecía las ideas comúnmente aceptadas sobre el empleo del hierro, asignándole un papel principal en el equilibrio de la fábrica.

Su obra sirvió de ejemplo a arquitectos posteriores. Middleton (1985, 54) cita los más importantes: la capilla de Versalles de Jules Hardouin Mansart y Robert de Cotte, iniciada en 1698 y terminada en 1710; la fachada oeste de Sain-Sulpice de J. N. Servandoni, proyectada primero en 1732 y terminada en 1777 (Figura 6), los edificios de A. J. Gabriel en la plaza Luis XV, iniciados en 1758 (Figura 7), y a la Madeleine de Contant d'Ivry de 1763 y su iglesia de Saint Vaast en Arras de 1774.

Finalmente, Jacques-Germain Soufflot y Jean-Baptiste Rondelet llevaron el empleo del hierro hasta extremos difícilmente justificables en el pórtico de Sainte Geneviève (después el Panteón Francés)

terminado en 1775. Según Middleton y Baudouin-Matuszek (2007, 53-58) los detalles técnicos de la construcción del pórtico se deben a Rondelet (que llegó a construir un modelo (1 pulgada - 1 pie, 1:12) con todo el detalle de la estereotomía y los elementos de hierro (Rondelet 1830, III, 307-309). No hay espacio aquí para entrar en detalles, pero resulta inquietante ver esos hierros que tratan de colgar las dovelas de los arcos, negando su funcionamiento estructural básico, Figura 8. Algunos autores (Collins 1959, Germann 2002) han querido ver aquí un precedente del hormigón armado. No es así, aunque formalmente lo parezca. De hecho, podrían eliminarse la mayor parte de los hierros, exceptuando los horizontales que anulan el empuje de los arcos. Creemos que Rondelet, sin duda llevado por un legítimo entusiasmo por las posibilidades que ofrecía el hierro, llegó a olvidar la naturaleza de las construcciones de fábrica.

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE LA COLUMNATA

Un análisis del equilibrio de la columnata quizá pueda servir para iluminar el problema al que se enfrentó Claude Perrault. El análisis se hace dentro del marco del Análisis Límite de las estructuras de fábrica formulado rigurosamente por el profesor Heyman de Cambridge en 1966 y explicado por él mismo en numerosas publicaciones posteriores (Huerta 2005).

El elemento esencial de la columnata es un sistema de arcos planos que sustituye a los dinteles monolíticos empleados por griegos y romanos. Empezaremos, pues, describiendo el funcionamiento básico de este tipo particular de arcos.

Los arcos planos

El arco es un invento que sirve para salvar un vano por una fábrica (de piedras o ladrillos, u hormigón en masa) que no resiste tracciones. La palabra «arco» viene del latín *arcus* e implica una forma curvada. Parece una contradicción que se puedan hacer arcos rectos y, de hecho, si el arco aparece en el cuarto milenio a.C. los primeros arcos planos de dovelas se encuentran en la antigua Grecia, aproximadamente en el siglo IV a.C. (Boyd 1978, Dornisch 1992) Los romanos heredaron esta forma estructural y la aplicaron con

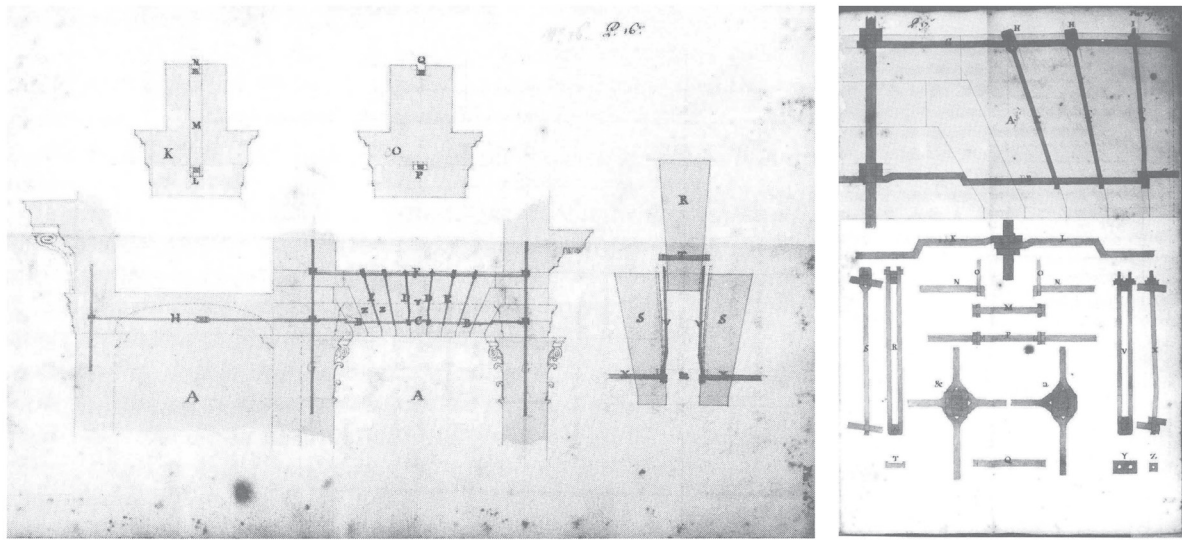


Figura 6. Armaduras de hierro en los arcos planos de la fachada de St. Sulpice, construidos por J. N. Servandoni. Detalles del manuscrito de Potain (Middleton 1985). Nótese la extrema complejidad de las uniones que, además, debían ir perfectamente encajadas en los sillares.

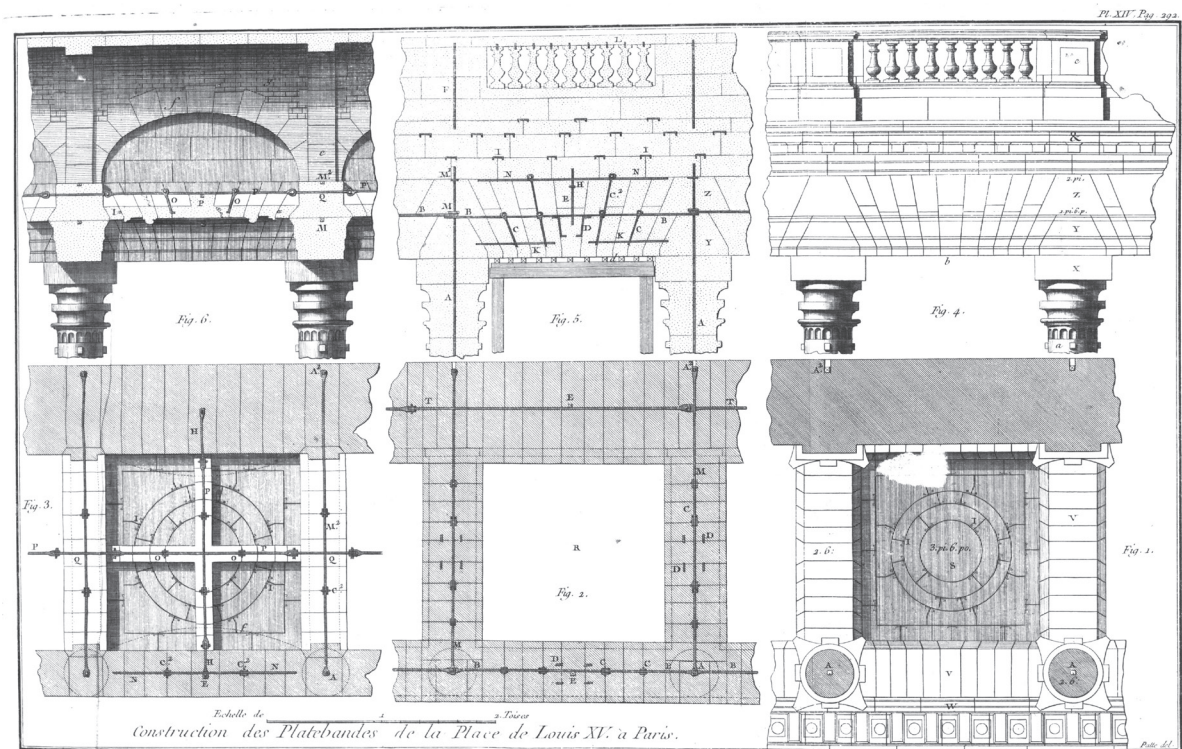


Figura 7. Arcos planos y armaduras de hierro en las columnatas de la plaza de Luis XV construidos por A. J. Gabriel (Patte 1769). Nótese los hierros (estribos) que tratan de colgar las dovelas de los arcos planos en la Fig. 5.

