Datación de la primera aplicación documentada de hormigón armado en España: el puente romano de Alcántara

Cortés-Pérez, Juan Pedro[a]; Núñez-Fernández, Mario[a]; Cortés-Pérez, Alfonso[b]; Jiménez-Espada, Montaña[a]

[a]*Departamento de Construcción, Escuela Politécnica, Universidad de Extremadura, Avda. de la Universidad s/n, 10003 Cáceres, España;*

[b]*Departamento de Educación, Facultad de Ciencias Jurídicas y Económicas, Universidad Isabel I, C. de Fernán González nº 76, 09003 Burgos, España;*

Resumen

El puente de Alcántara es uno de los puentes romanos más importantes a nivel mundial, siendo monumento Nacional de España desde 1924. Desde su construcción, hace casi dos mil años, ha sufrido numerosos daños debidos al paso del tiempo y la acción humana, lo que ha dado lugar a diferentes intervenciones. La más importante ha sido la realizada por Millán (1856 a 1860), para la reconstrucción del arco demolido en 1810. En una visita al puente se observaron zonas con presencia de hormigón armado. Dadas las zonas donde aparece, la geometría de los armados y su configuración hizo pensar que se trata de una intervención muy antigua, que podría ser de las mismas fechas que la realizada por Millán. De ser así, se trataría de la primera aplicación de hormigón armado en España y una de las primeras a nivel mundial. El objetivo de este estudio es la datación de la intervención y la validación de la hipótesis de partida. Para ello, a partir de un levantamiento 3D del puente mediante dron de las zonas rehabilitadas, se ha realizado un análisis comparativo con los planos del proyecto de Millán, así como láminas y fotografías de diferentes épocas, con objeto de fijar la fecha de las intervenciones. Asimismo, se ha llevado a cabo una investigación en los archivos de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando con la intención de recabar información de las intervenciones en el puente a lo largo del siglo XIX. Finalmente se analiza la geometría y disposición de las armaduras en relación con los conocimientos sobre hormigón armado desde sus primeras patentes a nivel mundial hasta su aplicación generalizada en España. Estos análisis desde diferentes perspectivas permiten concluir sin ninguna duda que las reparaciones de hormigón armado que presenta el puente son de 1857, lo que supone la primera aplicación documentada en España y una de las primeras a nivel mundial.

Palabras clave:

Puente de Alcántara, primera aplicación, hormigón armado, rehabilitación, patrimonio

1. Introducción

El hormigón armado es el material más empleado en la construcción de puentes y edificios en los últimos 150 años. Este nuevo material surgió como el resultado de la combinación de hormigón y barras de acero colocadas estratégicamente en el interior de la sección del elemento estructural, lo que le permite adquirir las ventajas de ambos, resistencia a compresión y tracción, respectivamente [1].

Por otro lado, el hormigón es el resultado de combinar un aglomerante, árido fino y árido grueso. Los aglomerantes más habituales empleados en la fabricación de hormigón han sido la cal aérea y la cal hidráulica, dando lugar a los hormigones comunes e hidráulicos, respectivamente [2].

Los primeros estudios científicos de los conglomerantes hidráulicos los realizó Smeathon para la construcción del Tercer Faro de Eddystone (1756-1759) buscando un material que endureciera bajo el agua [3]. Pero fue Vicat, a principios de siglo XIX, quién profundizó en el conocimiento de la hidraulicidad de las cales, enunciando el fundamento del cemento hidráulico [4], base del hormigón, y por tanto del hormigón armado.

A lo largo de la primera mitad del siglo XIX se fue desarrollando el cemento natural por Europa, que en España se comenzó a fabricar en 1835 [5]. El cemento artificial, también denominado Portland, se comenzó a fabricar en Francia y Gran Bretaña en el segundo cuarto del siglo XIX, pero en España no se inició su fabricación hasta 1898, más de medio siglo de retraso [6].

La primera experiencia conocida de hormigón armado o cemento armado se debe a Joseph Lambot, que en 1843 comenzó a fabricar maceteros y otros elementos de jardín con un mortero de cemento al que introdujo alambres [7,8].

El puente romano de Alcántara estaba situado en la Lusitania romana, actual provincia de Cáceres (España). Fue construido por Cayo Julio Lacer entre los años 103 y 106 (d.C.) para cruzar el río Tajo. Es uno de los mayores puentes construidos por la ingeniería romana, con una altura desde el río hasta la calzada de 47 m. Además, cuenta con la mayor luz de arco de los puentes romanos peninsulares, con 29 m [9,10], y sigue en servicio, transportando el tráfico de la carretera interregional EX-207 Cáceres-Portugal. Según [11], los arcos están formados por dos anillos, uno inferior de 1,6 m de espesor medio y otro superior de 0,5 m, y la cantería se realizó sin mortero. El granito de la cantería está formado por granito de grano grueso, a menudo de tipo porfídico, que forma parte del Macizo Ibérico [11]. El puente romano de Alcántara y su entorno, el Arco del Triunfo y el Templo, es Monumento Nacional de España

desde el 13 de agosto de 1924, y está en proceso de ser declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO.

Durante una visita al puente en abril de 2017 se observó la existencia de intervenciones con armaduras en diferentes zonas, las cuales no se encuentran documentadas, y que por su tipología, combinación de secciones circulares, cuadradas y planos, no son actuales. Dada la importancia tanto histórica como monumental del puente, a lo largo de los últimos siglos ha sido estudiado por relevantes arqueólogos, historiadores o ingenieros, documentando minuciosamente todas intervenciones, sin hacer mención en ninguna de ellas a la presencia de hormigón armado [12–19].

Las únicas referencias a la existencia de hormigón armado en el puente son de Durán [20], mostrándola como ejemplo de una mala intervención en un puente de fábrica, sin datarla, y Moreno Gallo, que la data en 1969 [21].

Ante esta información sobre la historia del puente se ha desarrollado esta investigación con el objeto de datar la fecha de las intervenciones de hormigón armado que presenta, partiendo de la hipótesis de que estas intervenciones podrían convertirse en la primera aplicación de hormigón armado realizada en España y una de las primeras a nivel europeo, presentando conceptos que se recogerían en patentes posteriores. Esto supondría un avance fundamental en el conocimiento de los inicios del uso del hormigón armado en España y Europa, añadiendo valor patrimonial al puente romano. Al estar protegido, la puesta en valor de estas intervenciones en hormigón armado permitirá la aprobación de estudios exhaustivos con toma de muestras para investigar las características de resistencia y durabilidad de los primeros hormigones y aceros, expuestos al medio durante más de 150 años, datos fundamentales para la conservación de este material en estructuras protegidas.

2. Estado del arte

2.1. Desarrollo del hormigón en Europa y España y primeras aplicaciones

A partir de las investigaciones de Smeathon sobre la construcción del Tercer Faro Eddystone [3] y Vicat [4], se comenzó a emplear cementos naturales como aglomerantes para la fabricación del hormigón.

La fabricación del primer cemento artificial, por calcinación a altas temperaturas de calizas puras y arcillas, se produjo en Inglaterra, registrando su patente Joseph Aspdin en octubre de 1824, que denominó cemento Portland y se comenzó a comercializar en los años 30 de ese siglo XIX, iniciándose la producción industrial en 1845 [2].

Las primeras fabricaciones de cemento natural en España datan de 1835, en Cataluña y País Vasco, a partir de la calcinación de piedras calizas con impurezas de arcilla [5]. En el año 1860 existían ocho fábricas en España. Las de Cataluña eran de autoabastecimiento de la zona, mientras que las del País Vasco fabricaban a nivel nacional e internacional, siendo Guipúzcoa la provincia con mayor producción, seguida muy de lejos por Vizcaya [22]. La primera instalación moderna de producción de cemento es de 1852 en Zumaya (País Vasco) [8], mientras que la primera de cemento artificial data de 1898 [23].

En Europa y España se siguieron dos líneas en el empleo del hormigón en construcción: las obras públicas y la edificación, siendo el mayor uso durante el segundo tercio del siglo XIX en las primeras: obras portuarias, puentes, túneles y obras hidráulicas, a pesar de los esfuerzos para emplearlo en la construcción de viviendas [8].

Así, por ejemplo, en Francia se venía empleando el hormigón con cemento natural en obras hidráulicas desde los años veinte del siglo XIX [8], por ejemplo, en los depósitos para la distribución de agua de la Rue Racine en 1833 y a partir de los años 40 de ese siglo en la construcción del alcantarillado de París [24]. Entre 1847 y 1850 se empleó en la construcción de las tuberías de las obras de la traída de las aguas de Aillon a la villa de Avalon [8]. En Gran Bretaña la aplicación más relevante del cemento Portland fue en el alcantarillado de Londres en 1861 [2].

Entre las diferentes soluciones de hormigón, en 1856 Coignet patentó la solución de construir con hormigón, con el nombre de “Emploi du betón hydraulique son appliction aux constructions” [25].

