

La Basílica de Majencio en Roma: construcción y estabilidad

Alejandra Albuerne Rodríguez

La Basílica de Majencio, también conocida como Basílica de Constantino o Basílica Nova, fue comenzada en el año 307 d.C. por el emperador romano Majencio (283–312 d.C.), y terminada en torno al 313 d.C. por el emperador Constantino (272–337).

En el siguiente artículo se presenta una reconstrucción del edificio, se repasa el proceso constructivo de los edificios abovedados de *opus caementicium* u hormigón romano, y se lleva a cabo un análisis estático del edificio, centrándose en las bóvedas de cañón y bóvedas de arista.



Figura 1
Estado actual de la Basílica de Majencio. Vista interior de la nave norte, única en pie en la actualidad

RECONSTRUCCIÓN DEL EDIFICIO

La Basílica de Majencio se distancia de la tipología tradicional de basílica romana (figura 2). La aparición del *opus caementicium* u hormigón romano en los siglos anteriores permitió un cambio de tipología constructiva que sustituía las combustibles cubiertas de madera de las basílicas tradicionales por una solución más resistente ante el fuego: las bóvedas. Tanto las bóvedas de arista que cubrían su nave central, como las bóvedas de cañón que aún cubren las naves laterales (la nave norte se conserva prácticamente intacta, estructuralmente hablando), son las más grandes de su tipología conocidas del Imperio Romano.

La Basílica de Majencio fue proyectada empleando la tipología de los majestuosos *frigidarium* de las grandes termas de Roma, como las Termas de Caracalla (212–216 d.C.) y las de Diocleciano (298–306 d.C.). Se trata, al igual que ocurre en las basílicas tradicionales, de edificios compuestos por una nave central más ancha y más alta flanqueada por naves laterales más bajas, con la diferencia de que estas naves no se apoyan sobre columnas, sino sobre gruesos muros de hormigón. La nave central está cubierta por tres bóvedas de arista, mientras que las naves laterales están cubiertas, cada una, por tres bóvedas de cañón de eje transversal a las naves. Los muros ,asivos sobre los que apoyan las bóvedas de cañón sirven a su vez para contrarrestar los empujes de las bóvedas de arista de la nave central.

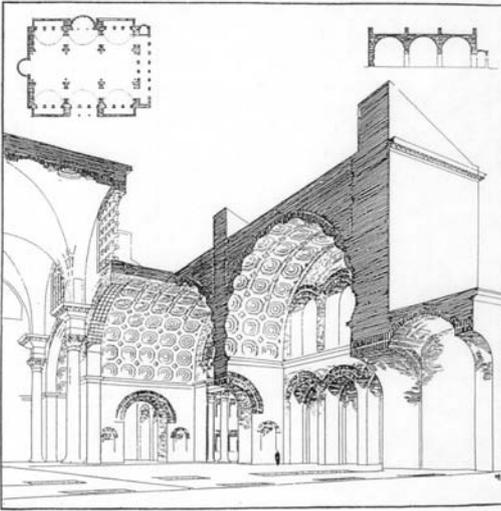


Figura 2
Vista axonométrica de la Basílica de Majencio (Loempel), seccionada. La nave central se eleva y en los muros se abren grandes ventanales que iluminan el interior, como ocurría en las basílicas tradicionales

Fachadas y cubiertas

La topografía natural del terreno presentaba un importante desnivel desde la esquina sureste de la Basílica a la esquina noroeste, que se encontraba unos 8 m más baja. La cota del piso interior de la Basílica se situó por encima del nivel más alto de la topografía del terreno. La fachada principal, la sur, se situaba en la Vía Sacra, y el acceso se producía a través de un pórtico con 4 columnas, situado a lo alto de una escalinata que salvaba el creciente desnivel entre el interior del edificio y la cota de la calle.

La fachada oeste era, por tanto, casi 8 m más alta que la fachada este y estaba rematada mediante un ábside semicircular en la nave central, cubierto por una semicúpula esférica. A esta fachada se adosaron, por motivos estructurales, contrafuertes y otros elementos funcionales que servían de contrarresto, como un núcleo de escaleras.

La fachada este, por el contrario, permitía el acceso al edificio al nivel de la calle y a ella se adosaba un pórtico cubierto por pequeñas bóvedas de arista. Este pórtico cumplía también una función estructural, ofreciendo contrarresto a los empujes de la gran bóveda de arista de la nave central.

La fachada norte contaba con un segundo ábside semicircular rematando el tramo central de la nave norte, en frente de la entrada principal al edificio.

Las naves laterales, al igual que la galería de acceso en la fachada este, estaban rematadas con cubiertas aterrazadas transitables, a las cuales se accedía mediante una serie de escaleras integradas en los muros del edificio.

La nave central estaba rematada por cubiertas de faldones que seguían la forma de las bóvedas interiores y que estuvieron en su día cubiertas por tejas (figura 11).

Cimentaciones

Los diferentes estudios arqueológicos¹ realizados sobre la Basílica coinciden en afirmar que el edificio se asienta parcialmente sobre los restos de construcciones anteriores relacionadas con el mercado de Nerón, como son el Pórtico del Mercado y las *horreas* (almacenes) *Piperataria* y *Margaritaria*.

Dichos restos se sitúan bajo las naves sur y central, habiendo sido aprovechados para apoyar las cimentaciones de los muros que sustentan las bóvedas de éstas.

La cota de apoyo de las cimentaciones, tanto las reutilizadas como las de nueva construcción, se corresponde con el nivel del terreno natural, en este caso el monte Velio. Se sitúan, por tanto, a la menor profundidad posible. La cota del interior del edificio se alcanza mediante un relleno dentro de los muros perimetrales.

Los más recientes estudios geotécnicos que han acompañado a las excavaciones arqueológicas han permitido comprobar que el tamaño de las cimentaciones de la Basílica varía de acuerdo con las cargas que soportan y con la resistencia del propio terreno,² testimonio indiscutible de los avanzados conocimientos constructivos y científicos que poseían los romanos en época del Bajo Imperio.

Las cimentaciones son corridas bajo los muros, construidas en hormigón romano, probablemente apisonado.

Muros

La Basílica de Majencio se levanta sobre gruesos muros de hormigón romano u *opus caementicium*,

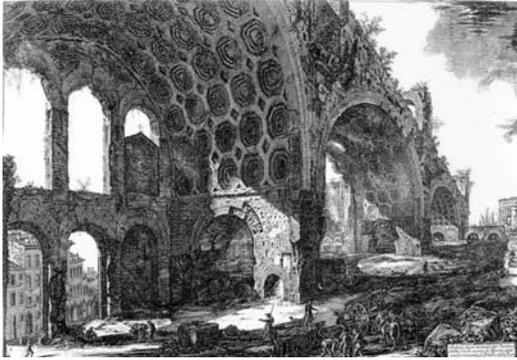


Figura 3
Basílica de Majencio. G. B. Piranesi 1774

revestidos de fábrica de ladrillo u *opus latericium*. Su forma estructural determina su forma arquitectónica.