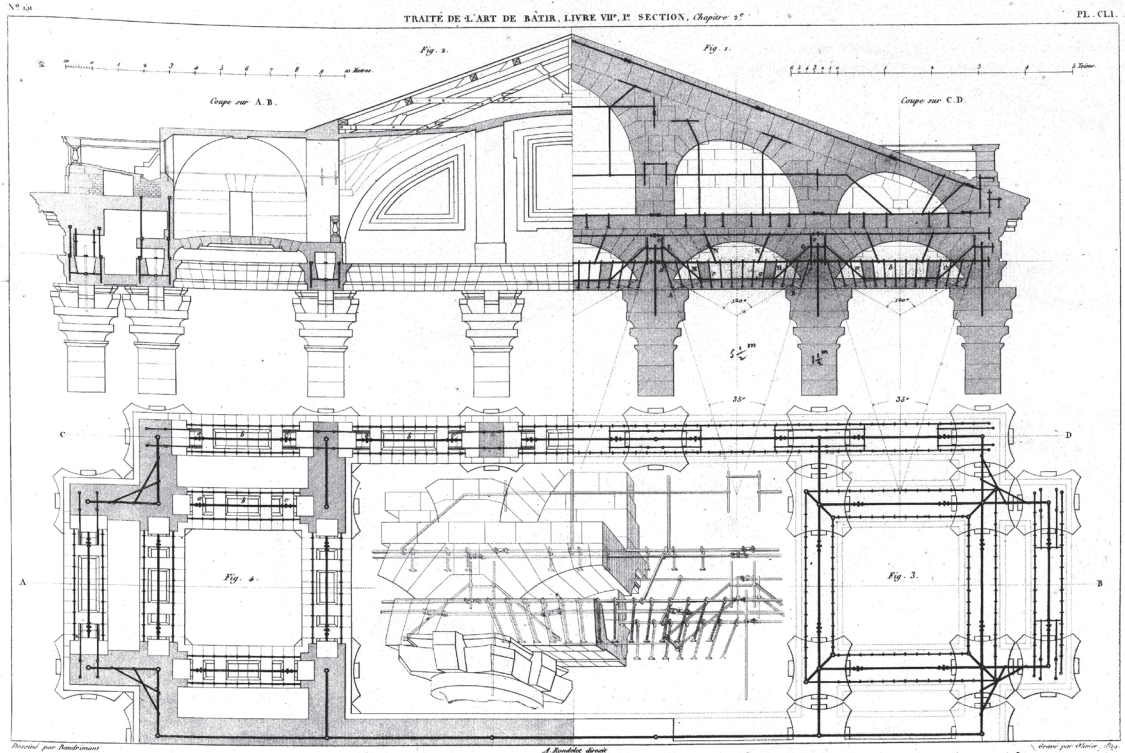


Figura 8. Armaduras de hierro del pórtico del Panteón Francés (Rondelet 1830-32)

éxito en ocasiones alcanzando luces que superan con creces las de la columnata (unos 4 m): por ejemplo, en el Tabularium de Roma, ca. 70 a.C. la luz alcanza los 5,18 m, y 6,5 m en la puerta del Templo de Baco en Baalbek. (DeLaine 1990, 414).

En la Figura 9 se ven dibujos hechos por Josef Durm (1885, 149) sobre arcos planos con luces de 2-3 m. Estas imágenes sugieren el funcionamiento de los arcos planos: un arco plano no es sino un dintel, dividido en trozos más pequeños por una serie de juntas. El equilibrio se mantiene independientemente de los cortes, siempre y cuando las juntas presenten una cierta inclinación (en los arcos del Coliseo, casi vertical).

Las fuerzas transmitidas entre las piedras (dovelas) del arco plano forman una trayectoria curva (la línea de empujes) que se aproxima mucho a una parábola. Por tanto, podemos asumir, sin apenas error, que, independientemente de la estereotomía, la línea de empujes tiene forma parabólica (la parábola es la forma

que toma una cadena colgante que soporta una carga uniforme; el arco plano de espesor vertical constante produce esta carga uniforme).

La estática de los arcos planos es, pues, extraordinariamente sencilla. Es más, cualquier dintel monolítico debe ser estudiado como un arco plano pues no se puede garantizar que no se vaya a romper en algún momento: muchos dinteles de los templos griegos aparecen rotos y, sin embargo, han llegado hasta nuestros días. El tema ha sido discutido con detalle por Heyman (1972). Para la historia de la teoría de arcos planos, véase Huerta (2012).

Los arcos planos producen empujes muy altos: la línea de empujes (parábola) contenida en su interior es muy rebajada. Es bien sabido que el empuje horizontal H de un arco parabólico (Figura 10) viene dado por la expresión:

$$H = \frac{qL^2}{8h} = \frac{WL}{8h}$$

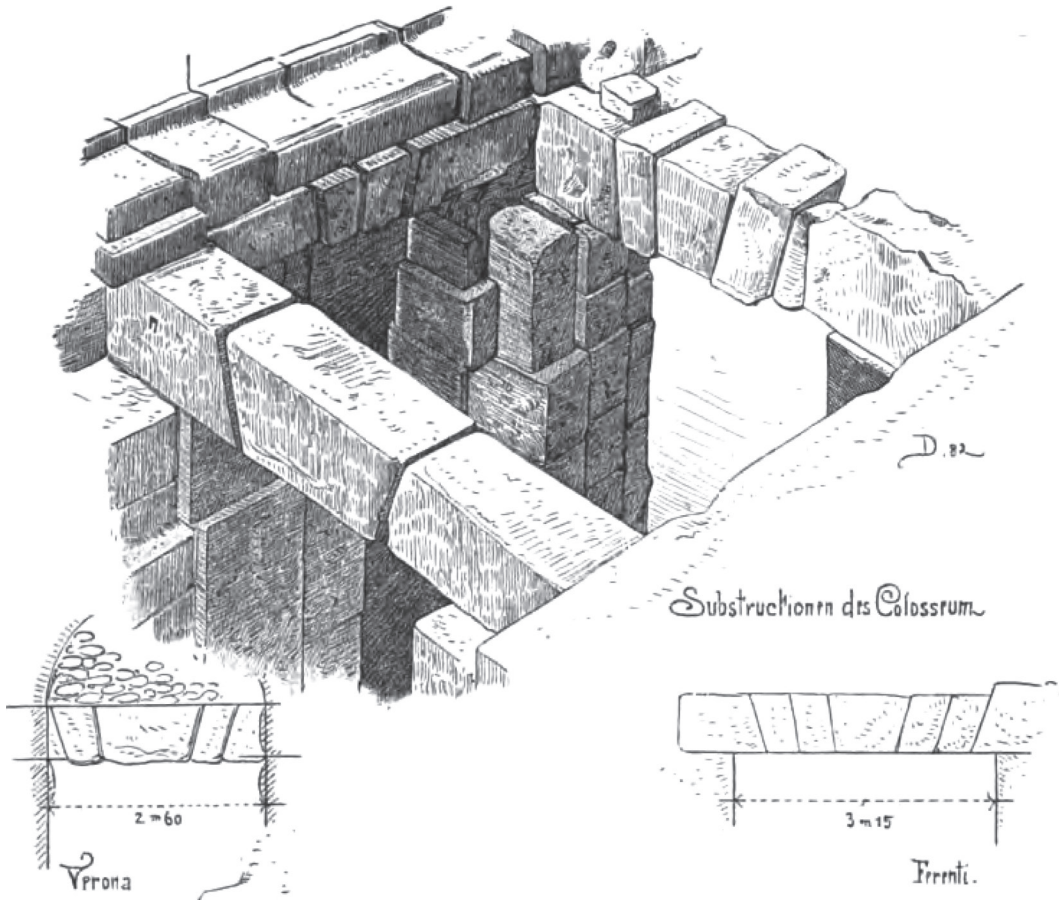


Figura 9. Arcos planos construidos en Roma (Durm 1885).

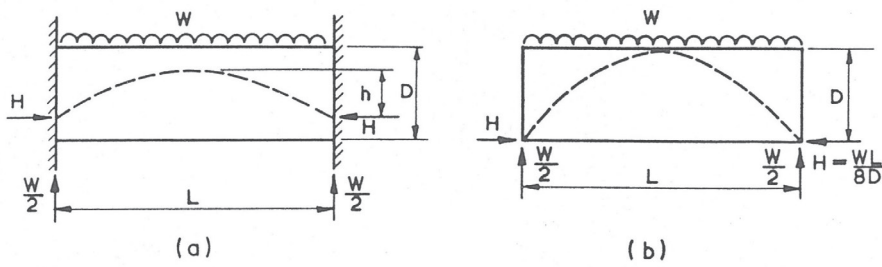


Figura 10. Equilibrio de un arco plano: (a) Una posible línea de empujes; (b) línea de empuje mínimo (Heyman 1972).

donde L es la luz libre del arco, h la altura de la parábola y q la carga repartida uniforme que soporta. $W = qL$ es el peso total del arco. Un dintel o un arco plano contiene infinitas parábolas que producen distintos empujes, Figura 10 (a).

El empuje horizontal mínimo se produce cuando h se hace máximo, esto es, $h = D$, Figura 10 (b), y toma el valor

$$H = \frac{WL}{8D}$$

Esta es la expresión que se emplea en el cálculo de los arcos planos.

Los arcos empujan contra sus apoyos, Figura 11 (a). Los apoyos reales no son enteramente rígidos y hay un ligero cedimiento hacia afuera. Para acomodarse a este incremento de la luz el arco se tiene que agrietar: se forman tres grietas, dos en los arranques y otra en la clave, que convierten el arco en triarticulado, Figura 11 (b). El arco triarticulado se adapta perfectamente al movimiento impuesto sin perder su capacidad portante. Pero, en esta situación, la posición de la línea de empujes queda fijada: las fuerzas tienen que pasar por los puntos de contacto de las piedras en las grietas Figura 11 (c). Este fenómeno ocurre incluso para movimientos muy pequeños, inapreciables a la vista.