La Revista de Obras Públicas, editada de forma ininterrumpida en España desde 1853 por el colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, difunde los avances de la ingeniería a nivel nacional e internacional. En lo que respecta al hormigón, recoge la primera aplicación del hormigón en el año 1846 para la protección de los pilotes de madera del puente sobre el Urumea en San Sebastián [26]. Los pilotes de madera en la zona dentro del agua salada del mar se habían deteriorado, por lo que para protegerlos “se ideó rodear de cemento la parte inferior”. En esta revista también se informó sobre la visita a la fábrica de Coignet en Saint Denis [27] o de la introducción del sistema de fabricación de “piedras artificiales”, denominación del hormigón en aquellos años, y en especial el sistema Coignet [28]. Este autor indicó que tendría un espléndido futuro por su economía y por su facilidad de construcción. Asimismo, documenta la primera aplicación de hormigón en la construcción de los puentes sobre los ríos Lavalé y Lumbreras, en Soria, iniciada en 1862 [29], en la que Bellsolá indica que “la idea de los arcos de hormigón hidráulico, que no tiene nada de nuevo y menos de

instructivo para los lectores de la Revista de Obras Pública...". Uso que tardó en generalizarse, pues pasaron diez años hasta que Pascual Landa lo empleara en la reconstrucción y reparación del puente de Luchana, ya con los materiales tradicionales no era posible acometer esta reparación [8].

Sin embargo, siguiendo la tendencia de Europa, la gran aplicación del hormigón en España, por la entidad de la obra y el volumen de hormigón que se empleó, fue en las obras hidráulicas de la traída del agua a Madrid, que se denominó Canal de Isabel II, cuyo proyecto fue aprobado en 1851 [30]. En las Memorias sobre el estado de las obras, que se fueron publicando cada año, se menciona de forma natural el empleo del hormigón. Así por ejemplo en la memoria sobre las obras de 1853 se indica que se emplearon 8,170 m^3 para la ejecución del canal y 44,554 m^3, el mayor volumen, en zanjas [31].

2.2. Los inicios del hormigón armado en Europa y España

Tras sus primeras aplicaciones, en 1848, Lambot fabricó una barca de hormigón con una malla de acero que denominó Fer-ciment, (hierro-cemento), que patentó en enero de 1855, presentándola en la Exposición Universal de París de ese año en la que se disponían armaduras entrecruzadas en dos direcciones [32,33].

También en 1854 el británico William Wilkinson, patentó un sistema que combinaba el hormigón con barras de acero, en el que se intuía el comportamiento del hormigón armado, al disponer la armadura en las zonas donde el hormigón estaba sometido a tracciones [34]. En 1855 se registra la primera patente de hormigón armado de Coignet, [8] y posteriormente, en 1861, expone sus principios proponiendo varias formas de aplicarlo a la construcción de pisos, suelos, bóvedas, tuberías, diques, presas, etc. [1]. Pero fue Joseph Monier quien desarrolló la técnica a partir de su primera patente en 1865, con un sistema de armaduras paralelas en una losa, indicando "un armazón con forma de rejilla que se confecciona con hierro redondo, cuadrado, plano o de cualquier clase…, que una vez terminado se baña con cemento por cada uno de los lados", a la que siguieron otras patentes en tuberías (1868), paneles (1869) o vigas (1878) [6,8].

La primera referencia sobre el empleo de hormigón armado en España es en un documento de 1867 del ingeniero militar Rodríguez de Quijano para la ejecución de construcciones defensivas [8], pero su aplicación masiva no llegó hasta 1884 por medio de la introducción de la patente de Monier por el ingeniero Francesc Macià i Llussà en Cataluña [7].

2.3. Las intervenciones realizadas sobre el puente romano de Alcántara

El puente y su conjunto es Monumento Nacional de España desde el 13 de agosto de 1924, pero su valor patrimonial ya era reconocido desde siglos antes, como lo atestiguan el importante número de informes emitidos por la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando de Madrid, órgano de control de las intervenciones realizadas en el puente de Alcántara por su valor patrimonial entre los siglos XVIII y XIX, ante la preocupación por su estado de conservación [17].

Durante sus casi veinte siglos de historia el puente ha sido representado tanto en maquetas, como la de García Galiano de 1772 [35], como en láminas, como las de Fernando Rodríguez de 1797. Estas, aunque se traten de una planimetría, no reflejan características importantes del puente, como la pendiente alomada [36]. También destacan las láminas de Laborde de 1811, que sin tener la delineación de las anteriores, sí reflejan detalles como la pendiente o daños en el pretil [37]. Esto permite tener un conocimiento de cuál ha sido la evolución del puente en el siglo XVIII y XIX.

Los daños que ha sufrido dieron dado lugar a diferentes intervenciones. La primera coetánea con el desarrollo del hormigón y el hormigón armado ha sido la de Alejandro Millán para reconstruir el quinto arco destruido en el 1810 durante la Guerra de la Independencia [38,39]. La anterior intervención la había realizado el ingeniero militar Diego Bodick en 1778 [38], fecha en la que aparecieron los primeros trabajos sobre conglomerantes, pero en la que aún no había surgido el hormigón como tal. La reconstrucción de los daños en 1810 tuvo varios proyectos, el primero en el 1816 mediante dos arcos de sillares añadiendo una pila central; el siguiente proyecto fue de cerchas de madera en 1819; a partir de 1831 se proyecta un arco de sillares [40], proyecto cuya ejecución fue dirigida por el ingeniero Alejandro Millán entre 1856 y 1860 [41] y del cual están expuestos al público los planos originales en la Fundación Iberdrola España en el Conventual de San Benito en Alcántara (Cáceres) [42]. La siguiente y última intervención documentada has sido la reparación en 1969 del descalce de las pilas 3 y 4 mediante hormigón [43].

Además del arco demolido, el puente presentaba importantes daños en sillares por el deterioro del granito originando grietas y oquedades [13,44]. En el año 1857 la Revista de Obras Públicas hace una reseña del avance de los trabajos indicando que se está empleando cemento de Vizcaya (País Vasco) como material para tapar los huecos de los sillares degradados [44]. Otras investigaciones localizan el origen del cemento empleado en Zumaya (País Vasco) [45]. Incluso esta revista se hizo eco de la polémica suscitada en los periódicos por la reparación del arco del triunfo [46].

En las reparaciones, según el informe de inspección realizado por el arquitecto Peró, Millán puso especial esmero tratando de dar "el mismo aspecto que la fábrica antigua" [13]. En el informe de trabajos emitido por Millán en 1859, indica que la obra tiene dos partes: la reconstrucción del arco y la reparación del resto de daños, indicando que "Esta segunda parte ha sido de tanta, o acaso de mayor importancia que la primera, por los delicados, difíciles y peligrosos trabajos que ha exigido" [13].

3. Metodología de investigación

3.1. Introducción

La metodología de investigación llevada a cabo para la datación de la intervención se ha organizado en cinco fases. En la primera se realiza un levantamiento de las reparaciones e intervenciones de hormigón armado que tiene el puente a partir de un levantamiento 3D. Para ello se han empleado dos tecnologías, dron y láser escáner. En una segunda fase, la datación de las intervenciones se realizó a partir de documentación bibliográfica gráfica extraída de archivos históricos: grabados, fotografías y láminas, incluyendo los planos del proyecto de Millán [42]. En el estado de la cuestión, se ha realizado un análisis temporal que incluye fechas anteriores al derribo del arco en 1810 hasta la actualidad, por lo que esta búsqueda bibliográfica abarca desde 1854 hasta 1931, última información sobre el puente en los archivos de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. En la tercera se lleva a cabo un estudio comparativo entre la información de las intervenciones documentadas en la primera fase y la información gráfica extraída de la segunda fase. En la cuarta se analiza la trayectoria profesional de los ingenieros que pudieron intervenir en el puente y su relación con el hormigón armado. Finalmente se extrae el esquema de armados aplicados en las cornisas analizando su configuración con el conocimiento de la técnica en la época.

3.2. Levantamiento geométrico de intervenciones en el puente mediante dron y generación de modelo 3D

Para localizar espacialmente las intervenciones de hormigón armado en el puente y poder relacionarlo con la información recogida en láminas y fotografías históricas, se ha desarrollado un modelo 3D a partir de dos levantamientos. El primero realizado en 2015 con láser escáner, que debido a las limitaciones de acceso presentaba zonas con baja definición. Para solventar esta cuestión en abril del año 2017 se realizó un levantamiento con dron.

En este levantamiento se tomaron más de 900 fotografías georreferenciadas, que por su resolución es posible una observación detallada de todas las zonas del puente. La nube de

puntos generada tiene una precisión de dos centímetros, suficiente para detectar y acotar las zonas de reparación y definir los esquemas de armado.

Además, dos meses después del vuelo del dron, coincidiendo con un nivel más bajo del cauce del río, se realizó una toma de fotografías de alta resolución de la zona de las cornisas.

A partir de ambos levantamientos se obtienen las ortofotos de los alzados aguas arriba y aguas abajo del puente y de la pila central, las cuales permiten una delimitación precisa de las zonas con intervenciones.

3.3. Datación de las intervenciones mediante análisis bibliográfico

Dado el valor patrimonial del puente, desde hace más de tres siglos cualquier intervención debía ser validada y supervisada por la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando [13]. Esta institución fue creada en 1752 para, entre otras cuestiones, la "protección de las artes y del patrimonio cultural, muy particularmente [...] la arquitectura". Muestra de su rigor, son las numerosas visitas e informes que durante las obras de 1857 se realizaron [15,16].

Por ello se ha llevado a cabo un análisis de los archivos de la institución de las actas, correspondencia e informes sobre el control y seguimiento de intervenciones en obras patrimoniales, como el puente de Alcántara, entre los años 1854 y 1884.