Junto con las fachadas, los principales muros del edificio son los muros de apoyo de las seis poderosas bóvedas de cañón que se abren a ambos lados de la nave central. Los cuatro muros interiores tienen un espesor aproximado de 3,3 m, mientras que los muros de la fachada este rondan los 4,4 m y los de la fachada oeste, más críticos debido a su mayor altura, tienen un espesor de aproximadamente 5,0 m.

Bóvedas

Existieron dos tipos de bóvedas en el edificio: bóvedas de cañón sobre las naves laterales y bóvedas de arista sobre la nave central, todas ellas construidas en *opus caementicium*.

La nave central tenía una luz de 25,50 m aproximadamente. Estaba cubierta por 3 bóvedas de arista, de planta aproximadamente cuadrada. Estas bóvedas se han perdido, conservándose únicamente pequeños tramos de los arranques, así como fragmentos caídos encontrados en los alrededores de la Basílica. Se han conservado en pie hasta nuestros días unas bóvedas similares, si bien más pequeñas, pertenecientes al antiguo *frigidarium* de las termas de Diocleciano, convertidas en la iglesia de Santa María degli Angeli.

Los fragmentos conservados han permitido apreciar la decoración mediante casetones en el interior de estas bóvedas. Minoprio (1925), y anteriormente D'Espouy,³ reconstruyen esta decoración con caseto-

nes octogonales, rellenando el espacio con otros cuadrados de menor tamaño, mientras que las aristas de las bóvedas se decoraban con casetones ovalados.

Bajo los arranques de las bóvedas se encontraban enormes columnas corintias, con fustes monolíticos de mármol, como puede observarse en la figura 2. Estas columnas no cumplían una función estructural, sino que eran meramente decorativas. Una de ellas se conserva todavía frente a la basílica de Santa Maria Maggiore (Roma).

En la actualidad permanecen casi intactas tres de las seis bóvedas de cañón que cubrían las naves laterales

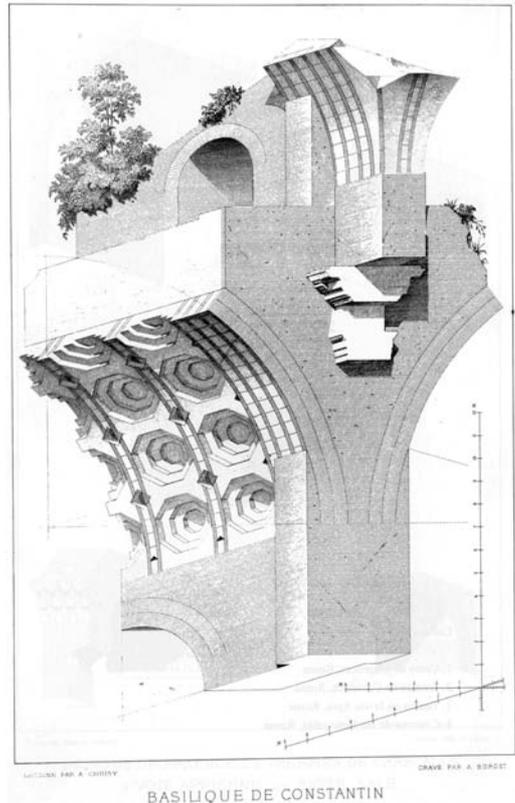


Figura 4
Detalle del arranque de una bóveda de arista sobre los riñones de las bóvedas de cañón, dibujado a partir de los restos de la Basílica de Majencio. Se muestran con claridad los casetones que decoraban y aligeraban las bóvedas de cañón, así como las rosas de ladrillo que definían constructivamente la bóveda (Choisy 1873)

de la Basílica de Majencio, faltando únicamente de la parte superior del muro oeste de la bóveda noroeste.

Las bóvedas de cañón tienen una luz aproximada de 23,2 m y un ancho de unos 17,5 m, siendo su altura 24,5 m desde el nivel de piso original de la basílica. Al igual que ocurría con las bóvedas de arista, estos cañones están decorados con casetones octogonales, además de otros cuadrados menores en los espacios intermedios. En la figura 4 se puede observar la geometría de los casetones tipo.

PROCESO CONSTRUCTIVO

Construcción de muros

La Basílica de Majencio se levanta sobre muros de *opus caementicium* entre hojas de ladrillo que hacían las veces de encofrado perdido.

El procedimiento para construir los muros consistía en la ejecución, en primer lugar, de una cierta altura de las hojas exteriores de ladrillo, las cuales se podían levantar sin necesidad de cimbras. El aparejo de estas hojas permitía una unión muy sólida entre ellas y el núcleo de hormigón.

A continuación, entre ambas hojas se colocaban las capas de *caementa* (árido) alternadas con capas de mortero, relleno de todo el interior del muro. Los pedazos de *caementa* tienen un tamaño aproximado de un puño y se colocan en hiladas cuyo espesor es, comúnmente, de unos 7 cm de espesor. A esta hilada le sigue una capa de mortero de entre 3 y 4 cm que rellena los huecos entre los pedazos de árido, y así, sucesivamente.

Las hojas exteriores de ladrillo se ataban entre sí empleando, principalmente, dos sistemas. En primer lugar, se colocaban hiladas de ladrillos *bipedales* (2 × 2 pies) que cruzaban el muro entero. El segundo sistema consistía en dejar maderos perpiños embebidos en los muros que servían, además, de apoyo para el andamiaje y que se serraban una vez finalizaba la construcción del muro, dejándolos enrasados con la superficie de ladrillo (figura 5).

Construcción de bóvedas de cañón

El empleo de hormigón romano simplificaba la construcción de bóvedas. En palabras de Choisy:⁴

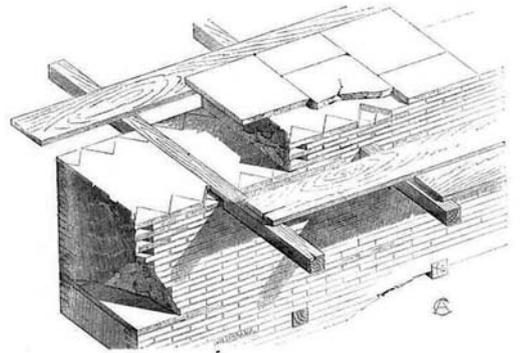


Figura 5
Sistemas de atado de las hojas exteriores de ladrillo en los muros de hormigón romano (Choisy 1873)

el aglomerante hace que las hiladas de mortero y de piedras se confundan en una masa continua y homogénea, cuya estabilidad es indiferente a la dirección de asiento. Los romanos aprovecharon esta circunstancia para liberarse radicalmente de todas las complicaciones que entraña la construcción de juntas convergentes.