Lo mismo sucede con los arcos planos. Cualquier movimiento de los apoyos (típicamente una ligera apertura) conduce, inevitablemente, al agrietamiento del arco, que vuelve a formar tres articulaciones, Figura 12. De nuevo, estos agrietamientos no disminuyen la seguridad del arco plano.

Un arco convencional, de forma curva, colapsa cuando se forman cuatro grietas que lo convierten en un mecanismo. El caso típico es el de una carga puntual aplicada excéntricamente. En el arco de la Figura 13, izquierda, la carga puntual ha producido una línea de empujes (la línea de puntos) que cabe justo dentro de su espesor. Los puntos de tangencia se convierten en grietas de articulación que forman un mecanismo de colapso. Los apoyos permanecen inmóviles o con pequeños desplazamientos. (Este entendimiento del colapso de los arcos se remonta a principios del siglo XVIII con los ensayos de Danysy (Heyman 1998).)

El arco plano no admite ninguna disposición de grietas que lo convierta en un mecanismo (Heyman 1982, 42). Para que colapse es preciso que se produzcan grandes desplazamientos en uno, o ambos, de los apoyos de estribo. Esto puede producirse de dos maneras: a) se produce un fallo por deslizamiento en cabeza del estribo; b) el estribo, o los estribos, cedan girando en su base, Figura 14.

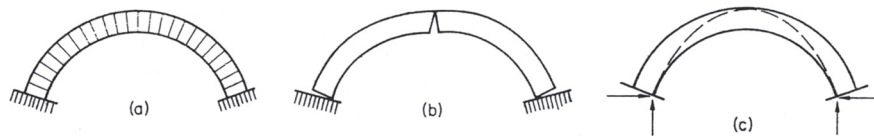


Figura 11. Adaptación de un arco a un ligero incremento de la luz (Heyman 1969).

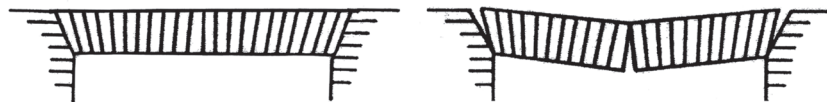


Figura 12. Agrietamiento de un arco plano por un ligero aumento de la luz.

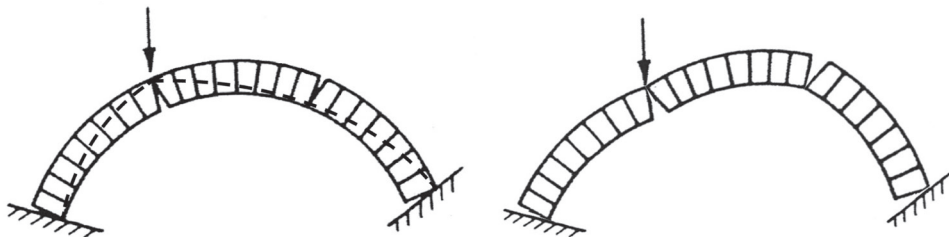


Figura 13. Colapso de un arco de fábrica (redibujado a partir de Heyman 1972).

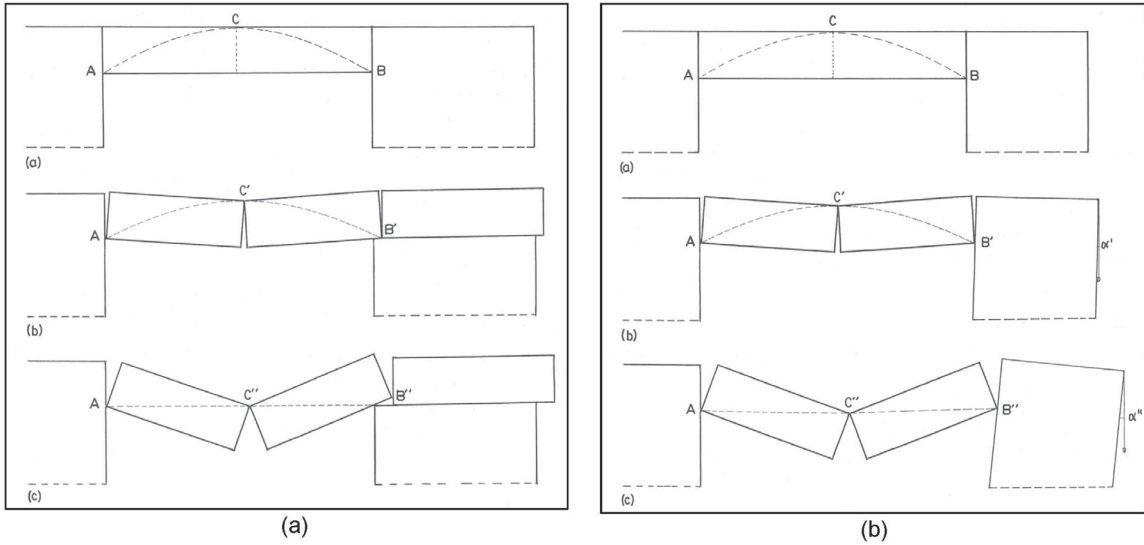


Figura 14. Formas de colapso de un arco plano por grandes desplazamientos en los estribos (Huerta 2022).

Distorsiones en los arcos planos. Agrietamientos

Como se ha visto, un pequeño cedimiento de los apoyos de un arco plano conduce a la formación de tres grietas y a un descenso de la «clave» en el centro del arco. Si el desplazamiento es pequeño, la seguridad no se ve afectada en absoluto, pero sí la estética: el arco plano deja de ser plano y muestra un quiebro en su centro.

Resulta sencillo demostrar (Figura 15) que, para un movimiento pequeño, la relación entre el cedimiento horizontal δ_H y el descenso vertical δ_V está en la relación $\delta_H/\delta_V = D/(L/2)$, esto es $\delta_V = 1/2 (L/D)$. (La mitad del arco gira alrededor del centro instantáneo de rotación O.) El descenso vertical, la distorsión, es

proporcional a la esbeltez L/D del arco plano. Cuanto más esbelto sea el arco más visible será su distorsión por pequeños movimientos.

Deslizamiento de las dovelas. Dispositivos para evitarlo

Otra distorsión geoméricamente posible es la producida por un deslizamiento de las dovelas. Este fenómeno es muy raro en arcos planos de esbeltos usuales. Se puede observar, sin embargo, en arcos planos (o curvos) de espesores muy grandes en la zona donde las juntas se hacen casi verticales. En este caso, una o varias dovelas cerca de la clave descenden formando

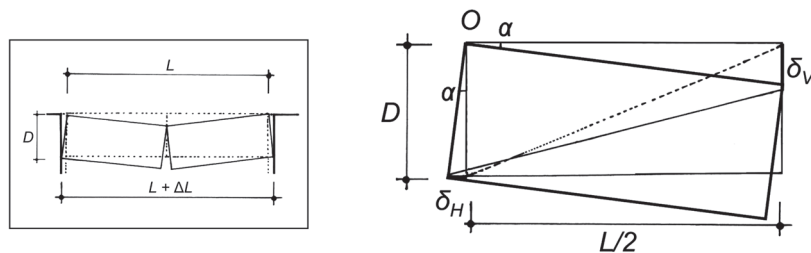


Figura 15. Relación entre la apertura y el descenso por un ligero incremento de la luz (Huerta 2022).

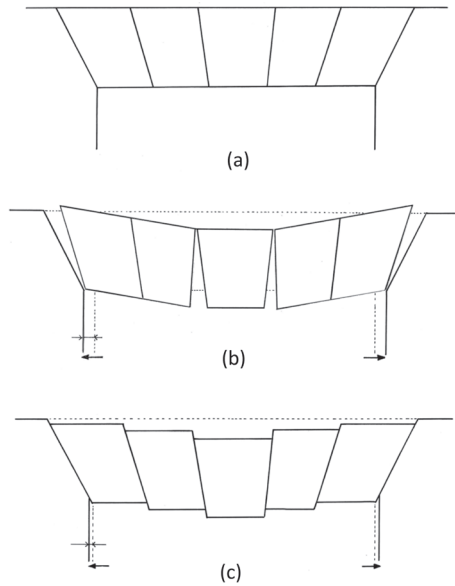


Figura 16. Distorsiones básicas de un arco plano por un cedimiento de los apoyos: (a) Sin cedimiento; (b) Distorsión por agrietamiento; (c) Distorsión por deslizamiento.

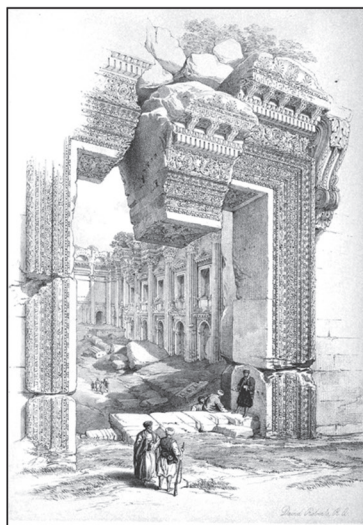
una cuña. Este fenómeno se produce en arcos planos gruesos, digamos con una relación espesor/luz mayor de $1/4$, donde puede verse con alguna frecuencia. El defecto se vuelve muy visible aunque el movimiento hacia afuera sea pequeño, Figura 16.