Este análisis se completa con el estudio de fuentes bibliográficas y documentales gráficas de los fondos de la Biblioteca Nacional de España, en particular las fotografías realizadas por Clifford y Jean Laurent, que recorrieron España fotografiando monumentos entre 1850-1863 y 1860-1870, respectivamente. Finalmente se analizan imágenes de alta resolución de los planos realizados por Millán para definir la intervención en el puente, expuestas en el Conventual de San Benito en Alcántara, facilitadas por la Fundación Iberdrola España [42].

3.4. Estudio comparativo entre la información del levantamiento 3D y el análisis bibliográfico

La información de láminas, grabados, fotografías y planos históricos proporcionan un gran valor del estado del puente en una fecha concreta. La información más valiosa se encuentra en las fotografías, al ser una imagen fiel de la realidad. Algo menos de precisión, pero de gran valor, es la información gráfica de planos de proyectos que deben validarse con la realidad de las fotografías y levantamiento actual.

Por ello, en esta fase se realiza el análisis comparativo de la información gráfica sobre el puente en diferentes fechas, con el levantamiento 3D de las intervenciones de hormigón armado. Este análisis permite la datación de las intervenciones con gran precisión temporal y espacial.

3.5. Proyectistas de las intervenciones y su relación con el hormigón armado

El puente forma parte de la infraestructura de la carretera de primer orden Salamanca a Badajoz [16], que pasó a ser carretera transversal según la Ley de 1851 [47]. Por ello, cualquier actuación sobre el puente, como elemento de la carretera transversal, era responsabilidad del Cuerpo de Ingenieros de Caminos y Canales provincial [48]. En 1857 se creó una Jefatura de Obras Públicas por provincia [49]. Por tanto, el análisis se centra en los ingenieros de la Jefatura de Obras Públicas de la provincia de Cáceres, a la que pertenecía el puente, y su actividad profesional hasta 1884.

3.6. Definición de esquemas de armaduras aparecidos en el puente

A partir del levantamiento 3D y de las fotografías de detalle se realiza un levantamiento de los esquemas de armados que aparecen en el puente. Para determinar su valor como avance en el desarrollo del hormigón armado, estos esquemas se analizan en comparación con las patentes y esquemas de armados entre los años 1854 [7], primera patente del hormigón armado, y 1865, fecha del lanzamiento masivo de patentes de Monier [6].

Figura 1. Imágenes de los levantamientos realizados a) Vista 3D de la nube de puntos realizada en el levantamiento desde el margen derecho de aguas arriba, con nomenclatura de arcos y pilas (2015), b) vista 3D de nube de puntos y posiciones de los puntos de escaneado y c) ortofotografía del alzado de arriba aguas a partir del levantamiento realizado con dron (2017).

4. Resultados

4.1. Levantamiento

En la *Figura 1* se muestran varias imágenes del alzado del puente aguas arriba obtenida del levantamiento mediante láser escáner y diferentes fotografías de zonas de intervención en el puente. En la *Figura 1.a* se observa las posiciones del láser escáner en la toma de 2015 que condicionan la definición de algunas zonas. En la *Figura 1.b* se muestra la vista 3D del

levantamiento de 2015 con la nomenclatura de arcos y pilas. En ella se pueden observar zonas con baja definición, por ejemplo, el intradós y el tímpano del arco 4. En la *Figura 1c*, se recoge la ortofotografía del alzado del puente aguas arriba obtenida a partir del levantamiento de 2017 realizado con dron, en la que la precisión es mucho más alta que las anteriores.

Las *Figura 2* y *Figura 3* muestran los alzados de aguas arriba y aguas abajo del puente, respectivamente, indicando las intervenciones sobre las ortofotografías del levantamiento de dron de 2017. En rojo se marcan las intervenciones con hormigón y hormigón armado. En las fotografías de detalle referenciadas en estas figuras se muestran algunos ejemplos de las intervenciones y armados. Aunque existen otras zonas de intervención, aquí se muestran solo las de los alzados y la pila central, al ser estos los planos de levantamiento de daños que realizó Millán [42].

Así, en la *Figura 2.a* se observan los daños actuales del alzado izquierdo del contrafuerte del tímpano de la tercera pila o pila central, así como el rejuntado de los sillares. En la imagen de detalle se puede observar la armadura de cosido que hay en el lado derecho del arco 3 (*Figura 2.a.1*). En la *Figura 2. b* y *c* se observa armadura en la cornisa de la pila 3. En la *Figura 2.d* aparece el rejuntado y reparaciones en el arco 4. Finalmente, en la *Figura 2.e* se muestra la armadura de la cornisa de la pila 4 en la zona de tajamar y cara interior del lado del arco 4.

En la *Figura 3.a* se muestra un detalle del rejuntado y un posible sillar reparado en el contrafuerte sobre pila 5. En *Figura 3.b* se observa un cambio en la tonalidad de los sillares de remate de la pila 4, así como reparaciones en la boquilla del lado izquierdo del arco 4 y rejuntado con mortero del interior del arco y pila. En la *Figura 3.c* se aprecia rotura de sillar de cornisa del fuste de pila 4 y armadura vista en la parte de la cornisa de la cara paralela al alzado aguas abajo. La *Figura 3.d* muestra las reparaciones de los daños en la boquilla del arco 4. La *Figura 3.e* muestra los daños actuales de la cornisa de la pila 3 en las zonas reparadas dejando a la vista la armadura. Las *Figura 3.f* y *Figura 3.g* presentan las reparaciones con mortero de la boquilla del arco 3 e interior de este, así como las reparaciones de la cabeza del fuste de la pila 2. Finalmente, las *Figura 3.h* y *Figura 3.i*, muestran las intervenciones en la boquilla y el rejuntado de los tímpanos del segundo arco.

Para el proyecto de reconstrucción del quinto arco y rehabilitación general del puente, Millán realizó unos planos con un levantamiento exhaustivo del estado del puente previo a la intervención [42]. En la *Figura 4.a* y *b* se muestra el levantamiento del alzado aguas arriba y del alzado aguas abajo, respectivamente, remarcando en oscuro las zonas donde faltan sillares existen huecos que tienen que ser reparados, además de la vegetación.

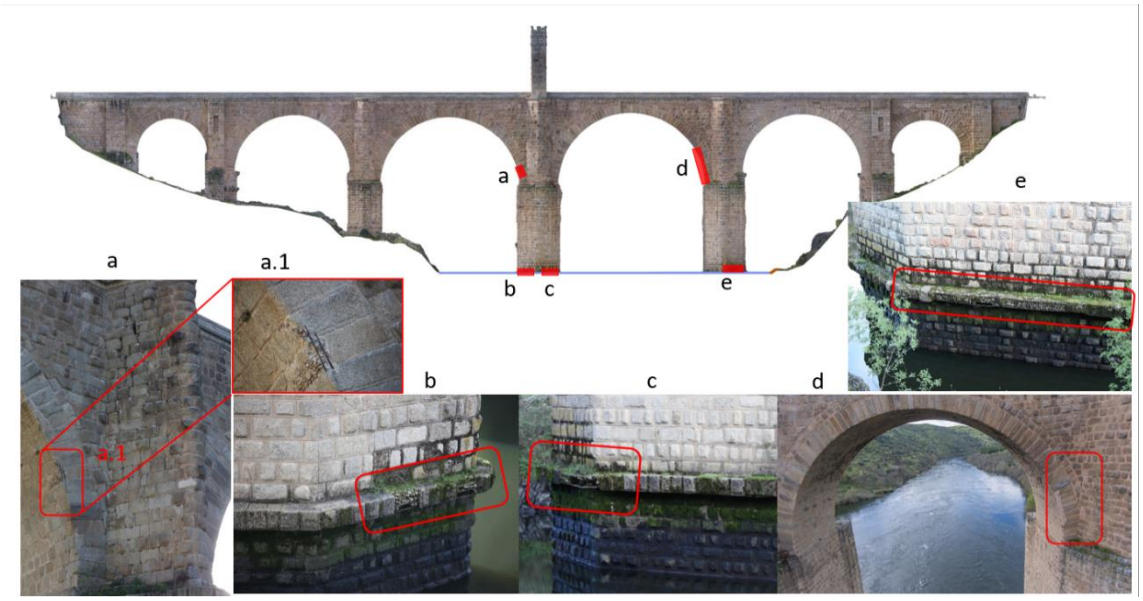


Figura 2. En la figura central se muestra la ortofoto del alzado de aguas arriba en el que se marcan alguna de las zonas donde se ha empleado hormigón y hormigón armado. En las figuras de la a) a la e) se muestran imágenes de detalle de esas intervenciones.