Según Choisy, el hormigón de las bóvedas romanas se ejecutaba de igual modo que en los muros. La diferencia radicaba en un mayor cuidado a la hora de elegir el material de la *caementa*, ya que la selección de materiales de menor densidad para las partes superiores de la construcción llegaba a ser imprescindible en bóvedas de grandes luces.

Las bóvedas se construían con ayuda de cimbras permanentes, ejecutadas en ladrillo, que quedaban embebidas en la masa de hormigón final. En bóvedas de un cierto tamaño, como en la Basílica de Majencio, el empleo de estos nervios de ladrillo resultaba muy ventajoso en términos económicos. Estos arcos se construían directamente sobre la cimbra de madera, y, una vez completos, podían entrar en carga.

Una vez el mortero del hormigón fraguaba, los nervios, que habían quedado embebidos por completo en el hormigón, pasaban a trabajar como una parte indiferenciable de la bóveda: se conseguía un reparto de las cargas a través de los tres materiales: *caementa*, mortero y ladrillo. En conclusión, las armaduras internas de ladrillo empleadas en las bóvedas romanas tenían una finalidad puramente constructiva, sin

ser estructuralmente necesarias en el estado final de la bóveda.

En las bóvedas de cañón de la Basílica de Majencio se emplearon nervios de ladrillo aislados. Los nervios se encontraban separados una distancia de 2,40 m aproximadamente, que corresponde al ancho de los casetones que aligeraban, a la vez que decoraban, el intradós de las bóvedas. Su espesor era doble, lo que corresponde a 1,20 m, de acuerdo con lo establecido anteriormente acerca del uso de ladrillos de 60 cm en su lado mayor. Este gran espesor de los nervios de ladrillo es necesario debido a la enorme luz y embergadura de las bóvedas.

Construcción de bóvedas de arista

La complicación de una bóveda de arista reside en su trazo y en la construcción de las cimbras pertinentes. En el caso de la Basílica, los dos cañones que forman la bóveda de arista son ligeramente diferentes. La bóveda cuyo eje es transversal a la nave tiene una luz de 24,8 m aproximadamente, frente a los 23,0 m de la otra bóveda.

La curva ideal de intersección de tales cañones no está contenida en un plano y su trazado y construcción son complicados. Probablemente las intersecciones fueron simplificadas para que la construcción de las cimbras de madera y nervios de ladrillo resultase más sencilla.

En este caso, las nervaduras se colocaban a lo largo de los arcos principales de la bóveda, tanto formeros como cruceros. Las tipologías de nervios empleadas en la Basílica pueden verse en la figura 6 representados por Durm.

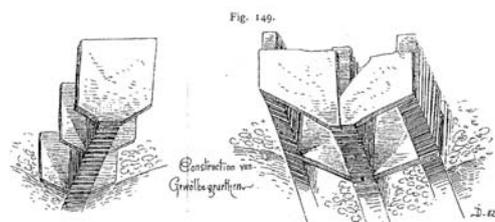


Figura 6
Nervios de ladrillo de las bóvedas de arista de la Basílica de Majencio según Durm (1885). Los ladrillos se recortaban para formar las aristas

Para la ejecución de los casetones que dan relieve al intradós se construían moldes de madera que se colocaban directamente sobre la cimbra inicial, también de madera, y se fijaban en su posición definitiva. Sólo una vez todos estos moldes estaban en su lugar se procedía a levantar los nervios de ladrillo, los cuales se veían afectados, en el caso que nos concierne, por la existencia de relieves menores situados en las esquinas entre los casetones mayores. Estos pequeños casetones desplazaban ligeramente los ladrillos en la dirección radial.

ANÁLISIS ESTÁTICO DE LA BASÍLICA

La teoría plástica

Jacques Heyman⁵ ha recuperado, en décadas recientes, el análisis tradicional de las estructuras de fábrica validándolo definitivamente al englobarlo dentro del marco de la teoría plástica del cálculo de estructuras.

El hormigón romano se puede considerar un ejemplo más del material fábrica.

La aplicación de la teoría plástica al material fábrica es posible gracias a tres hipótesis:

1. La resistencia a tracción es nula. En el caso del *opus caementicium*, en el que el mortero proporciona una trabazón al conjunto, convirtiéndolo en cuasi-monolítico, esta hipótesis podría parecer excesivamente segura. No obstante, la existencia de capas de *caementa* y la incertidumbre a cerca de las «entrañas» del material, de su verdadera composición, permiten adoptar esta hipótesis sin que el grado de seguridad sobrepase lo razonable.
2. La resistencia a compresión es infinita. Para el *opus caementicium*, la resistencia a compresión puede rondar los 30 MPa. En la mayoría de los casos, las tensiones no alcanzan ni siquiera un 10% de esta resistencia, hallándose entre 0,5 y 1,0 Mpa.
3. El fallo por deslizamiento es imposible.

Adoptando estas hipótesis se deduce que «el modo de rotura por articulación en un borde libre ... es el único posible», en palabras de Heyman. Se trata, por tanto, de un problema de estabilidad.

Esquema de comportamiento estático de la Basílica de Majencio

El gran reto estructural de la basílica de Majencio radica en su escala. El esquema estructural es el siguiente. Cada bóveda de arista de la nave central ejerce, en sus cuatro puntos de apoyo, empujes oblicuos. En las dos crujías interiores, B y C (figura 7), en las que se encuentran dos bóvedas iguales, las componentes de los empujes en la dirección longitudinal de la basílica se contrarrestan, encontrándonos únicamente con la resultante en el plano transversal.

Por el contrario, al estudiar las crujías A y D nos encontramos con que las componentes longitudinales de los empujes habrán de ser contrarrestadas por los muros exteriores, oeste y este respectivamente, y por los elementos de contención adheridos a éstos,

como el ábside semicircular rematando el muro oeste y el pórtico de bóvedas de arista junto al muro este.

En cuanto a la resultante en el plano transversal, éste es contrarrestado por los gruesos muros de las naves laterales, inteligentemente situados a lo largo de las crujías transversales (A a D), rematados por unos contrafuertes en forma de cuña que llegan hasta el nivel de la cubierta de las bóvedas de arista.

Sobre estos muros transversales apoyan las bóvedas de cañón, que únicamente ejercen empujes en la dirección longitudinal de la Basílica (este-oeste). Al igual que ocurría con la bóvedas de arista, en las crujías B y C, los empujes horizontales se contrarrestan. En cambio, en las crujías A y D la componente horizontal (longitudinal) habrá de ser contenida por el muro y elementos complementarios al mismo.