El caso más espectacular es el de la puerta de entrada al Templo de Baalbek donde, a mediados del siglo XIX, la dovela central estaba a punto de caer (después de 1.400 años en pie); en este caso el espesor del arco está cerca de la mitad de la luz, Figura 17 (a), pero las juntas son casi verticales. La dovela se apeó con un pilar de fábrica (Figura 17 (b) y, posteriormente, se levantó y aseguró Figura 17 (c).

Otra situación que explica, o favorece, el descenso de las dovelas, son los terremotos. Cejka (1978) ha explicado claramente el mecanismo, y la manera de evitar los deslizamientos y distorsiones consiguientes, Figura 18. Durante el terremoto las vibraciones dejan las dovelas «en el aire» y al caer se pueden asentar formando quiebras, Figura 18 (a). La forma tradicional de evitar esto es labrar las dovelas con juntas quebradas, Figura 18 (b).

Este dispositivo fue inventado por los romanos y adoptado con infinitas variaciones en la arquitectura islámica. Los romanos alcanzaron grandes luces con este tipo de arcos planos: por ejemplo, 4,86 m en la entrada del teatro de Orange, Figura 19.

La labra quebrada de estas juntas debilita la piedra y produce ángulos agudos donde se producen concentraciones de tensiones que pueden originar fracturas. Esto se puede observar, por ejemplo, en muchos de los arcos planos del Mausoleo de Teodorico en Rávena.



(a)



(b)



(c)

Figura 17. Deslizamiento de la dovela central en la puerta del gran templo de Baalbek. (a) Estado en 1841 (Roberts 1855); (b) apeo de la dovela; (c) estado actual (Wiegand 1939).

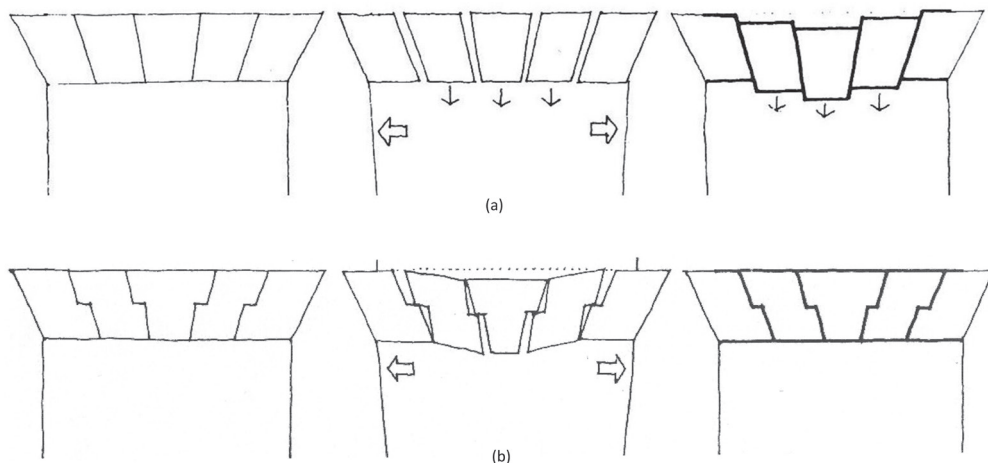


Figura 18. Dispositivo de juntas quebradas para evitar el deslizamiento durante un terremoto: (a) juntas rectas; (b) juntas quebradas (Cejka 1978).

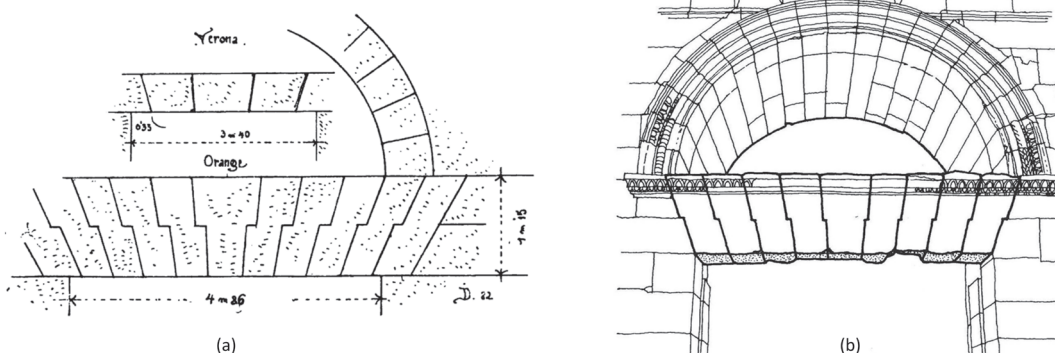


Figura 19. Arco plano romano de juntas quebradas. Puerta del teatro de Orange, s. I d.C., luz de 4,86 m (Durm 1885).

Gautier en su *Dissertation* de 1717, al hablar de arcos planos discute ambas soluciones, juntas planas y quebradas, afirma que cuanto más sencilla sea la solución menos ocasiones hay para el error y se decanta por las juntas planas (Gautier 1717, 17):

Plus il y a de la façon dans la coupe... plus il y a de la difficulté, et par consequent sujets à plus de défectuosité. Et plus les choses sont simples et unies, et sans composition, plus elles ont de la resistance, et sont taillées plus justes, comme sont les Clavaux... sans retour. (Cuanto más hay de complicación en el corte... más hay de dificultad, y en consecuencia más propensión a los defectos. Y cuanto más simples y unidas son las cosas, y sin composición, más resistencia tienen, y más justo se cortan, como las dovelas... sin quiebros).

Finalmente, otro dispositivo que se ha utilizado para evitar el deslizamiento es el de introducir unos elementos en las juntas. En este caso es bastante difícil saber si hay elementos o no, a menos que los arcos estén arruinados o hayan sido objeto de alguna restauración. En las ruinas de algunos puentes romanos se ven grapas en las primeras piedras del arco para evitar el deslizamiento. Otro artificio aparece en la Figura 20 (a), donde se hacen unas «cajas y espigas» en las juntas que evitan el deslizamiento. Philibert de l'Orme propone hacer unos rebajes en las juntas en las que se insertaría, una vez está montado el arco, una pieza cuadrada, Figura 20 (b). Según De L'Orme el arco plano en esta forma es más seguro

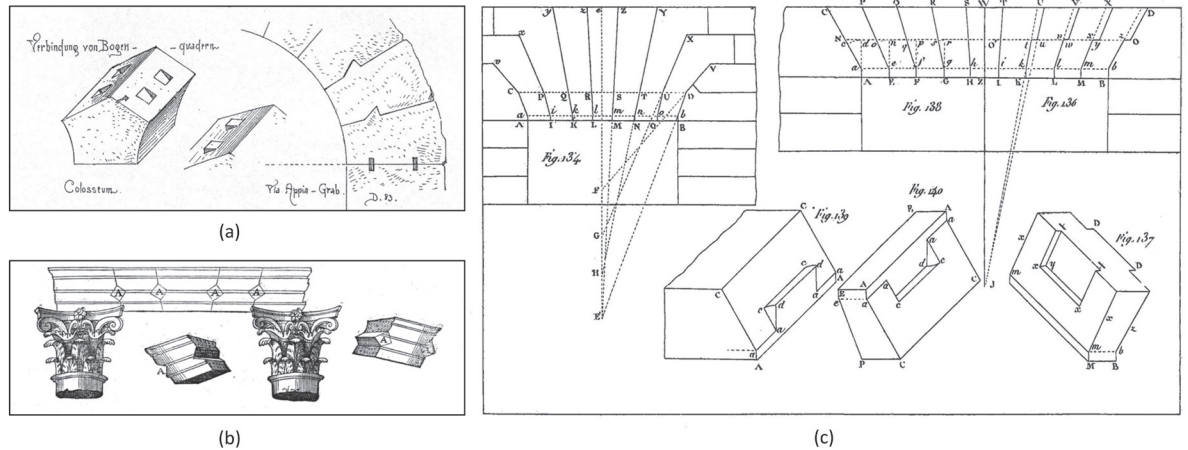


Figura 20. Artificios para evitar el deslizamiento en las juntas: (a) en Roma (Durm 1885); (b) según Philibert De L'Orme (1567); (c) según Douliot (1869).

que el dintel monolítico del mismo tamaño. En la Figura 20 (c), el mismo dispositivo en un manual de corte de piedras de la segunda mitad del siglo XIX.

Dispositivos para evitar las distorsiones de los arcos planos en la columnata

Quizá después de esta exposición sobre la sensibilidad de los arcos planos a distorsiones geométricas visibles, inocuas para la estabilidad, pero perturbadoras para la estética del monumento, podamos comprender el énfasis de Perrault en tratar de evitar cualquier movimiento de las piedras.