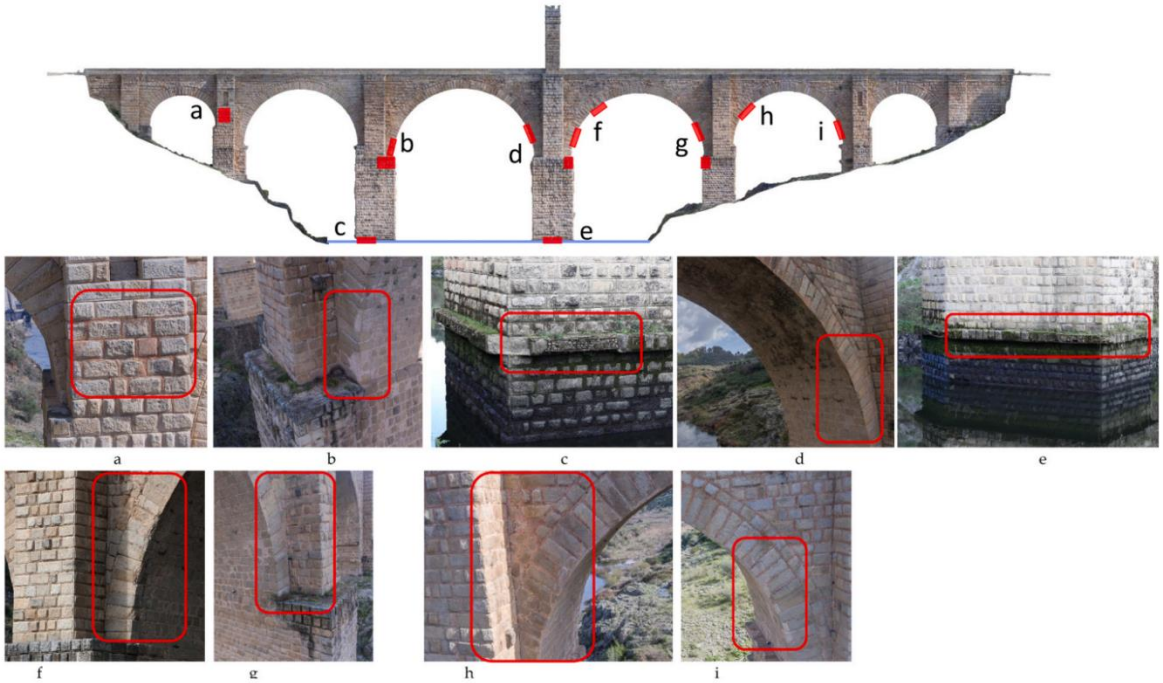
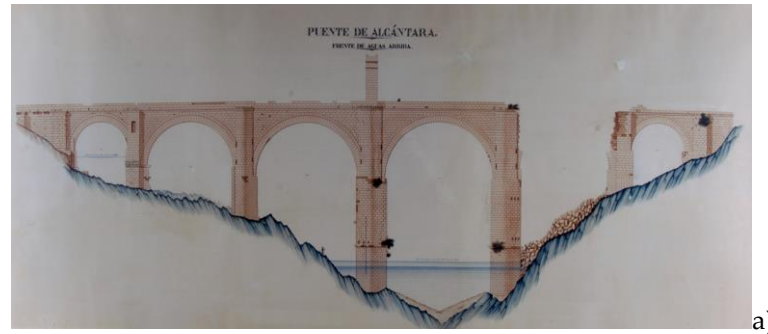
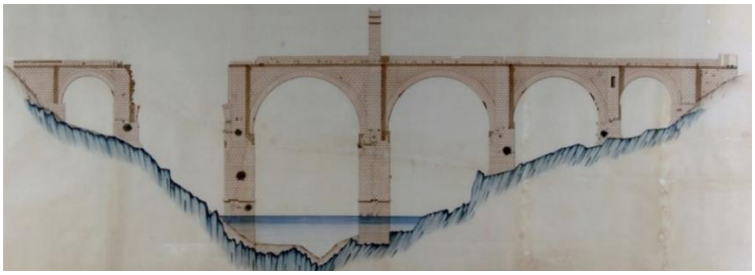


Figura 3. En la figura superior se muestra el alzado aguas abajo, marcando algunas de las zonas con intervención con hormigón y hormigón armado. En las figuras inferiores de la a) a la i) se muestran imágenes de detalle de esas intervenciones.

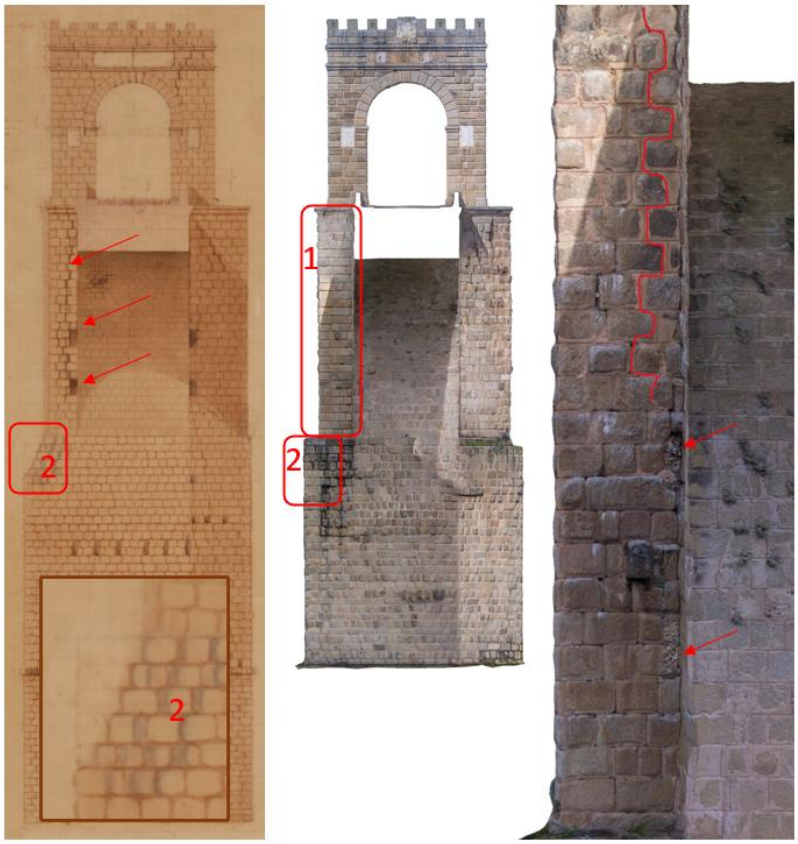


a)



b)

Figura 4. Planos del alzado aguas arriba, superior, y alzado aguas abajo, inferior, con el levantamiento de daños realizado por Millán [42].



a b c

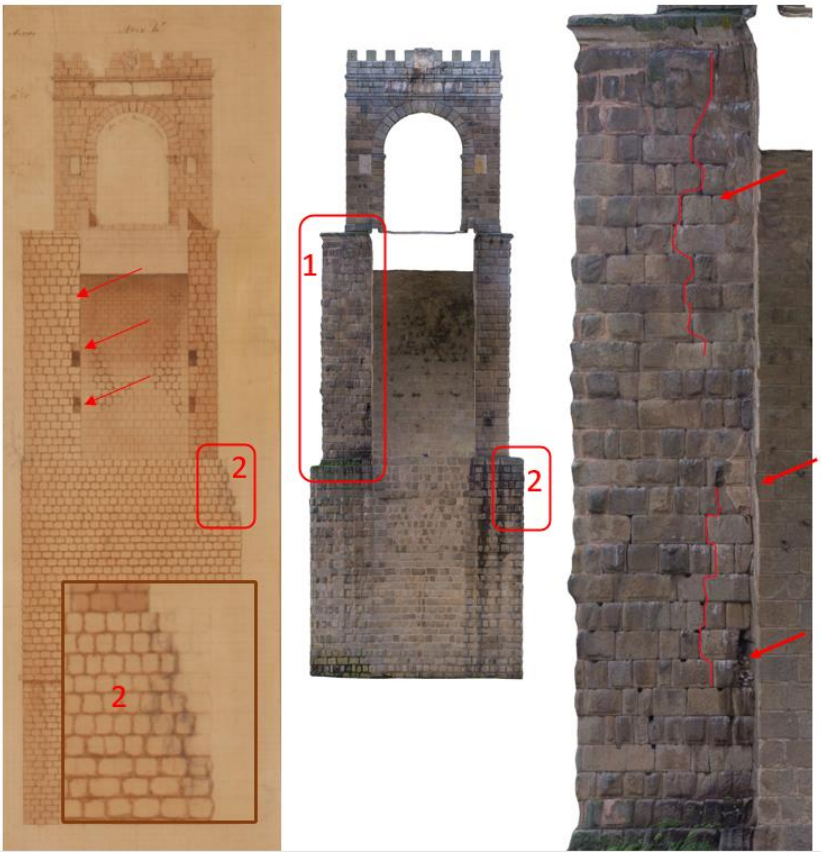
Figura 5. Alzados de la pila central (3) visto desde el arco 3: a) levantamiento realizado por Millán [42], en la zona 2 se delinea de forma tenue el recrecido de la cabeza de la pila, b) ortofotografía del levantamiento con dron y c) detalle de ortofotografía con las reparaciones que se han realizado en zona 1 marcada en b).

Los elementos con daños más importantes y que requirieron de una mayor intervención fueron el arco del triunfo y la pila 3 sobre la que apoya. Para detallarlos, Millán realizó un

levantamiento exhaustivo de la pila central (*Figura 5.a* y *Figura 6.a*). En ellas se pueden observar las fisuras que presentaba el contrafuerte en la zona de tímpanos, así como las zonas sombreadas simétricas a ambos lados, posiblemente puntos de apoyo de la cimbra empleada por los romanos. En las *Figura 5.b* y *Figura 6.b* se muestran las ortofotografías del levantamiento de 2017 desde el arco 3 y 4 respectivamente.

Observando las *Figura 5.c* y *Figura 6.c*, se observa cómo se han rellenado con hormigón las zonas sombreadas de las *Figura 5.a* y *Figura 6.a*, apreciándose incluso el tipo de árido rodado empleado en la fabricación del hormigón.