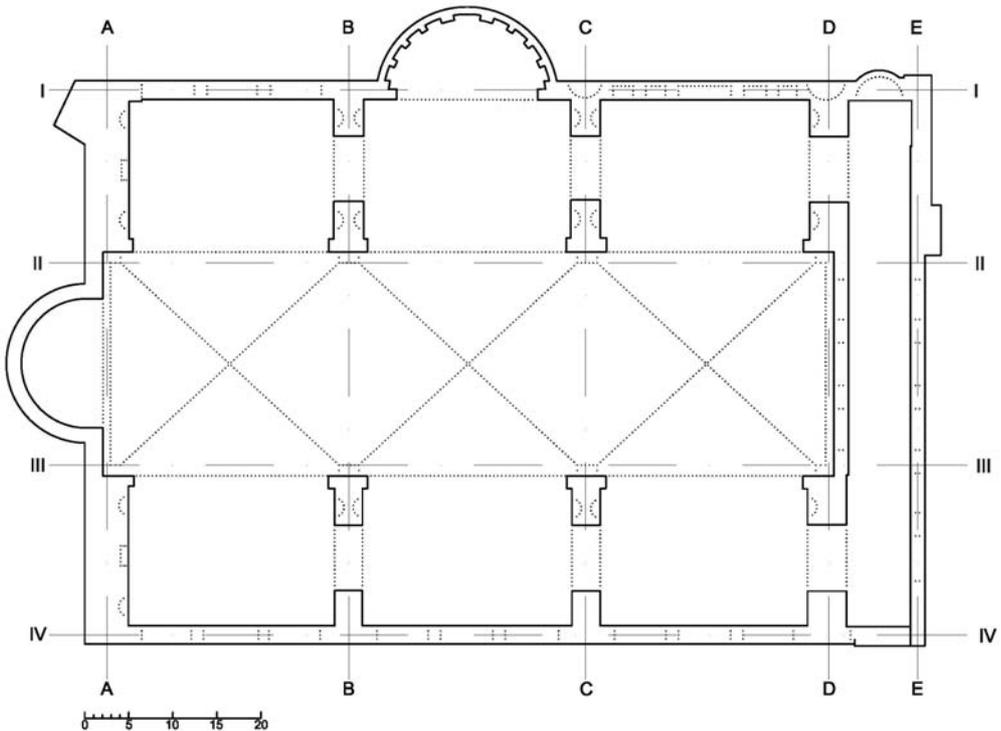


Figura 7
Planta esquemática de la Basílica de Majencio

Debido a la configuración del terreno natural sobre el que se asienta la Basílica, la base del muro oeste de la Basílica está hasta 8,00 m más baja que la del muro este. Este aumento de altura hace de este muro el punto crítico de la estructura, lo que obligó a incorporar elementos de refuerzo en el mismo. Se construyeron así hasta cuatro sistemas de contrarresto adicionales.

Se han analizado los dos elementos más susceptibles de fallo por diseño del conjunto: la bóveda de cañón entre las crujías A y B de la nave norte y la bóveda de arista contigua a la misma, ambas cargando sobre el muro oeste, el más alto del edificio.

Bóvedas de cañón

Para analizar una bóveda de cañón basta considerar una rebanada de la misma, asemejándola al correspondiente arco de medio punto.

Se hallará la línea de empuje mínimo, que será tangente al extradós de la bóveda en la clave y al intradós en algún punto intermedio entre el arranque y la clave, cuya posición dependerá del espesor de la bóveda y de los materiales que la compongan.

Se halla la línea de empuje mínimo, obteniéndose un arco triarticulado (Lámina II) que no es en ningún caso un mecanismo. El mecanismo sólo se presentaría con la formación de una cuarta rótula en la cara exterior del muro sobre el que se apoya la bóveda.

Por el contrario, la bóveda se demostrará estable si esta última rótula no llega a formarse, o lo que es lo mismo, si la línea de empujes permanece dentro del muro en toda la altura de éste.

La geometría tomada para el análisis se ha obtenido de levantamientos fotogramétricos y mediciones geodésicas recientes. Siedler, Hemmleb y Sacher (2002)⁶ nos ofrecen una planta de los restos de la Basílica a escala 1/25 realizada empleando una estación total de la que es posible leer algunas medidas claves para construir una sección de la nave. A.S. Ferretti⁷ aporta el resto de medidas necesarias para completar la sección.

Ferretti acompaña su análisis de la basílica con un levantamiento del intradós de la bóveda noroeste llevada a cabo por la Compañía Técnica Fratini y Moriconi, y con el levantamiento de las secciones de las cubiertas realizadas por la Cooperativa Archeologi-

ca. Con esta documentación Ferretti ofrece una serie de medidas de los elementos de la Basílica.

La sección adoptada puede verse en la figura 8. Las luces de las bóvedas son 23,20 m aproximadamente y las flechas están en torno a los 24,50 m por encima del piso interior de la Basílica.

Las bóvedas están decoradas mediante casetones que sirven, a su vez, para aligerar su peso. El volumen de hormigón suprimido por cada casetón, de acuerdo con las medidas proporcionadas por Fokus GmbH (Giavarini 2005), es de 2,24 m³. Esto equivale a una reducción de volumen de 0,32 m³/m² por toda la superficie del intradós de las bóvedas, que supone entre un 18 % del espesor en la clave y un 4% en los riñones.

Se analizará la bóveda, por su envergadura, como un elemento sometido únicamente a su peso propio. Esta hipótesis es válida ya que las demás cargas superficiales (sobrecarga de uso, viento, nieve etc.) son despreciables en comparación a la magnitud del peso propio de la estructura.

Se realiza la siguiente hipótesis a cerca de las densidades del material empleado en las bóvedas de cañón (figura 8):

1. Hormigón ligero en el tercio superior de la bóveda, a partir de los 16,50 m: $\rho = 13,50 \text{ kN/m}^3$.
2. Hormigón de peso medio en el tramo intermedio de la edificación, por debajo del tercio superior y por encima de los 7,00 m: $\rho = 17,00 \text{ kN/m}^3$.
3. Hormigón denso en el tramo inferior de los muros, hasta los 7,00 m por encima del nivel interior de la Basílica, y hormigón del contrafuerte paralelo al muro colocado sobre este, en la cubierta del edificio: $\rho = 22,00 \text{ kN/m}^3$.

Se considerará que la sección analizada no cuenta con más sistema de contrarresto que el propio muro sobre el que se apoya. Se analizará sin considerar la reducción de ,asa ocasionada por los casetones anteriormente descritos.

Se emplea un sistema imaginario de planos de corte para la división de la bóveda en segmentos . Se trata de un conjunto de planos verticales, paralelos entre sí y equidistantes (figura 9). Debido a la simetría de la bóveda, bastará con evaluar la mitad de la misma.