Las grapas en cruz entre los tambores de las columnas *Fig. 1* en la Figura 2 debían asegurar cualquiera rotación (durante la construcción y repaso de las piedras) que destruyera la perfección de las 24 acanaladuras del fuste de las columnas. Las grapas en «Z» en las juntas de las dovelas impiden el deslizamiento. Las barras horizontales actúan como tirantes para evitar la apertura de los vanos y el consiguiente agrietamiento. Finalmente, las grapas en «T» invertida pretenden colgar las piedras de los techos, evitando así un posible deslizamiento.

Desde luego, hay un exceso de hierro. Los griegos fijaban los tambores con sencillas espigas sin necesidad de perforar las columnas con barras. Los arcos adintelados en el plano de la fachada están confinados entre los grandes volúmenes de fábrica

de sus extremos (Figura 1), que impiden el movimiento de sus apoyos; las grapas en «Z» son, pues, innecesarias. También son inútiles las grapas en «T» invertida pues el corte de las piedras ya impide el deslizamiento.

Sin embargo, hay que decir que, tratándose de una obra tan importante e innovadora, toda precaución parece poca. La única crítica que podemos hacer a Perrault es que «infravaloró» el problema de la corrosión del hierro, causante de los daños que sufriría la columnata a lo largo del tiempo. Las tres capas de pintura al aceite para proteger las armaduras se demostraron insuficientes y hubiera sido mejor seguir la tradición clásica, que se prolongó durante la Edad Media y el Renacimiento, de proteger el hierro con plomo.

Equilibrio de la columnata: acción de los tirantes transversales

La mayor preocupación de Perrault fue, por supuesto, asegurar la estabilidad de la columnata. Los grandes empujes —fuera del plano de fachada— producidos por los arcos planos y los techos del peristilo debían ser resistidos por un sistema de tirantes, y el simple montaje del modelo a escala de piedras pequeñas hubiera mostrado el carácter catastrófico del fallo de los atados perpendiculares a la fachada.

Ya se ha descrito más arriba el complejo sistema de tirantes, situados en dos planos distintos: a la altura del trasdós del arquitrabe (el arco plano inferior en la fachada) y a la altura del trasdós del friso (el arco plano superior de la fachada).

En la Figura 21 se muestra un esquema de este sistema de tirantes. Los del arquitrabe en el nivel A y los del friso en el nivel F. Cada tirante se ha identificado con una letra; los tirantes simétricos respecto al plano entre las dos columnas pareadas con la misma letra. Cada tirante puede ejercer una tracción T que también se ha representado en el dibujo. Los arcos planos que van perpendiculares a las columnas se han marcado C (en recuadro) y los techos como P (en recuadro).

Ahora hay que hacer una mención que tiene que ver con la moderna teoría del Análisis Límite. La estructura de tirantes, y la de la propia columnata, es altamente hiperestática. Esto quiere decir que hay infinitas soluciones de equilibrio que pueden mantener en pie a la columnata. No hay un «estado real» de la estructura: hay infinitos estados posibles que respetan las condiciones de resistencia del material (la *condición de cedencia*). En el caso de la fábrica, ésta tiene que trabajar a compresión, esto es, las fuerzas internas tienen que estar en su interior; en el caso del hierro, la tensión en los tirantes no debe superar su *tensión de cedencia*. Ambas condiciones no bastan para fijar un estado único de equilibrio.

Por otra parte, hemos visto que dentro de los arcos planos sin agrietar puede haber infinitas líneas de empujes; además, si hay grietas, éstas pueden cambiar con el tiempo. En el caso de los tirantes muy pequeñas imperfecciones en el ajuste de las distintas barras, cedimientos en algunos anclajes, etc., pueden cambiar radicalmente su funcionamiento. Como ejemplo, Rondelet (1830-1832, III, 304) observó que los tirantes diagonales X estaban «flojos» y las cuñas de las uniones se podían mover con la mano. En esta situación la tracción en los tirantes T_x es cero (Figura 21); pero si con un martillo se tensa el tirante empezará a trabajar con una fuerza desconocida que, además, alterará la situación de equilibrio del resto de tirantes.

Este hecho, el que no existe un «estado real», único, de la estructura que se pueda observar, fue el origen del Análisis Límite. El Teorema Fundamental de la Seguridad demuestra que, sin embargo, podemos evaluar la seguridad de la estructura pues cualquier

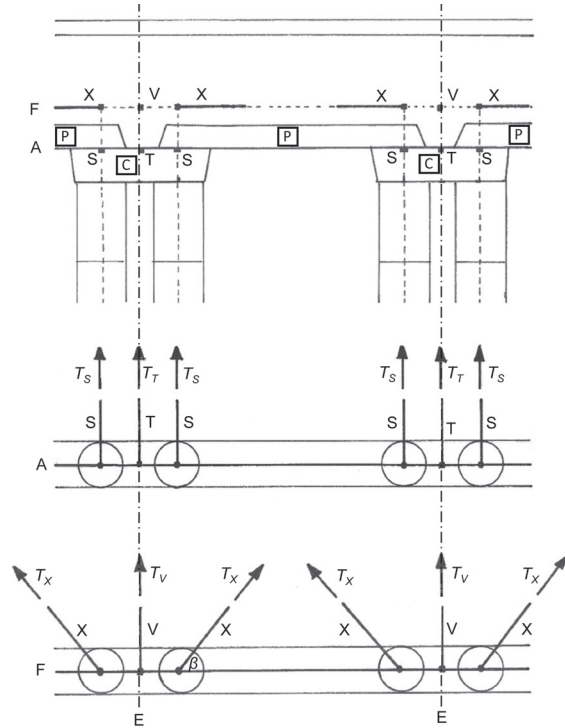


Figura 21. Distribución de los tirantes y sus fuerzas de tracción en la columnata.

estado de equilibrio posible (que cumple las condiciones de cedencia de los materiales) es un estado seguro, y esta seguridad es un límite inferior de la seguridad de la estructura (Heyman 1998, 1999).

Consideremos ahora el equilibrio de un tramo definido por las rectas E y E en la Figura 21. Se supondrá, arbitrariamente, que las fuerzas simétricas son iguales. Es evidente que el conjunto de fuerzas de tracción ejercido por los tirantes en cada uno de los planos (arquitrabe A y friso F), producirá unas resultantes de valor:

- en el plano A: $T_A = T_T + 2 T_S$
- en el plano F: $T_F = T_V + 2 T_X \text{ sen}\beta$

Estudiaremos ahora el equilibrio transversal, fuera de plano, del tramo considerado E-E. En la Figura 22 se han representado las fuerzas internas y las distancias relevantes.

Fuerzas internas:

- las resultantes de las tracciones en los tirantes T_A y T_F

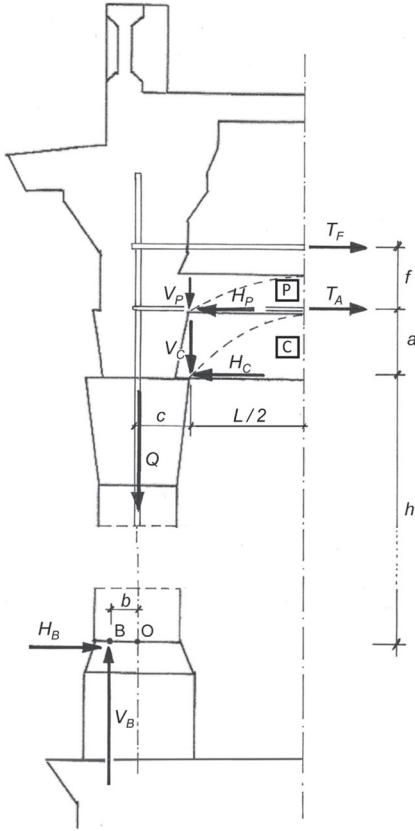


Figura 22. Cantidades (fuerzas internas y longitudes) que intervienen en el equilibrio del tramo objeto de estudio.

- las componentes del empuje de los arcos planos transversales C (en recuadro), V_C y H_C .
 - las componentes del empuje de techos P (en recuadro), V_P y H_P .
 - la suma de los pesos del entablamento y la dos columna hasta su base, Q .
 - las componentes de la resultante de las fuerzas por encima del plano BO de la base, V_B y H_B .
- Distancias:
- $f = a = 1$ m (espesor de arquitrabe y friso)
 - $h = 12,30$ m (altura desde la base hasta la parte superior del capitel)
 - $L = 4$ m (luz de los arcos planos C y del techo P)
 - $c = 0,7$ m (distancia del apoyo inferior de arcos planos C y techo P al eje de la columna)
 - b (distancia BO entre el eje la columna y el punto de aplicación de la resultante)

Según Patte en la columnata se emplearon dos tipos de piedra: la piedra dura de Saint-Cloud y la piedra blanda de Saint-Leu (Patte 1769, 270). En las columnas el fuste y la base son de piedra dura y el capitel de piedra blanda, para facilitar la labra. Rondelet (1830-32, I, 214) da ocho variedades de piedra de Saint-Cloud con pesos específicos comprendidos entre 23 y 20 kN/m^3 y tres variedades de Saint-Leu con pesos específicos entre 19 y 15 kN/m^3 . Como desconocemos la proporción de una y otra piedra en la evaluación de las cargas se considerará una piedra uniforme con un peso específico de 20 kN/m^3 .