Asimismo, en las zonas 2 de ambas imágenes (*Figura 5.a* y *Figura 6.a*), se observa en línea más tenue cuál tiene que ser la geometría final de la cabeza de la pila, que se encuentra materializada en las *Figura 5.b* y *Figura 6.b*.



a b c

Figura 6. Alzados de la pila 3 desde el arco 4: a) levantamiento realizado por Millán [42], b) ortofotografía del levantamiento con dron y c) detalle de ortofotografía con las reparaciones que se han realizado en la zona 1 marcada de b).

Los trabajos de rehabilitación quedaron reflejados en una fotografía realizada en 1858 por Clifford [50], que Millán envió a la academia y en la que se pueden observar en qué estado estaban las obras en 1858, como el desmontaje del arco del triunfo (*Figura 7*). En ella se advierte que el escalonado de la cabeza de la pila central (zona 1) está aún sin reconstruir,

mientras que el de la pila 4 sí está ejecutado, ambos recogidos en los planos previos a la obra (*Figura 4.a y b*). Asimismo, en la *Figura 7* se aprecia que las cornisas de las pilas 3 y 4 (zonas 1 y 2), están reconstruidas respecto a lo reflejado por Millán en su levantamiento (*Figura 4.a y b*).

A la finalización de las obras en 1859 Clifford [51] también realizó fotografías *(Figura 8*). En ellas se observa ya la reconstrucción de las cabezas de las pilas 3 y 4 y de sus cornisas (*Figura 8.a y b*). Otro fotógrafo, que viajó por España y realizó fotografías de diferentes monumentos, entre ellos el puente de Alcántara (*Figura 9*), fue Jean Laurent [52]. Esta fotografía recoge la misma situación del puente que la reflejada por Clifford en 1859, con las cornisas reparadas (1 y 2 de la imagen *Figura 9*), los recrecidos de las cabezas de las pilas (3 y 4 de la imagen *Figura 9*) y las reparaciones en las boquillas de los arcos 3 y 4 (5, 6, 7 y 8 de la imagen *Figura 9*). Las siguientes fotografías documentadas del puente datan de 1925 [53] y 1929 [54], las cuales no reflejan ninguna intervención adicional a las citadas ni daños en cornisas o arcos. De esta fotografía la siguiente es del 1969 y es tomada durante los trabajos de reparación de las cimentaciones de las pilas 3 y 4 cuando quedó seco el cauce del río Tajo durante el llenado del embalse de Alcántara, cuya presa está 600 m aguas arriba del puente (*Figura 10* superior). En esta figura se aprecia la erosión de los sillares de la zona inferior de la pila 3, así como la presencia de armaduras vistas en la cornisa de la pila, que, dado el nivel de pérdida de recubrimiento de hormigón que presentan, denota una edad importante. Además, comparando esta fotografía con fotografías actuales (*Figura 10* inferiores), se advierte una perfecta trazabilidad de las zonas con armaduras con las que se observan actualmente y con los daños reflejados por Millán en sus planos *(Figura 4.a y b*).

4.2. Intervenciones recogidas en los archivos de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando

De la búsqueda realizada en los archivos digitalizados de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando con los términos “Puente” y “Alcántara” resultan 19 entradas, agrupadas en dos bloques de años. En el primero, que va desde fechas anteriores a la construcción del puente hasta 1868, se hace referencia a los informes previos a la construcción siendo la última fecha de este bloque la que hace referencia a informes económicos de las liquidaciones de la obra [55].

El otro bloque de fechas en que aparecen estos términos está entre los años 1896 y 1931. Aunque fuera del alcance de la investigación, se ha analizado su contenido, siendo documentos que se refieren a las comunicaciones para la declaración del puente como monumento nacional.

4.3. Relación del ingeniero y el hormigón armado

Millán terminó sus estudios de ingeniería de canales y puertos en 1846, comenzando a trabajar en las obras del Canal de Isabel II hasta 1856, año en que es destinado a la Jefatura de Obras Públicas en la provincia de Cáceres [56]. En las obras del Canal de Isabel II estuvo bajo la dirección de Lucio del Valle, quién contrató a Charles Clifford para fotografiar las obras del Canal de Isabel II [48].

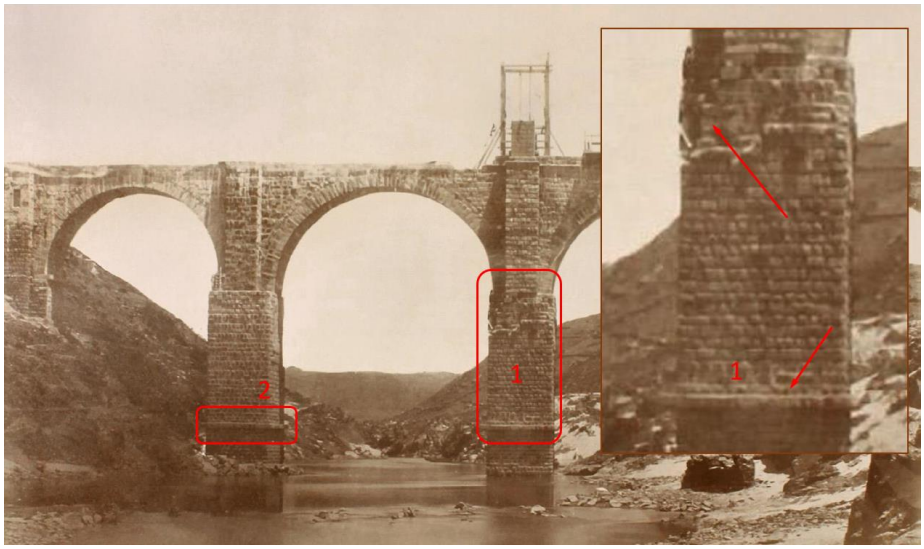


Figura 7. Fotografía de arcos 4 y 5 vistas desde aguas arriba realizada por Clifford [50] y enviada en 1858 por Millán a la Real Academia. En las zonas 1 y 2 se aprecia la reparación de las cornisas. Sin embargo, la cabeza de la pila 3 en la zona 1, está aún sin reparar

Nada más incorporarse a la Jefatura de Cáceres, Millán se hace cargo del proyecto de rehabilitación del puente de Alcántara, que se venía gestando desde 1831. A partir de marzo de 1858 pasa a ser Ingeniero Jefe de la provincia hasta 1879, cuando asciende a Inspector General de segunda clase y se traslada a Madrid. En calidad de Ingeniero Jefe ejecuta en Cáceres los Planes Generales de Carreteras de 1860, 1864 y 1877 [56].

4.4. Descripción del armado que aparece en el puente

Los elementos en los que se observa una mayor presencia de armadura y con una configuración de hormigón armado son las cornisas de las pilas 3 y 4 (*Figura 2.b, c y e* y *Figura 3.c* y *e*). El resto de las armaduras tienen una función de cosido de los sillares (Figura 2.a.1).

En la *Figura 11* se muestra la nomenclatura de los tipos de armadura que aparecen. El esquema general responde a un armado de un zuncho, con armadura longitudinal y armadura transversal. Así, la armadura está formada por cuatro barras longitudinales, las superiores exteriores e inferiores interiores (denominadas tipo 1) y la inferior exterior (tipo 2), de sección circular y sección cuadrada, respectivamente (*Figura 11.1* y *2*).

Las armaduras transversales están formadas por barras horizontales de sección circular (tipo 3), sensiblemente equiespaciadas, que unen las barras longitudinales y que continúan hasta la sillería de la pila, tanto en la parte superior como inferior (*Figura 11.3*). Estas barras son continuas desde la barra longitudinal más exterior hasta la sillería. Su conexión con las barras longitudinales se realiza mediante ojales en las barras transversales. Además de estas barras transversales horizontales hay barras inclinadas planas (tipo 4) (*Figura 11.4*), que nacen de la armadura longitudinal superior más exterior (tipo 1), a la que se unen mediante el doblado de su extremo, y que con una inclinación de aproximadamente 45º, se dirigen a la sillería de la pila pasando por encima de la armadura longitudinal inferior más interior (tipo 1). El número de barras de esta armadura tipo 4 es de aproximadamente dos por cada barra transversal tipo 3. El último tipo de barras transversales son verticales (tipo 5). Solo se observa una en esta zona, y une las armaduras longitudinales superior e inferior. Su sección es plana y la unión con la armadura longitudinal se realiza mediante doblado del extremo, en la parte superior hacia el interior y con la inferior hacia el exterior.

El armado de la cornisa de la pila 4 *(Figura 12*) no aparece tan completo como en la pila 3, pero se puede observar que sigue el mismo esquema que aquella con algunas diferencias que se indican a continuación. El número de barras tipo 5 es mayor y por tanto la separación entre ellas menor; las de tipo 4 son menos numerosas y por tanto más espaciadas y la armadura longitudinal inferior más exterior es de sección circular a diferencia de la anterior, que era de sección cuadrada.