La línea de empuje mínimo es tangente al extradós de la bóveda en la clave y al intradós en un punto

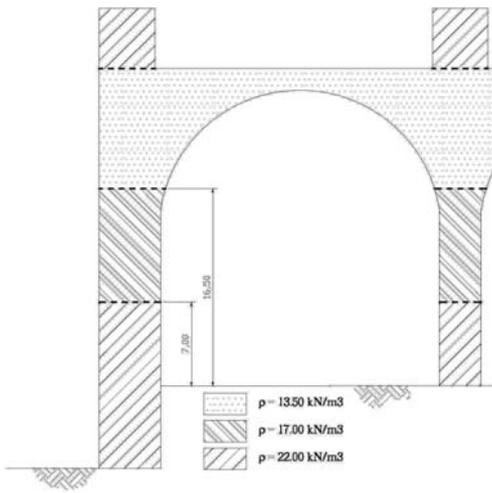


Figura 8
Esquema mostrando la hipótesis de cálculo adoptada referente a la densidad del hormigón de las bóvedas de cañón de la Basílica de Majencio

17,70 m sobre el nivel interior de la Basílica, en los riñones, a menos de 1 m del arranque en horizontal. Se estima que el empuje horizontal de la bóveda es 240 kN/m.

Se completa la línea de empujes dibujando su recorrido a lo largo del muro sobre el que apoya la bóveda. Las divisiones en el muro se realizan mediante planos de corte horizontales. Se observa en la línea de empujes resultante cómo el peso de la cabeza del muro centra las cargas de modo que la línea de empujes queda contenida dentro de una franja central del muro.

La línea de empuje, cae en la base del muro, próxima al tercio central del mismo, con lo que se obtiene un coeficiente de seguridad ligeramente inferior a 3, confirmando la estabilidad de la bóveda.

Si se computa la reducción de masa que supone la existencia de los casetones descritos en el punto anterior, ésta supone una reducción aproximada de un 10% del peso total de la bóveda. Esta reducción de peso conlleva una reducción del empuje de la bóveda en un 10%, por lo que la resultante en la base del muro quedaría, finalmente, dentro del tercio central del mismo.

Nave central: bóvedas de arista

Las bóvedas de arista son el resultado de la intersección de dos bóvedas de cañón. Estructuralmente, este concepto sencillo supone un gran avance. Las cargas serán canalizadas en las líneas de intersección de las bóvedas de cañón, y conducidas a las cuatro esquinas de la bóveda de arista. Por lo tanto, dejamos de tener reacciones lineales en los apoyos corridos, como ocurría en las bóvedas de cañón, para pasar a trabajar con reacciones puntuales localizadas en las cuatro esquinas de la bóveda de arista. Este fenómeno permite que la bóveda se apoye únicamente sobre dichos cuatro puntos.

El análisis de las bóvedas de arista se puede llevar a cabo mediante el método de los cortes. Este método fue descrito por primera vez por Frézier en su tratado de estereotomía de 1737.⁸ El método consiste en considerar cada uno de los 4 tramos de la bóveda compuesto de arcos elementales paralelos, que trabajan de forma independiente unos de otros, y cuyos empujes se recogen en los arcos diagonales. Los arcos diagonales son finalmente analizados, suponiéndolos sometidos a los empujes de los arcos elementales citados y suponiéndolos una vez más independientes del resto de la bóveda en su funcionamiento. Heyman (1999) explica la idoneidad de este método diciendo que el teorema de la seguridad confirma que, si una cúpula seccionada se mantiene en pie, también lo hará dicha cúpula sin seccionar.

Puesto que una bóveda de arista recta tiene doble simetría, para su análisis bastará estudiar un cuarto de la misma. El empuje en las cuatro esquinas será el mismo.

Geometría:

De la nave central de la Basílica de Majencio sólo permanecen en su posición original los arranques de algunos arcos cruceros en el lado norte, así como las huellas de los elementos sustentantes.

Contando únicamente con la geometría de la planta de los apoyos, se ha procedido a estimar una geometría que responde a los datos conocidos sobre la Basílica y a la similitud de ésta con otros edificios aún conservados, como Santa Maria degli Angeli en Roma.

La figura 12 muestra la bóveda tal y como se ha considerado en este análisis. Se conocen la luz transversal de la nave (25,44 m de valor medio) y la luz de cada bóveda que la cruza se puede estimar como la luz de la bóveda de cañón de la nave norte más la