Empuje de los arcos planos

Usaremos las expresiones deducidas más arriba. El empuje horizontal mínimo es:

$$H = \frac{WL}{8D}$$

donde W es el peso total del arco, L es la luz entre apoyos y D es el espesor del arco. Evidentemente, la componente vertical es $V = W/2$.

Midiendo sobre la Figura 2 que incluye una escala gráfica en toesas (1 toesa = 6 pies = 1,949 m) podemos calcular los pesos de los arcos planos y del techo.

El volumen de los arcos planos es: ancho \times luz \times espesor = $3,16 \times 4 \times 1 = 12,64 \text{ m}^3$. El peso, por tanto, será $W_C = 12,64 \times 20 = 252,8 \text{ kN}$.

El volumen del techo (su espesor es de 54 cm) es: $6,10 \times 4 \times 0,54 = 13,18 \text{ m}^3$. El peso, por tanto, será $W_P = 13,18 \times 20 = 263,6 \text{ kN}$.

Aplicando las fórmulas anteriores se obtienen los valores de las componentes de los empujes:

- arcos planos C: $H_C = (1/8) 252,8 (4/1) = 126,4 \text{ kN}$; $V_C = 252,8/2 = 126,4 \text{ kN}$
- techos P: $H_P = (1/8) 263,6 (4/0,54) = 244,4 \text{ kN}$; $V_P = 252,8/2 = 131,8 \text{ kN}$

El volumen de todo el entablamento (arquitrabe, friso, cornisa, y parapeto) se ha calculado como $57,35 \text{ m}^3$, con un peso de $P_E = 57,35 \times 20 = 1.147 \text{ kN}$.

Las columnas se han evaluado como cilindros rectos (incluyendo el capitel) de 13,30 m de altura y con su diámetro superior de 1,08 m. Así, el volumen de una columna será $(\pi 1,08^2/4) 13,30 = 12,2 \text{ m}^3$. El peso de las dos columnas del tramo valdrá $P_C = 2 \times 12,2 \times 20 = 488 \text{ kN}$.

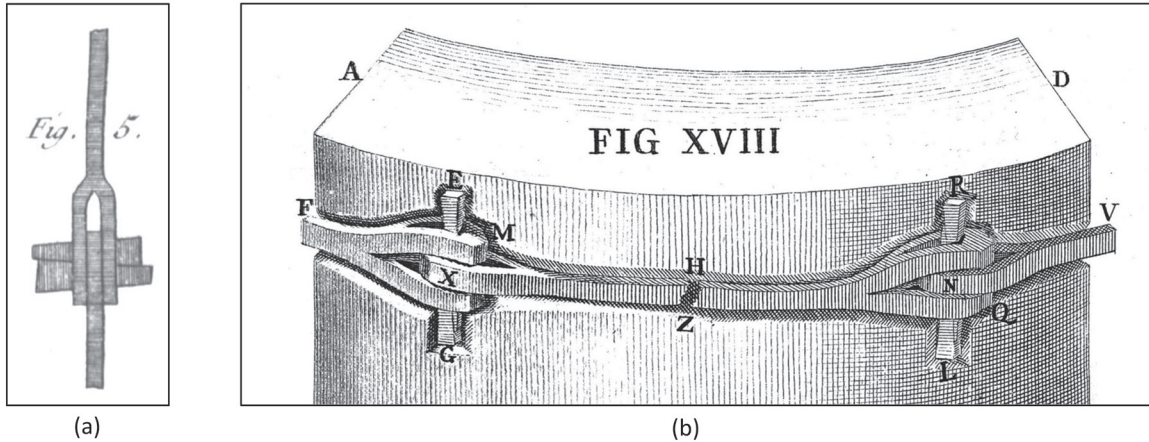


Figura 23. Uniones entre barras de hierro: (a) columnata de Perrault (Patte 1769); (b) San Pedro de Roma (Poleni 1748).

El peso total Q , que hace de estribo, valdrá $Q = P_E + P_C = 1.147 + 488 = 1.635$ kN (unas 160 toneladas).

Tomando momentos respecto al punto B en la Figura 22 obtendremos una ecuación de equilibrio:

$$Q \times b + (V_p + V_c) \times (c + b) + T_F \times (f + a + h) + T_A \times (a + h) - H_p \times (a + h) - H_c \times h = 0$$

En esta ecuación sólo hay tres incógnitas: T_F , T_A y b . Podemos hacer varias hipótesis.

1) $T_F = T_A = 0$. ¿Sería estable la columnata sin los tirantes? La ecuación se convierte en:

$$Q \times b + (V_p + V_c) \times (c + b) - H_p \times (a + h) - H_c \times h = 0$$

ecuación lineal en b , cuya solución es $b = 2,31$ m, completamente fuera del diámetro del fuste de la columna en la base de 1,17 m. A pesar del enorme peso del entablamento el empuje de los arcos planos y de los techos volcaría la columnata (como se esperaba).

2) Las fuerzas T_F y T_A dependen de los valores individuales de la tracción en cada tirante. Vamos a imaginar, arbitrariamente, que todos los tirantes trabajan a la misma tracción T . Entonces:

$$T_A = T_T + 2 T_S = 3T \quad T_F = T_V + 2 T_X \quad \text{sen}\beta = T(1 + 2 \text{sen}\beta) = 2,55T$$

Sustituyendo en la ecuación de equilibrio estos valores y las cantidades conocidas, obtenemos una ecuación lineal en T y b :

$$68,26 T = 4380 - 1893 b$$

si obligamos a que la resultante pase por el centro de la base, $b = 0$ y $T = 64,2$ kN.

Los tirantes, según Patte, son cuadrados y tienen un diámetro de $2\frac{1}{4}$ pulgadas = 60,9 mm de lado. Los tirantes estarían trabajando a una tensión $\sigma = 64.200/60,9^2 = 17,3$ N/mm².

Si, como decía Rondelet, los tirantes diagonales no están trabajando, $T_F = T$ y sustituyendo como antes:

$$49,2 T = 4380 - 1893 b$$

obligando a que la resultante pase por el centro, $b = 0$, y $T = 89$ kN. La tensión de trabajo sube a $\sigma = 24$ N/mm².

Otra posibilidad sería admitir una desviación que mantuviera la resultante dentro del núcleo central de inercia de la base que, siendo circular, permite una desviación de 1/8 del diámetro, esto es, $b = 1,17/8 = 0,15$ m. En esta situación, obtenemos para todos los tirantes trabajando a la misma tracción, $T = 60$ kN; si los tirantes diagonales no trabajan $T = 83,2$ kN. Valores similares a los anteriores, y las tensiones de trabajo bajan ligeramente a: $\sigma = 16,2$ N/mm² y $\sigma = 22,4$ N/mm², respectivamente.

¿Son estos valores aceptables? Los valores de la resistencia a tracción del hierro forjado que aparecen en la literatura son muy variables. Según un libro reciente (Roca et al. 2019, 120), la resistencia de rotura a tracción del hierro forjado está entre 278 y 593 N/mm². Como resistencia a la fuerza cortante se sugiere un valor 2/3 de la resistencia a tracción. Estos valores están un orden magnitud por encima (diez veces) de los valores calculados.

Durante los siglos XVII y XVIII se hicieron varios ensayos sobre la resistencia del hierro forjado. Poleni (1748) cita toda la literatura anterior y recoge los resultados de 8 ensayos realizados sobre barras de sección cuadrada con espesores entre 3/4 minuto (2,8 mm) y 1½ minuto (5,6 mm) y obtuvo una resistencia de rotura media de 1821 libras/minuto² ó 430 N/mm², dentro del rango anterior. Poleni considera que esta resistencia es la que hay que considerar aunque las barras están unidas con uniones de ojos con pasadores, como las empleadas por Perrault (Fig. 5 en Figura 2). En la Figura 23 se recogen ambas. Parece evidente que el punto más débil sería la unión; sin embargo, Poleni (Figura 23 (b)), considera la rotura por mitad de la barra. Añade, además, que si las uniones están empotradas en la fábrica, como se muestra en el dibujo, aunque el tirante se rompiera en un punto seguiría trabajando pues las cajas impedirían el movimiento de las uniones (esto último parece demasiado optimista).

Patte ya se planteó en sus *Mémoires* la pregunta de cuánta tracción podría aguantar un tirante compuesto de varias barras conectadas con uniones. Cita unas experiencias de Buffon recogidas en *L'art du serrurier* de Duhamel du Menceau (1761) según las cuales si se ensaya un hierro doblado en un lazo (aplicando la fuerza en el lazo) su resistencia es unas diez veces menor que la resistencia del hierro recto. En base a esto Patte concluye que son los «ojos» de la unión de los tirantes la parte más débil (Patte 1769, 310): «On peut conclure de ces expériences, que l'oeil d'un tiran est toujours sa partie foible». (De estas experiencias se puede concluir que el ojo de un tirante es siempre su parte más débil).