En cuanto a las armaduras tipo 3 y 4 de la cornisa de la pila 4 se han deducido a partir de la información observada en la cornisa de la pila 3. Para ello se ha considerado que en la pila 3 las armaduras tipo 3 tienen ojal en el extremo para unirse con la armadura longitudinal, y que las superiores e inferiores coinciden en la misma vertical. A partir de ello, en la pila 4 se han marcado las armaduras superiores tipo 3, no visibles, a partir de las inferiores, visibles, y del tipo de conexión con las de tipo 1. Por otro lado, dado que en la cornisa de la pila 3 se ha comprobado que la conexión de las armaduras tipo 4 a la armadura longitudinal es doblando el extremo, a partir de este hecho se han marcado las armaduras tipo 4 en la pila 4, al no observarse su inclinación.

No se ha observado en ninguna de las zonas visibles de las armaduras de las cornisas si las armaduras transversales (tipo 3, 4 y 5) se conectan en la sillería, pero sí se observa que continúan a partir de la armadura longitudinal más interior (*Figura 11* y *Figura 12.b*). De no ser así, el único mecanismo para resistir la tracción generada por el peso del voladizo sería la resistencia a tracción del hormigón en el contacto con el sillar, que no lo habría soportado

durante los más de 150 años transcurridos. Además, hay diferentes zonas del puente donde se observa que las armaduras longitudinales se anclan en la sillería, por ejemplo, en la *Figura 2.a.1*.

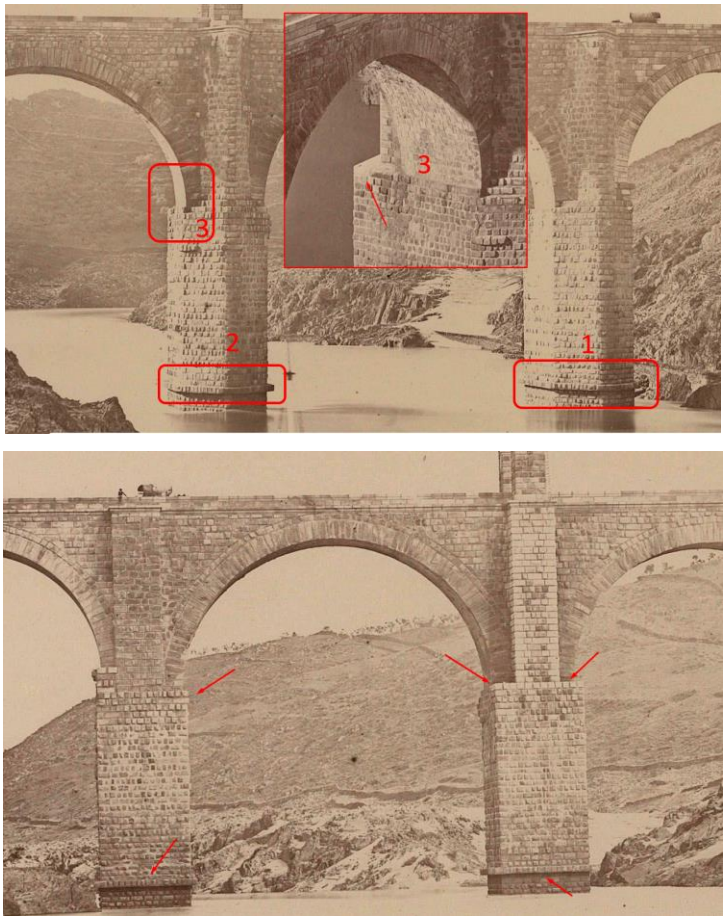


Figura 8. Fotografías realizadas por Clifford en 1859 de las obras terminadas [51]: a) alzado aguas arriba y b) alzado aguas abajo, donde se observan reparadas todas las zonas marcadas en los planos de Millán de 1856

5. Discusión

En el análisis comparativo entre las ortofotos del levantamiento de las intervenciones y el levantamiento realizado por Millán [42], se comprueba que las zonas donde se observan intervenciones con hormigón, así como aquellas con hormigón armado (*Figura 2* y *Figura 3*), son las mismas zonas que Millán reflejó en sus planos (*Figura 4*), observándose incluso las reconstrucciones de sillares. Por ejemplo, aguas abajo en las boquillas de los arcos 2, 3 y 4 y también en las zonas de las cornisas de pilas 3 y 4, donde aparecen armaduras vistas.

La precisión de los planos del levantamiento de Millán es tal que refleja el número exacto de sillares. Así, por ejemplo, de las dos zonas a rellenar que se muestran en ambos contrafuertes de la pila 3 (*Figura 5* y *Figura 6*), el relleno inferior está en ambos lados seis sillares por encima de la cabeza de la pila. De igual forma se observa esta precisión en el trazado de la fisura y el

rejuntado de los sillares *Figura 5*), existiendo actualmente algún desplazamiento entre los sillares de las fisuras respecto de lo reflejado por Millán.

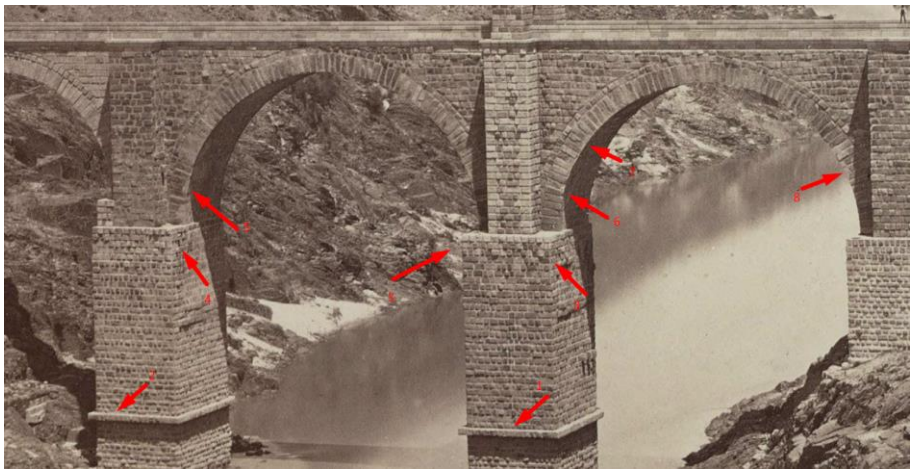


Figura 9. Fotografía realizada por Laurent [52] de las pilas 3 y 4 y los arcos 3, 4 y parcialmente el 5, desde aguas abajo.

En cuanto a las zonas de las cabezas de las pilas 2, 3 y 4, Millán refleja en sus láminas el escalonado original de los sillares, marcando con una línea tenue su reconstrucción, zona que aparece como reconstruido en el levantamiento realizado (zona 2 de las *Figura 5* y *Figura 6*). Este escalonado ya aparecía reflejado en láminas anteriores como las de Laborde [37] o en la maqueta realizada por José García Galiano en el 1772 [35].

Del análisis de los archivos históricos de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando de Madrid, órgano de control de las intervenciones en el patrimonio [17], no se documenta ninguna intervención posterior a la de Millán (1856 a 1860), siendo el último documento de esta obra de 1868, relativo a los informes finales de la obra [55]. Ello demuestra que la de Millán fue la única intervención hasta el año 1969 [43]. De haberse producido una reparación en años posteriores en las cornisas, zonas donde ha aparecido el hormigón armado, hubiera requerido de importantes medios auxiliares de acceso, pues esas pilas están rodeadas de agua al estar dentro del cauce natural del río Tajo. Esto hubiera obligado a la realización de un proyecto, y su ejecución al montaje de grúas en la calzada del puente, precisamente lo que refleja Millán en sus planos [42] y que recoge la fotografía tomada por Clifford durante la construcción en 1858 [50]. Además, dadas las responsabilidades de Millán como Ingeniero Jefe de la provincia hasta 1879 habría intervenido en ese posible proyecto. Pero aún más, como vicepresidente de la Comisión Provincial de Monumentos de Cáceres perteneciente a la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando (Marín Hernández, 2017), de haberse producido una intervención en el puente, Millán hubiera sido conocedor como Ingeniero Jefe, y a través de él la Comisión, cuestión que no está documentada en la Real Academia. Y, sin embargo,

Millán en su informe de 1859 sí hace referencia a “los delicados, difíciles y pe1igrosos trabajos” que han requerido las reparaciones, dada la altura de más de 40 m que tienen las pilas del puente [13].

En diferentes reparaciones del puente se observa cómo Millán trata de simular el almohadillado de los sillares, por ejemplo, *Figura 4.a* y *b* o en la zona 1 de la reparación de uno de los huecos del tajamar de la pila 3 (*Figura 6*). Este hecho ya lo indicó Peró en su informe de la visita de 1858 [13]. Precisamente, debido a esta simulación, la distancia a la que se tiene que observar el puente en algunas zonas y el verdín originado por el paso del tiempo, las zonas reparadas han pasado desapercibidas. Aun cuando el paso del tiempo ha originado problemas de corrosión de las armaduras y estas han aparecido, no han sido observadas, como es el caso de las fotografías realizadas por Calleja y la Sociedad Hidroeléctrica Española [57] de la reparación de las cimentaciones de pilas 3 y 4 de 1969 [43]. Sí observa las armaduras Durán [20], pero las califica como mala práctica de reparación sin entrar en su datación. También aparecen armaduras en la cornisa de las imágenes de la pila del puente investigada por Pizzo, pero no se mencionan [41]. Por otro lado, Moreno Gallo sí las detecta, pero las data en la misma fecha que la intervención realizada en la cimentación en 1969 [21]. Como se muestra en la *Figura 10.a*, en esas fechas las armaduras ya estaban vistas, y prácticamente con la misma distribución actual (*Figura 10.b* y *c*) por lo que para sufrir esta pérdida de recubrimiento deben haber pasado muchos años, incompatible con la hipótesis de haber sido ejecutadas en el año 1969.