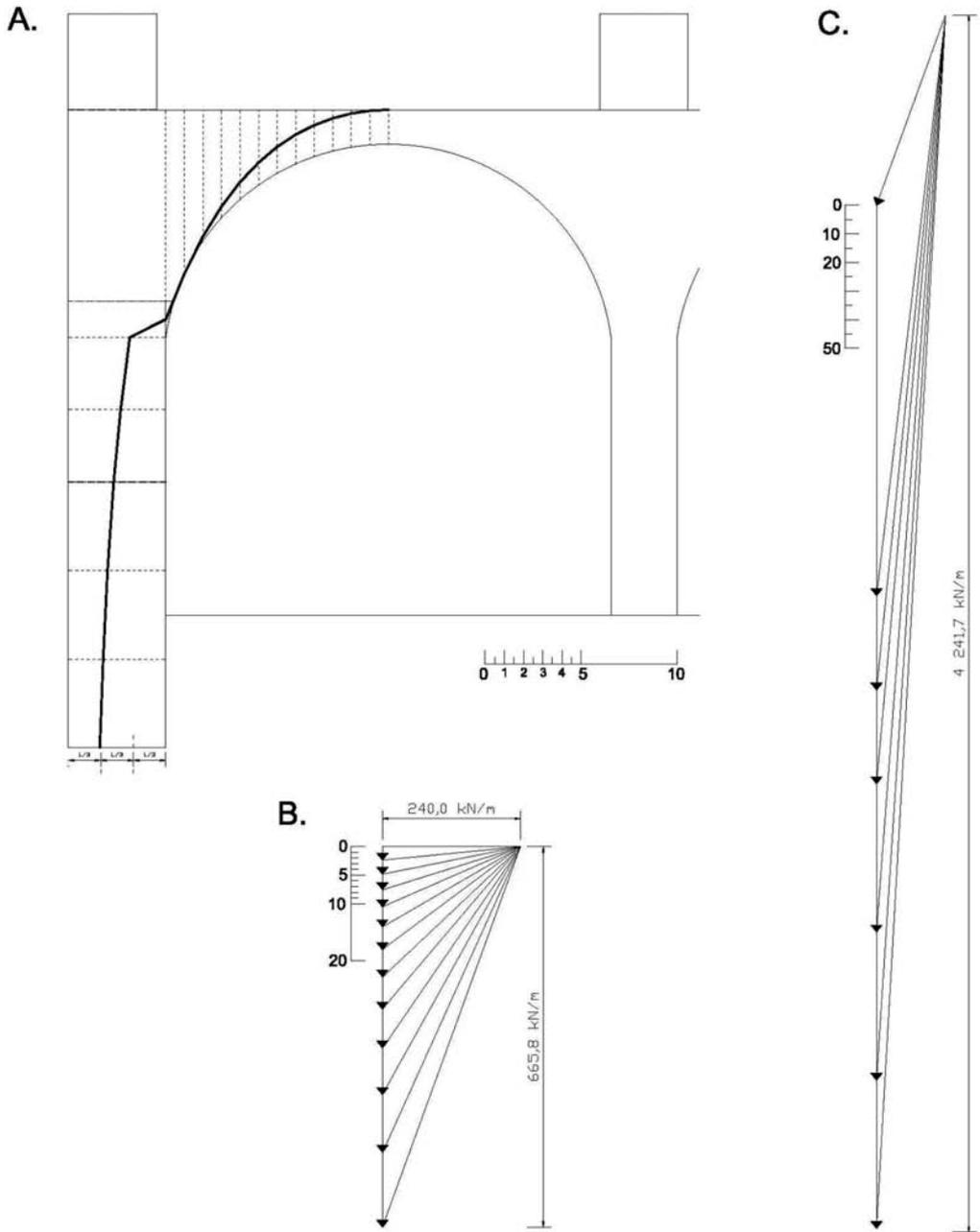


Figura 9
 Polígono de fuerzas y línea de empujes de la bóveda de cañón noroeste

mitad de los espesores de los muros sobre los que apoyan ($23,56 + 3,24 = 26,80$ m). Las tres bóvedas de arista se suponen iguales.

No obstante, observando los restos de los arranques de las bóvedas que aún permanecen en pie vemos que entre esquinas de bóvedas contiguas existe un segemento de la nave cubierto por un tramo de bóveda de cañón sencilla, prolongación de la bóveda longitudinal que genera las bóvedas de arista. El ancho de estos segmentos se estima en 2,0 m. Esto significa que la luz de las bóvedas de cañón transversales es 2 m menor al valor establecido en el párrafo anterior, resultando:

$$L_{\text{bóveda transversal}} = 26,80 - 2,00 = 24,80 \text{ m}$$

Se puede apreciar también que el intradós de la bóveda de cañón longitudinal se separa del final de las bóvedas de la nave norte. Esto indica que la luz de dicha bóveda será menor que la luz total de la nave. Se estima que la separación entre el intradós y el límite de la nave es 1,2 m, por lo que la luz resultante de la bóveda de cañón longitudinal será:

$$L_{\text{bóveda longitudinal}} = 25,44 - 2 \times 1,20 = 23,04 \text{ m}$$

Como se desprende de las medidas anteriores, se trata de bóvedas de arista de planta rectangular cuya flecha viene definida por la luz mayor, y cuyas líneas de intersección (arcos diagonales) no se encuentran contenidas en un plano. No obstante, tal como se describía anteriormente, se supone una simplificación que considera que las intersecciones de las bóvedas son líneas contenidas en los planos verticales que contienen a las diagonales del rectángulo que forma la bóveda en planta. Se ha definido el arco de intersección entre los cañones como el cruce del cañón mayor con dicho plano vertical, lo que implica que la bóveda menor no se considere un cañón perfecto, sino una superficie con doble curvatura que atraviesa las curvas diagonales y es horizontal en la clave.

En cuanto al perfil de la cubierta, por lo que se conoce sobre arquitectura romana, se sabe que sería una cubierta de planos quebrados (figura 10). Sobre cada bóveda de arista se sitúa una cubierta de 8 faldones que recoge el agua en las líneas diagonales, llevándola a las 4 esquinas.

Puesto que no se conocen datos geométricos de esta cubierta, se ha definido suponiendo un espesor

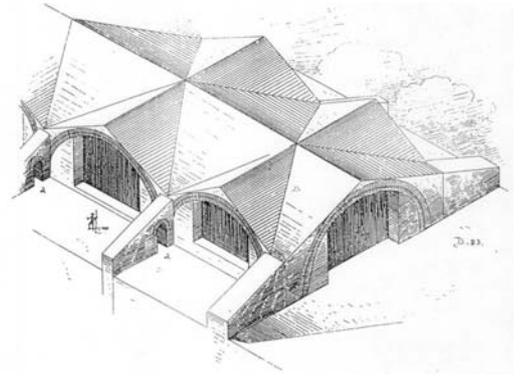


Figura 10
Reconstrucción de la cubierta de la Basílica de Majencio, según Durm (1885)

mínimo del hormigón de la bóveda de $1,80 \text{ m}^9$ y una pendiente de 23° , aproximadamente un 41%. Esta geometría supone un espesor en la clave de 3,0 m y en los arranques de 3,7 m, aproximadamente.

En cuanto al ábside que remata la nave central, éste es de planta semicircular. El espesor del muro no se ha considerado constante, sino que se ha supuesto un escalón a media altura. La semicúpula que remata el ábside se ha tomando del ábside que aún se conserva parcialmente en la nave norte. Resulta una semicúpula esférica, completa en el interior y rebajada en el exterior, tal como se aprecia en la figura 11.

Las hipótesis a cerca de los materiales que conforman las bóvedas, tal como están representadas en la figura 11, son las siguientes:

1. Hormigón ligero en el tercio superior de la bóveda medido a partir del arranque de la misma, es decir, por encima de los 10,25 m: $\rho = 13,50 \text{ kN/m}^3$.
2. Hormigón de peso medio en los dos tercios inferiores de la bóveda, desde su arranque hasta los 10,25 m: $\rho = 16,00 \text{ kN/m}^3$.
3. Hormigón en la parte inferior de los muros y elementos de contrarresto: $\rho = 22,00 \text{ kN/m}^3$.

Al estimar la estabilidad, se simplifica el cálculo suponiendo que la resultante de las componentes horizontales de los empujes de los arcos elementales

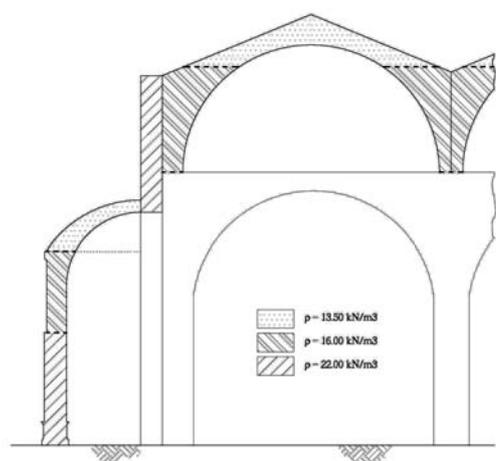


Figura 11
Esquema mostrando la hipótesis de cálculo adoptada referente a la densidad del hormigón de las bóvedas de arista de la Basílica de Majencio

queda contenida en el plano del arco diagonal. Esta simplificación es aceptable puesto que la desviación es mínima.