En mi opinión las tensiones obtenidas en el análisis anterior son suficientemente bajas para absorber las imperfecciones y deterioros producidos por el tiempo. Pero los tirantes son elementos críticos para la estabilidad de la columnata y deberían ser revisados periódicamente. En este sentido, la cámara entre los techos y la cubierta tiene esta función (Figs. 8, 9 en la Figura 2) y Charles Perrault es explícito sobre esta función en sus memorias (Perrault 1909, 89):

Il fut encore pratiqué un vuide entre le plafond du péristyle et la couverture de dessus, où plusieurs hommes peuvent aller et travailler sans peine à remédier aux inconvénients qui pourroient survenir dans la suite des

temps. (También se hizo una cámara entre el techo del peristilo y la cubierta superior, donde varios hombres podían ir a trabajar sin dificultad para remediar cualquier inconveniente que pudiera surgir en el futuro).

En efecto, con referencia a la Figura 21 más arriba (ver también Fig. 9 en Figura 2), al nivel F los tirantes X y V están exentos y se pueden inspeccionar, y tensar si fuera necesario. También se pueden ver los tirantes T, en el nivel A, empotrados en los arcos planos C.

¿Cuál sería la tensión si fallaran el resto de tirantes que no son visibles? Entrando de nuevo en la ecuación de equilibrio, suponiendo $T_x = T_v = T_t = T$, y haciendo cero la tracción en los tirantes S, obtenemos:

$$43,67 T = 4380 - 1893 b$$

Si obligamos a la resultante a pasar por el centro de la base, $b = 0$, y $T = 100,3$ kN. La tensión de trabajo $\sigma = 27,1$ N/mm² está todavía un orden de magnitud por debajo de la tensión de rotura del tirante. Así, pues, la inspección cuidadosa por un experto de los tirantes vistos en la cámara superior permitiría verificar la seguridad de la columnata periódicamente.

Los edificios históricos que pretenden permanecer durante siglos o milenios precisan de estos amplios márgenes de seguridad y, si su estabilidad depende los tirantes, de su multiplicación para dotar a la estructura de diversas «opciones» de supervivencia.

CONCLUSIONES

La columnata del Louvre es, además de una hermosa obra de arquitectura, un monumento de la técnica constructiva. Claude Perrault se enfrentó a un problema nuevo en su momento y, además, con un conocimiento todavía muy escaso sobre las construcciones antiguas, griegas y romanas, que emplearon arcos planos y elementos auxiliares de hierro. Tras varios años de tanteos y experiencias llegó a una solución, que incluso hoy produce asombro, para resolver el problema de una esbelta columnata de piedra, con grandes dinteles y losas de techo, que producen enormes empujes.

El empleo de los arcos planos está plenamente justificado y la necesidad de un sistema de tirantes probablemente fue evidente desde un principio. No lo es en absoluto la solución alcanzada. La idea de subdividir los tirantes y situarlos en dos planos

distintos está acorde con la magnitud de la obra y la necesidad de adoptar precauciones sobre un posible deterioro futuro de estos elementos esenciales a la estabilidad, y la posibilidad de inspeccionar algunos de estos elementos, que funcionan como «testigos» del estado de la obra.

El empleo del gran modelo de piedras pequeñas para afinar el proyecto de los elementos de hierro supone un enfoque «moderno» y «científico» para paliar la falta de una tradición constructiva que orientara el proyecto. No hay un testimonio escrito sobre este uso, pero la originalidad de las disposiciones de tirantes lo sugiere con fuerza. Es cierto que hay elementos superfluos de hierro —las grapas en «Z» y en «T» invertida son inútiles en la escala real—, pero puede que respondan a fenómenos observados en el modelo.

Realmente, podemos considerar a Claude Perrault como precursor de la idea de una fábrica o sillería «armada», donde las piedras resisten las compresiones y los elementos de hierro las tracciones. Esta idea fue clave, por ejemplo, en un contexto distinto, en las innovaciones estructurales de los Guastavino quienes, a finales del siglo XIX y principios del XX, combinaron las fábricas con cúpulas tabicadas, que empujan, con sistemas de tirantes que anulan o redirigen sus empujes. Es la misma idea que materializó Claude Perrault en la columnata del Louvre más de dos siglos antes.

NOTAS

- 1 El tema precisa de más investigaciones. Saddy (1983, 57) afirma: «*the voussoirs of the flat vaults of the peristyle of the Louvre are constantly split, due to the rusted iron armatures. Regular renovations, almost downright reconstructions (1767, 1807, 1982) are inevitable.*» (las dovelas de las bóvedas planas del peristilo del Louvre se parten constantemente, debido a las armaduras de hierro oxidadas. Las renovaciones periódicas, casi reconstrucciones (1767, 1807, 1982) son inevitables.). Vitet (1882, 160-166), citado por Berger (1993, 71, n.14), menciona dos restauraciones. La primera hacia 1755 fue realizada por el arquitecto A. J. Gabriel: «*Gabriel... commença par restaurer la colonnade de Perrault, tombée dans un état désolant. Les armatures en fer avaient produit leur effet; il fallut remplacer presque toutes les pierres du*

plafond, fendues et éclatées» (Gabriel... comenzó por restaurar la columnata de Perrault, que había caído en un estado lamentable. Las armaduras de hierro habían producido su efecto; hizo falta sustituir casi todas las piedras de los techos, agrietadas y rotas); más adelante comenta que hacia 1803: «*La colonnade fut, pour la deuxième fois, remise à neuf. Il fallut la reprendre à peu près pierre par pierre, comme avait fait Gabriel, cinquante ans auparavant*» (La columnata fue, por segunda vez, renovada. Hubo que reconstruirla piedra a piedra, como había hecho Gabriel cincuenta años antes). Estas fechas coinciden aproximadamente con las citadas por Saddy. No he podido encontrar ninguna referencia a la restauración de 1982.

- 2 Según (Middleton y Baudouin-Matuszek 2007, 56, n.57) el manuscrito fue leído en la Académie d'Architecture el 1 de febrero de 1762, y se encuentra en la actualidad en la Biblioteca del Centre Canadien d'Architecture, Montréal.
- 3 Véase Huerta (2019). Por supuesto desde que el hierro forjado, hacia la mitad del siglo XIX, se empezó a fabricar en forma de perfiles que podían ser unidos mediante remaches, este material se empezó a utilizar como un elemento fiable a tracción (las uniones remachadas eran mucho más seguras que las de ojos y espigas empleadas tradicionalmente). Pero los ingenieros se centraron en desarrollar los nuevos tipos estructurales, los entramados o cerchas y las vigas y pórticos, en vez de explorar la combinación del hierro con la fábrica. Ver, por ejemplo, Werner (1980).

LISTA DE REFERENCIAS

- Bassi, Martino. 1572. *Dispareri in materia d'architettura et perspettiva*. [Milano]: Marchetti.
- Bassi, Martino. *Dispareri tra Martino Bassi, e Pellegrino Pellegrini sopra alcune opere nel Duomo de Milano*. Milano, Giuseppe Galeazzi, 1771.
- Berger, Robert W. 1993. *The Palace of the Sun. The Louvre of Louis XIV*. Philadelphia: Pennsylvania State University Press.
- Berger, Robert W. y Rowland Mainstone. 1993. Materials and structure. En: R. W. Berger, *The Palace of the Sun. The Louvre of Louis XIV*. Philadelphia, Pennsylvania State University Press, 1993, p. 65–74.
- Blondel, François. 1675-1683. *Cours d'architecture*. Paris: Lambert Roulland.