A la vista de los resultados anteriores, no es erróneo pensar que la ejecución del hormigón armado fue realizada por Millán durante los trabajos de reconstrucción del arco 5, entre 1856 y 1859. En concreto la fecha más probable de la realización del hormigón armado es de 1857, pues según la lámina realizada por Millán con el desglose de la ejecución del presupuesto y analizada por Rodríguez Pulgar [39], el mayor presupuesto de cemento se ejecutó en ese año. También hay una medida de hierro, pero no se diferencia el hierro empleado en herramientas de construcción del hierro que podría haberse utilizado en el armado. Además, la fotografía realizada por Clifford en 1858 ya muestra el acabado de las cornisas [50].

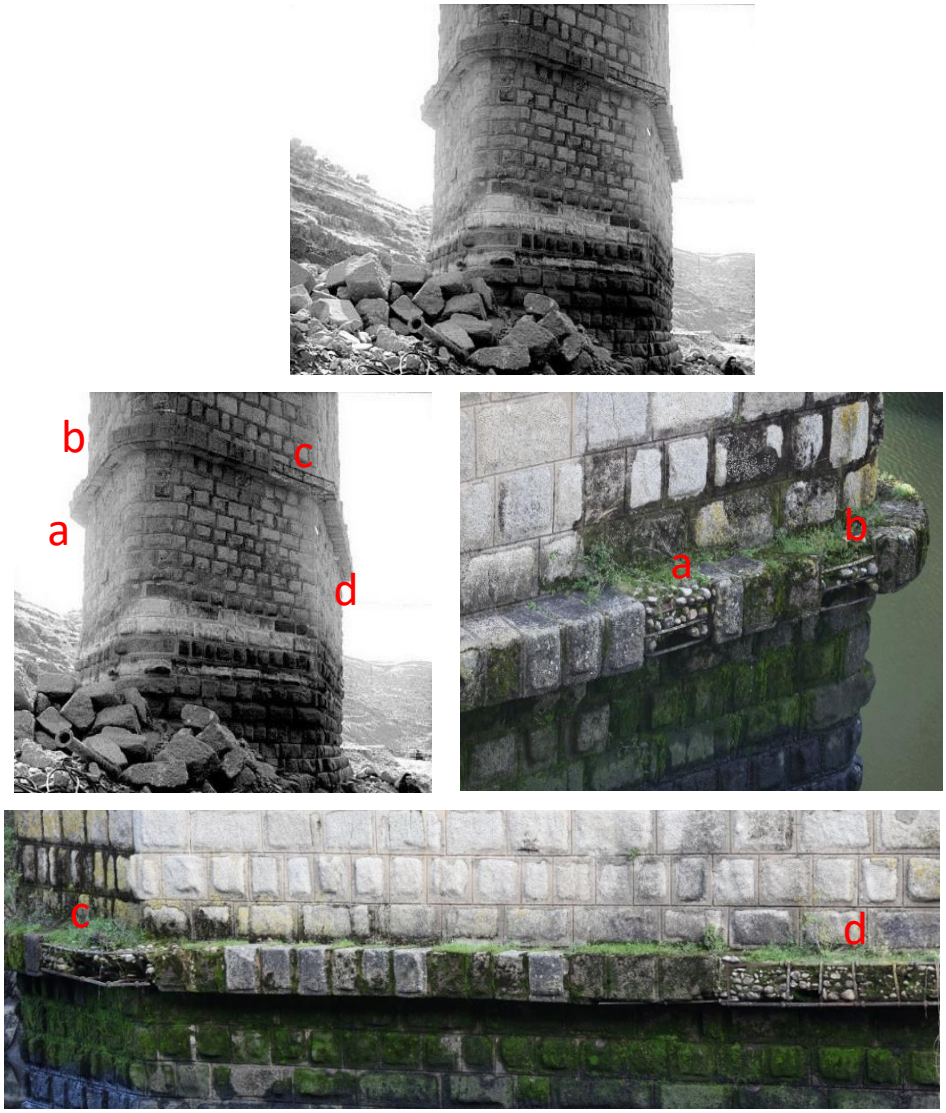


Figura 10. La imagen superior izquierda es la fotografía de la pila 3 realizada por Calleja [57] en 1969 marcando las zonas donde ya entonces había presencia de armaduras. En la superior derecha es una fotografía actual del alzado izquierdo del fuste de la pila. La imagen inferior es una fotografía de 2017 del alzado derecho del fuste de la pila

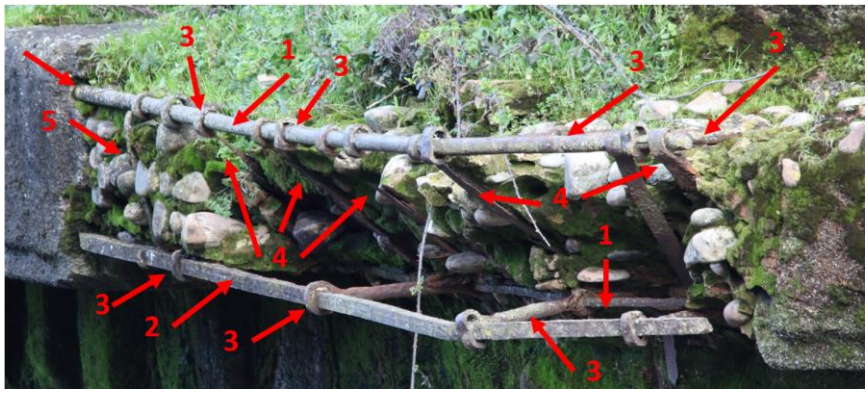
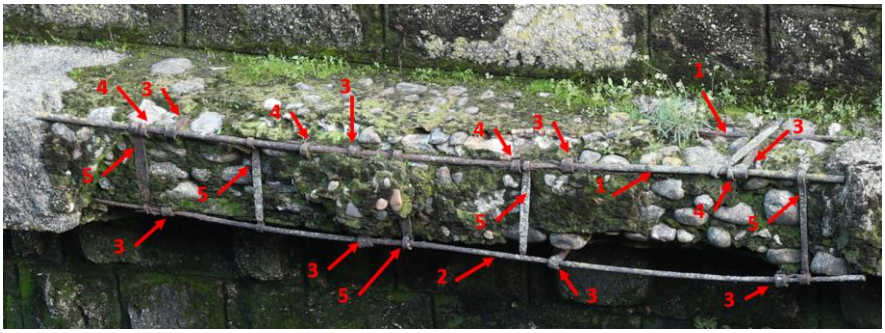
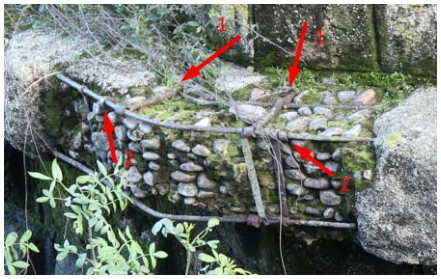


Figura 11. Descripción de armaduras de las cornisas de la pila 3, con la denominación de cada tipo de armadura.

Millán obtiene el conocimiento y experiencia sobre el hormigón durante su trabajo en la obra del Canal de Isabel II, en la que se empleó con profusión este material [31]. De esa época también es el conocimiento de Clifford por parte de Millán [48], hecho que dio lugar a que fuera contratado para fotografiar el puente durante las obras y una vez terminadas las intervenciones. Por otro lado, Millán, como ingeniero de caminos y canales, estaba al día de todos los avances de la técnica de la ingeniería a través de la Revista de Obras Públicas. Esto le habría permitido conocer su empleo en la reparación de los pilotes del puente en el Urumea [26], las visitas a la fábrica de Coignet [27] o el sistema de fabricación de "piedras artificiales", y en especial las cualidades de moldeado del sistema Coignet que indicó Saez y Montoya [28]. Esta facilidad de moldeado es aplicada por Millán para simular el almohadillado de los sillares y, sobre todo, para poder ejecutar las cornisas, que son elementos volados.



a)



b)

Figura 12. Descripción de armaduras de las cornisas de la pila 4 con denominación de cada tipo de armadura en trabajo recto a) y en la zona de quiebro b).

Dada la evolución del cemento en España [5], el hormigón empleado tendría como aglomerante el cemento natural, pues el artificial no se empleó de forma industrial hasta finales del siglo XIX [6,23], en contra de lo recogido por Rodríguez Pulgar que indica que sería Portland [15]. En concreto, el origen del cemento sería de Vizcaya o Zumaya, ambas en la única provincia, de las dos productoras de España, que exportaba a nivel nacional e internacional [22], siendo la fábrica de Zumaya de 1852 [8], unos años antes del inicio de las obras de reparación del puente. Esto viene corroborado por la información de la Revista de Obras Públicas, que indica que se está empleando cemento de Vizcaya para reparar sillares [44], sin mencionar el empleo de armaduras en estas reparaciones.

La intervención en el puente terminó en el año 1859, tres años antes de la realización en hormigón de los puentes de Soria de Bellsolá [29]. Bellsolá indica lo habitual que era en esas fechas ya el conocimiento de hormigón, que no tanto su empleo, pues no se volvió a emplear hasta diez años después en la reparación del puente de Luchana, por la no validez de los materiales tradicionales [8], la misma razón que llevó a Millán a emplearlo veinte años antes.