Una vez conocidas las fuerzas que actúan sobre el arco diagonal, se dibuja su polígono de fuerzas y su línea de empuje mínima (figura 12).

Se estima que el empuje horizontal de la bóveda es 3500 kN en cada esquina.

Al descomponer este empuje en las direcciones longitudinal y transversal de la nave, obtenemos un empuje horizontal perpendicular al muro oeste de 2564 kN, mientras que en la dirección paralela al muro es 2382 kN.

Se comprueba la estabilidad de los sistemas de contrarresto actuando en la dirección longitudinal y transversal de la bóveda. La componente longitudinal del empuje, que actúa transversalmente al muro, se compondrá con el peso, obteniéndose una fuerza inclinada, contenida en un plano vertical y perpendicular al muro oeste. Precisamente el muro oeste, que es el más alto, está rematado en la nave central con un ábside que contribuye a asegurar la estabilidad del conjunto. Se determina el peso de dicho ábside y su centro de gravedad. Su peso se compone con el empuje de la bóveda para obtener el recorrido de la línea de empujes. Se comprueba que la línea queda en

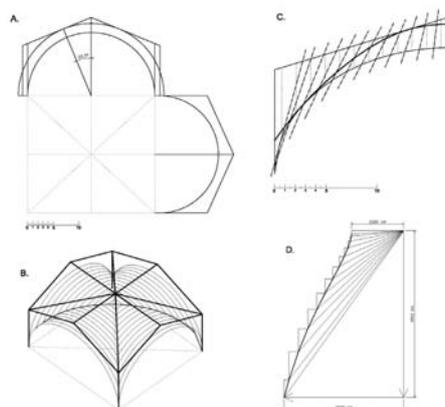


Figura 12
Geometría adoptada, planos de corte, polígono de fuerzas y línea de empujes a lo largo de la diagonal de la bóveda de arista oeste

todo momento dentro de la sección del ábside, como se puede ver en la figura 13.

La segunda fuerza será una fuerza horizontal, actuando en la dirección transversal a la nave, es decir, en el plano del muro oeste de la Basílica. Esta fuerza cuenta como contrarresto con toda la longitud del propio muro, por lo que no será causante de inestabilidad.

No obstante, las bóvedas de la nave central no se han mantenido en pie hasta nuestros días. No cabe duda, por las fuentes pictóricas conservadas, que dichas bóvedas se arruinaron antes del siglo XIV. La mayoría de la literatura sobre la Basílica coincide en afirmar que el colapso fue debido a un terremoto, sin que exista acuerdo a cerca de la fecha del terremoto en cuestión ni tampoco algún tipo de demostración. La investigación aquí presentada pretende encaminarse hacia un estudio más detallado sobre el fallo de las naves central y sur de la Basílica de Majencio para comprender mejor las causas y mecanismos que originaron su colapso.

CONCLUSIONES

- La Basílica de Majencio, comenzado por el emperador Majencio en el 307 d.C. y completado

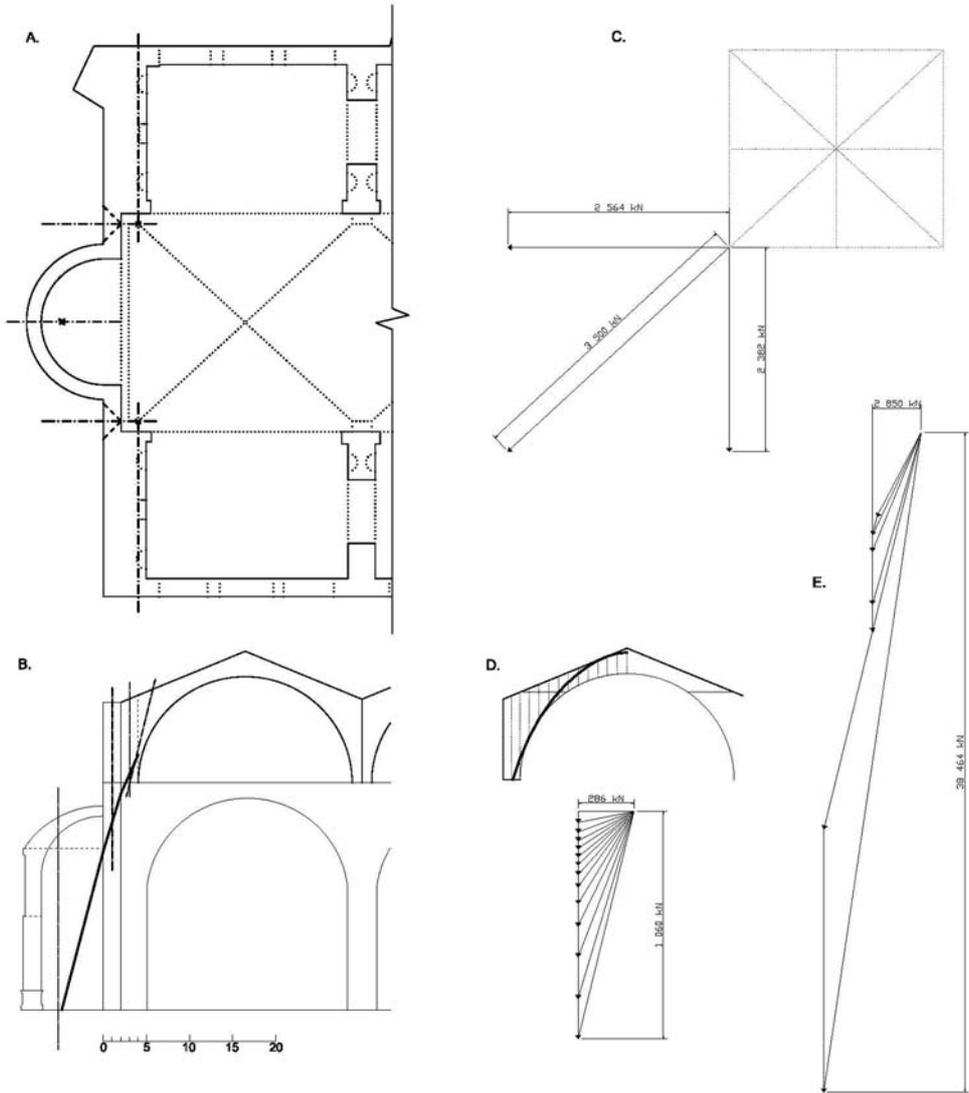


Figura 13

Polígonos de fuerzas y líneas de empuje para la comprobación de la estabilidad del muro oeste

por el emperador Constantino unos 6 años después, contaba con las mayores bóvedas de arista y de cañón, todas ellas de hormigón, construidas por el Imperio Romano que se conocen hoy en día.