- Blondel, Jacques-François. 1752-1756. *Architecture française*, 4. Vols. Paris: Charle-Antoine Jombert.
- Blondel, Jacques-François. 1771-77. *Cours d'Architecture, ou Traité de la décoration, distribution et construction des bâtiments... continué par M. Patte*. Paris: Chez la Veuve Desaint,
- Boyd, Thomas D. 1978. The arch and the vault in greek architecture. *American Journal of Archaeology* 82: 83–100. <https://doi.org/10.2307/503797>
- Branca, Juan. 1790. *Manual de Arquitectura... con adiciones y notas de Leonardo Vegni*. Madrid: Viuda de Joachim Ibarra.
- Choisy, Auguste. *L'art de bâtir chez les Romains*. Paris: Librairie générale de l'architecture et des travaux publics Ducher et Cie., 1873. (Trad. española: *El arte de construir en Roma*, Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, 1999.)
- Choisy, Auguste. *L'art de bâtir chez les Byzantins*. Paris: Librairie de la Société Anonyme de Publications Périodiques, 1883. (Trad. española: *El arte de construir en Roma*, Madrid, Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, 1997.)
- Cejka, Jan. 1978. Exkurs: Verzahnte Wölbsteine. En: *Tonnengewölbe und Bögen islamischer Architektur. Wölbungstechnik und Form*. PhD. München, Techn. Univ. Fachbereich Architektur: 5.1–5.62.
- Collins, Peter. 1959. *Concrete: The Vision of a New Architecture*. London: Faber and Faber.
- DeLaine, Janet. 1990. Structural Experimentation: The Lintel Arch, Corbel and Tie in Western Roman Architecture. *World Archaeology* 21: 407–424. <https://doi.org/10.1080/00438243.1990.9980116>
- De L'Orme, Philibert. 1561. *Nouvelles inventions pour bien bastir et a petits fraiz*. Paris: Federic Morel.
- De L'Orme, Philibert. 1567. *Le premier tome de l'architecture*. Paris: Federic Morel, 1567.
- Dornisch, Klaus. 1992. *Die griechischen Bogentore: zur Entstehung und Verbreitung des griechischen Keilsteingewölbes*. Frankfurt am Main: Lang.
- Douliot, J. P. 1862-1869. *Traité spécial de coupe des pierres*. Paris: Dunod.
- Duhamel du Menceau, Henri Louis. 1761. *L'art du serrurier*. Paris: Saillant et Nyon.
- Durm, Josef. 1885. *Die Baukunst der Etrusker und Römer*. Darmstadt: J. Ph. Diehl.
- Durm, Josef. 1910. *Die Baukunst der Griechen*. 3^a ed. Leipzig: A. Kröner.
- Fantin, Mathias. 2017. *Étude des rapports entre stéréotomie et résistance des voûtes clavées*. Tesis doctoral, Art et histoire de l'art, Université Paris-Est.
- Gargiani, Roberto, ed. 2012. *L'architrave, le plancher, la plate-forme. Nouvelle Histoire de la construction*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes.
- Gautier, H. 1717. *Dissertation sur l'épaisseur des culées des Ponts...* Paris: André Cailleau.
- Germann, Georg. 2002. De la plate-bande à la poutre Hennebique. *Histoire de l'art* 50: 17–27. <https://doi.org/10.3406/hista.2002.2964>
- Guastavino, Rafael. 1904. *The function of masonry in modern architectural structures. Part II*. Boston: s.e. (Trad. esp. en: *Escritos sobre la construcción cohesiva*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, 2006.)
- Hellmann, Marie-Christine. 2002. *L'architecture grecque. 1. Les principes de la construction*. Paris: Picard.
- Heyman, Jacques. 1969. The Safety of Masonry Arches. *International Journal of Mechanical Sciences* 11: 363–385. (Trad. esp. en: *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Vol. 1*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2015: 93–112). [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(69\)90070-8](https://doi.org/10.1016/0020-7403(69)90070-8)
- Heyman, Jacques. 1972. Gothic Construction in Ancient Greece. *Journal of the Society of Architectural Historians* 31: 3–9. (Trad. esp. en: *Teoría, historia y restauración de estructuras de fábrica. Vol. 1*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2015: 129–140. <https://doi.org/10.2307/988722>
- Heyman, Jacques). 1982. *The Masonry Arch*. Chichester: Ellis Horwood. (Trad. Esp. *El arco de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2021.)
- Heyman, Jacques, *The Stone Skeleton. Structural Engineering of Masonry Architecture*, Cambridge, Cambridge University Press, 1995. (Trad. española: *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, 1999.)
- Heyman, Jacques, *Structural analysis: a historical approach*, Cambridge, Cambridge University Press, 1998. (Trad. esp. *Análisis de estructuras. Un estudio histórico*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, 2004.)

- Heyman, Jacques. *The Science of Structural Engineering*, London, Imperial College Press, 1999. (Trad. española: *La ciencia de las estructuras*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU, 2001.)
- Huerta, Santiago. 2004. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Huerta, Santiago. 2005. Introduction: A brief note on the scientific contributions of Jacques Heyman (b. 1925). En: *Essays in the History of the Theory of Structures, in honour of Jacques Heyman*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, CEHOPU: xiii–xvi.
- Huerta, Santiago. 2012. Wedges and plate-bandes: mechanical theories after De la Hire. En: *L'architrave, le plancher, la plate-forme. Nouvelle Histoire de la construction*, R. Gargiani, ed. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes: 405–435.
- Huerta, Santiago. 2019. Guastavino Tile Vaults. The Long Migration of a Building Technique. En: *Migration und Baukultur. Transformation des Bauens durch individuelle und kollektive Einwanderung*, H. Kilper ed. Basel: Birkhäuser: 183–202. <https://doi.org/10.1515/9783035618419-013>
- Huerta, Santiago. 2022. *Informe estructural complementario de las bóvedas del Parque O Pasatempo (Betanzos)*. Madrid: Departamento de Estructuras, UPM. Xunta de Galicia. Consellería de Cultura.
- Lee, Sanghun. 1996. Iron reinforced lintel: A paradox of Neoclassical architecture. En: *Technology and Form; Iron Construction and Transformation of Architectural Ideals in Nineteenth Century France, 1830-1889*. PhD. Massachusetts Institute of Technology: 21–49.
- L'Héritier, Maxime. 2010. Philippe Dillmann y Paul Benoit. Iron in the building of gothic churches: its role, origins and production using evidence from Rouen and Troyes. *Historical Metallurgy* 44: 21–35.
- Lugli, Giuseppe. 1957. *La Tecnica edilizia Romana con particolare riguardo a Roma e Lazio*. Roma: Giovanni Bardi.
- Middleton, Robin. 1959. Jacques François Blondel and the “Cours d'Architecture”. <https://doi.org/10.2307/987903> *Journal of the Society of Architectural Historians* 18: 140–148.
- Middleton, Robin. 1985. Architects as engineers; the iron reinforcement of entablatures in 18th France. *AA Files* 9: 54–64.
- Middleton, Robin. 1987. Des architectes qui imitent les ingénieurs. La question des linteaux armés au XVIII^{ème} siècle. En: *L'idée constructive en architecture*, X. Malverti, ed. Paris: Picard: 119–135.
- Middleton, Robin y M. N. Baudouin-Matuszek. 2007. *Jean Rondelet: The Architect as Technician*. New Haven, London: Yale University Press, 2007
- Orlandos, A. 1966. *Les matériaux de construction et la technique architecturale des anciens grecs*. Paris: Editions E. de Boccard, 1966.
- Ousterhout, Robert. 1999. *Master builders of Byzantium*. Princeton, N. J.: Princeton University Press.
- Patte, Pierre. 1755. *Études d'architecture contenant les proportions générales... des meilleurs édifices de France et d'Italie*. Paris: Chez l'auteur, 1755.
- Patte, Pierre. 1769. *Mémoires sur les objets les plus importants de l'architecture*. Paris: Rozet.
- Perrault, Charles. 1909. *Mémoires de ma vie par Charles Perrault. I Voyage a Bordeaux (1669)*, (publ. por Paul Bonnefon). Paris: Librairie Renouard.
- Petzet, Michael. 2000. *Claude Perrault und die Architektur des Sonnenkönigs. Der Louvre König Ludwigs XIV and das Werk Claude Perraults*. München: Deutscher Kunstverlag.
- Petzet, Michael. 2012. Perrault et l'architrave armée. En: *L'architrave, le plancher, la plate-forme. Nouvelle Histoire de la construction*, R. Gargiani, ed. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes: 376–384.
- Picon, Antoine. 1988. *Claude Perrault, 1613-1688 ou la curiosité d'un classique*. Paris: Picard.
- Poleni, Giovanni. 1748. *Memorie istoriche della Gran Cupola del Tempio Vaticano*. Padova: Nella Stamperia del Seminario.
- Roberts, David. 1855. *The Holy Land, Syria, Idumea, Arabia, Egypt, & Nubia*. London: Day and Son. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.156884>
- Roca, Pere, Paulo B. Lorenço y Angelo Gaetani. 2019. *Historic Construction and Conservation: Materials, Systems and Damage*. New York: Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780429052767>
- Rondelet, Jean-Baptiste. 1830-1832. *Traité théorique et pratique de l'art de bâtir*. Paris: Chez M. A. Rondelet fils, architecte.
- Saddy, Pierre. 1983. A Construct of Modernity: The Reinforced Lintel. *Daidalos* 8: 54–65.
- Saddy, Pierre. 1987. L'art du linteau armé, ou l'artifice des modernes. En: *L'idée constructive en architecture*, X. Malverti, ed. Paris: Picard, 1987, p. 149–162.

- Soo, Lydia M. 2007. *Wren's 'Tracts' on Architecture and Other Writings*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Vitet, Ludovic. 1882. *Le Louvre et le nouveau Louvre (Nouvelle édition, avec un plan du Louvre aux différents âges)*. Paris: Calmann Lévy.
- Viollet-le-Duc, Eugène. 1854-1868. *Dictionnaire raisonné de l'Architecture Française du XI^e au XVI^e siècle*. Paris: A. Morel.
- Werner, Ernst. 1980. *Technisierung des Bauens. Geschichtliche Grundlagen moderner Bautechnik*. Düsseldorf: Werner-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-322-96323-9_2
- Wiegand, Theodor. 1939. *Die Denkmäler als Hilfsmittel der Altertumsforschung (Sonderdruck aus dem Handbuch der Archäologie)*. München: C. H. Beck.
- Wilcox, R. P. 1981. *Timber and Iron Reinforcement in Early Buildings*. London: Society of Antiquaries.
- Wren, Christopher. 1750. *Parentalia: or, Memoirs of the Family of the Wrens... Compiled by His Son Christopher*. London: T. Osborn, R. Dodsley.

Santiago Huerta Fernández es Profesor Titular de Proyecto y Cálculo de Estructuras en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad Politécnica de Madrid y presidente de la Sociedad Española de Historia de la Construcción.

Citar como: Huerta, S. 2023. Claude Perrault, the Louvre colonnade and the invention of the reinforced masonry. *Revista de Historia de la Construcción* 3: 51-78. <https://doi.org/10.4995/rdhc.2023.20936>.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6068-6460>.

Copyright: 2023 SEdHC. Este artículo es de acceso abierto y se distribuye bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.