- La Basílica es una hazaña de ingeniería y construcción y es una prueba viva de los avanzados conocimientos sobre estos campos que tenían los romanos en la época del Bajo Imperio. Así lo confirman los recientes estudios re-

alizados sobre las cimentaciones del edificio y el inteligente diseño de los sistemas de contrarresto empleados en los muros este y oeste.

- Las nervaduras de ladrillo presentes en las bóvedas de hormigón de la Basílica responden a la técnica constructiva y no a una necesidad estructural del edificio terminado. El empleo de dichos nervios servía para simplificar la ejecución de las cimbras de madera empleadas en la construcción de las bóvedas, pues entraban en carga bajo la acción del peso propio del hormigón fresco.
- Actualmente sólo se encuentran en pie las tres bóvedas de cañón que conformaban la nave norte de la Basílica. Se desconoce la fecha de colapso de las otras dos naves, cuyas cimentaciones no se situaban sobre terreno virgen, sino sobre restos de edificaciones anteriores arrasadas por el fuego (*horreas* del mercado neroniano), si bien se cree que pudo haber sido por culpa de un terremoto.
- El análisis estático de las bóvedas y sistemas de contrarresto críticos de la Basílica se ha llevado a cabo bajo el marco del análisis límite de estructuras de fábrica, que se trata del análisis tradicional de estas estructuras, recuperado por el profesor Heyman y validado definitivamente englobándolo dentro del marco de la teoría plástica del cálculo de estructuras.
- Se han localizado los casos críticos para la estabilidad de los dos tipos de bóvedas de la Basílica de Majencio.
- El punto crítico para las bóvedas de cañón se sitúa en la bóveda noroeste, en su apoyo sobre el muro oeste en el punto más alejado del gran contrafuerte que originalmente contribuía al sustento de las bóvedas en la esquina noroeste. Se ha demostrado que, bajo las hipótesis adoptadas, ampliamente razonadas, esta bóveda resulta estable, situándose la línea de empujes dentro del tercio central de la base del muro de contrarresto.
- El punto crítico para las bóvedas de arista se sitúa en su apoyo sobre el muro oeste, ya que éste es el más alto de la basílica. Contribuye en el contrarresto del empuje la existencia de un ábside adosado al muro, y gracias a la acción de éste la línea de empujes queda centrada, contenida dentro de la planta del ábside.

NOTAS

1. Minoprio, A. 1925; Barosso, M. 1940; Giavarini, C. 2005.
2. Calabresi, Giovanni, en *Subsoil and Foundations*, capítulo 3 de Giavarini 2005.
3. D'Espouy, Hector-Marie Désiré. 1889. Estudio de la Basílica de Majencio durante su disfrute del Prix de Rome de la Academia de Francia en Roma.
4. Choisy, A. 1873. Traducción al español, 1999, 31.
5. Heyman, J. 1966. «The Stone Skeleton», *International Journal of Solids and Structures* 2: 249–79.
6. Siedler, Gunnar; Hemmleb, Matthias; Sacher, Gisbert. 2002. El artículo, del que se ha podido obtener una planta de la Basílica de Majencio, describe el levantamiento llevado a cabo por Fokus GmbH en el año 2000, y que quedó englobado en las investigaciones y trabajos coordinados por el CISTeC, bajo la dirección de Carlo Giavarini (2005).
7. Giavarini, C. 2005. Chapter 6: *The Structures of the Basilica*. Ferretti acompaña su análisis de la basílica con un levantamiento del intradós de la bóveda noroeste llevada a cabo por la Compañía Técnica Fratini y Moriconi, y con el levantamiento de las secciones de las cubiertas realizadas por la Cooperativa Archeologica. Con esta documentación Ferretti ofrece una serie de medidas de los elementos de la Basílica.
8. *La théorie et la pratique de la coupe de pierres et des bois pour la construction des voutes et autres parties des batiments civils et militaires, ou traité de stéréotomie à l'usage de l'architecture*. Estrasburgo/París: Charles-Antoine Jombert (fuente: Huerta 2004).
9. Dato sugerido por A. Ferretti (Giavarini 2005).

LISTA DE REFERENCIAS

- Adam, Jean-Pierre. 1989. *La construction romaine, matériaux et techniques*. París: A. et J. Picard. Traducción al español: 2002. *La construcción romana, materiales y técnicas*. León: Editorial de los Oficios.
- Barosso, Maria. 1940. «Le costruzioni sottostanti la Basilica Massenziana e la Velia». *Atti del V Congresso Nazionale di Studi Romani*, vol. 2. Roma: Istituto di Studi Romani Editore.
- Choisy, Auguste. 1873. *L'art de bâtir chez les Romains*. París: Librairie générale de l'architecture et des travaux publics Ducher et Cie. Traducción al español: 1999. *El arte de construir en Roma*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Durm, Joseph. 1885. *Handbuch der Architektur: Die baukunst der Etrusker; Die Baukunst der Römer*. Darmstadt: Bergsträsser.

- Giavarini, Carlo (ed.). 2005. *The Basilica of Maxentius. The Monument, its Materials, Construction, and Stability*. Roma: «L'Erma» di Bretschneider: Università di Roma «La Sapienza». Centro di ricerca Scienza e Tecnica per la conservazione del patrimonio storico-architettonico (CISTeC).
- Giovannoni, Gustavo. 1925 (1994). *La tecnica della costruzione presso i romani*. Roma: Bardi Editore.
- Heyman, Jacques. 1995. *The Stone Skeleton*. Cambridge (UK): Cambridge University Press. Traducción al español: 1999. *El esqueleto de piedra. Mecánica de la arquitectura de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Huerta, Santiago. 2004. *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- Lancaster, Lynne C. 2005. *Concrete vaulted construction in Imperial Rome: innovations in context*. New York: Cambridge University Press.
- Lugli, Giuseppe. 1957. *La tecnica edilizia romana con particolare riguardo a Roma e Lazio*. Roma: Presso Giovanni Bardi Editore.
- Minoprio, Anthony. 1932. «A restoration of the Basilica of Constantine, Rome». *Papers of the British School at Rome* 12: 1–25.
- Siedler, Gunnar; Hemmleb, Matthias; Sacher, Gisbert. 2002. «Documentation of the Basilica of Maxentius in Rome – methods for providing foundations for monument research». *International archives of photogrammetry remote sensing and spatial information sciences*. Londres: Natural Resources Canada.