En lo que se refiere al hormigón armado, la única referencia de la primera aplicación en España es en un texto del ingeniero militar Rodríguez de Quijano 1868, sin indicar cuándo y dónde se aplicó [8], nueve años más tarde de la aplicación de Millán en Alcántara.

La solución de hormigón armado que emplea Millán muestra una compresión del nuevo material adelantada a su tiempo. Así, por ejemplo, la patente de Lambot de 1855 recoge una capa de barras entrecruzadas [33], pero no define la conexión entre diferentes niveles, como sí hace Millán al plantear un sistema de barras longitudinales y transversales en dos niveles, unidas por barras verticales, lo que configura un armado muy similar a los actuales de un zuncho o una viga (*Figura 11* y *Figura 12*). Los conceptos de Millán sí están más próximos a la patente de Wilkinson de 1854, en la que se disponen las barras en las zonas donde hay tracciones [34]. Además, para conectar la cornisa con la pila Millán dispone barras transversales superiores tipo 3 que fijan el voladizo y llegan hasta la armadura longitudinal más exterior de la que salen las barras inclinadas tipo 4 (*Figura 11* y *Figura 12*) concebidas como puntales para recoger la compresión de la biela generada por el momento del voladizo.

En cuanto a la sección de las armaduras, combina, sin un criterio aparente, barras de sección circular con otras de sección cuadrada y plana, predominando las circulares para las horizontales y las planas para las verticales e inclinadas. Este tipo de secciones son las que Monier, seis años después, recogerá en sus patentes [8]. En estas patentes de vigas sí aparece ya la idea de viga con armaduras longitudinales y transversales, pero han pasado siete años desde que Millán lo aplicó, y más de veinte para que el hormigón armado se empleara de forma masiva en España a través de la llegada de la patente de Monier por Maciá i Llussá [7].

La aplicación del hormigón armado que realiza Millán supone un avance muy importante sobre el nacimiento del hormigón armado en España y a nivel internacional, y cuál era la compresión de este nuevo material. En el caso de España es el primer ejemplo de aplicación de este nuevo material, además en una obra de rehabilitación, adelantándose en diez años a los primeros escritos sobre la aplicación del hormigón armado en España [8]. Además, la obra en la que se ha aplicado es de rehabilitación, siendo la primera documentada, veinte años antes de la primera aplicación de rehabilitación documentada en puentes, la intervención en el puente de Luchana, donde se empleó hormigón, pero no hormigón armado [8].

En cuanto al efecto de la reparación sobre el comportamiento estructural, cabe señalar que, al estar localizada en las cornisas, no afectó a la seguridad global del puente estructural [10], siendo los únicos efectos locales debidos a la conexión de la armadura con los sillares (*Figura 11*). El hormigón armado detectado presenta daños importantes, no siendo posible determinar los daños debidos a la durabilidad del hormigón y aquellos causados por la acción de la erosión del agua durante las inundaciones [10].

Dado el valor patrimonial del puente, la limitación de este estudio es el acceso y la toma de muestras para analizar el estado del hormigón armado y la evolución de sus características de resistencia y durabilidad en el tiempo. Esta investigación dotará a la intervención de hormigón armado de valor patrimonial, facilitando futuras investigaciones sobre los materiales y su durabilidad, no sólo en las zonas donde es visible, sino también en aquellas zonas donde, debido a la mimetización del hormigón con los sillares realizados por Millán [58], no es fácil detectarlo a simple vista.

6. Conclusiones

El puente de Alcántara es uno de los puentes romanos más importantes a nivel mundial por sus dimensiones y estado de conservación. Desde su construcción hace casi dos mil años ha sufrido daños debido al paso del tiempo y la acción humana, por lo que ha necesitado de rehabilitaciones. Durante una inspección del puente se observaron zonas con hormigón armado, que por su tipología hizo pensar que se trataba de una intervención muy antigua. Para datar esta intervención se ha realizado un análisis comparativo entre la situación actual, los planos de levantamiento que realizó Millán para la reparación del arco derrumbado, las láminas de diferentes épocas y fotografías de diferentes fechas. Además, se ha investigado en los archivos de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando sobre otras posibles obras de rehabilitación en el puente en el siglo XIX.

Tras esta investigación se puede concluir que las zonas con presencia del hormigón armado que presenta el puente se ejecutaron durante las obras de rehabilitación realizada por el ingeniero Millán (1856-1860). En concreto, la aplicación del hormigón armado se realizaría a lo largo del año 1857.

La aplicación del hormigón armado que realiza Millán supone un avance muy importante en el conocimiento del nacimiento del hormigón armado en España y a nivel internacional. En el caso de España es el primer ejemplo de aplicación de este nuevo material, además en una obra de rehabilitación, adelantándose en diez años a los primeros escritos sobre su aplicación en España. Además, tiene la particularidad de emplearse en la rehabilitación de un puente,

adelantándose veinte años a la que se realizaría en el puente de Luchana, primera aplicación documentada hasta ahora, en la que además solo se empleó hormigón.

A nivel internacional supone un hallazgo fundamental de cómo se fue concibiendo el hormigón armado, puesto que, aunque existían patentes desde el año 1854 aplicando conceptos resistentes del nuevo material, la concepción planteada por Millán se adelanta en diez años a la de Monier para vigas, que fue la que tuvo mayor desarrollo en Europa y la primera que se empleó en España, pero ya en la década de 1880.

Esto muestra a Millán como el precursor del hormigón armado en España y pionero a nivel mundial en el empleo de este nuevo material.

7. Agradecimientos

Esta publicación ha sido posible gracias a la financiación concedida por la Consejería de Economía, Ciencia y Agenda Digital de la Junta de Extremadura y por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional de la Unión Europea a través de la subvención de referencia GR23159.

8. Referencias

[1] P. Christophe, Le béton armé et ses applications, Béranges, Paris, 1902. http://hdl.handle.net/1908/4445.

[2] M.J. Varas, M. Álvarez De Buergo, R. Fort, Piedras artificiales : morteros y hormigones . El cemento como máximo representante de estos materiales de construcción, Ciencia, Tecnología y Sociedad : Para Una Conservación Sostenible Del Patrimonio Pétreo. (2007) 179–189. http://digital.csic.es/bitstream/10261/8631/1/Varas_MªJose,capítulo de libro CTS.pdf (accessed December 12, 2018).

[3] J. Rosell, J. Cárcamo, Los orígenes del hormigón armado y su introducción en Bizkaia. La fábrica Ceres de Bilbao, Colegio Of, 1994.

[4] J.L. Vicat, Les Chaux de construction, les betons et les mortiers ordinaires, 1818. https://books.google.de/books?id=DQiLAAAAIAAJ&printsec=frontcover&dq=Recherches+expérimentales+sur+les+chaux+de+construction,+les+bétons+et+les+mortiers+ordinaires&hl=de&ei=hI2xTO3bOIvQjAft46zqBg&sa=X&oi=book_result&ct=result&resnum=2&ved=0CC8Q6 (accessed January 7, 2019).

[5] M.J. Varas, M. Álvarez De Buergo, R. Fort, The origin and development of natural cements: The Spanish experience, Constr Build Mater. 21 (2007) 436–445. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.07.011.

[6] S. Camps, Los pioneros del hormigón estructural: de Europa a Cataluña, Universidad Politécnica de Cataluña, 2009.

[7] F.J. Domouso, La introducción del hormigón armado en España: razón constructiva de su evolución 11, Universidad Politécnica de Madrid Escuela Técnica Superior de Arquitectura, 2015.

[8] A. Burgos, Los orígenes del hormigón armado en España, 2009. https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=65580 (accessed December 12, 2018).

[9] M. Durán, C. Nárdiz, La construcción de puentes en la antigua Gallaecia Romana, Universidade de A Coruña, 2001. https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=20492&orden=244980&info=link%0Ahttps://dialnet.unirioja.es/servlet/exttes?codigo=20492.

[10] J.P. Cortés-Pérez, A. Rueda, P. Cruz, Veinte siglos de patrimonio de Extremadura en ocho puentes, Junta de Extremadura. (2018) 216.

[11] J. Liz-Guiral, El puente de Alcántara: arqueología e historia, 1988.

[12] J.R. Mélida, El puente de Alcántara, Boletín de la Sociedad Española de Excursiones, 1924.

[13] A. Blanco Freijeiro, D. Angulo Iñiguez, El puente de Alcántara en su contexto histórico: discurso de ingreso leído en sesión solemne celebrada el 23 de enero de 1977, Real Academia de la Historia, 1977. https://books.google.es/books?id=f15zvwHi6C4C&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (accessed May 22, 2018).

[14] J. Liz Guiral, El puente de Alcántara: Arqueología e Historia, Fundación San Benito de Alcántara, 1988. https://scholar.google.es/scholar?hl=es&as_sdt=0%2C5&q=Liz+Guiral%2C+J.+El+puente+de+Alcántara%3A+Arqueología+e+historia.+&btnG= (accessed October 18, 2017).

[15] M. del C. Rodriguez, El puente romano de Alcántara: reconstrucción en el siglo XIX, 1ª ed., Diputación Provincial, Institución Cultural "El Brocense," Cáceres, 1992.

[16] M. Cruz, Dificultades en la construcción del Puente de Alcántara . Condicionamientos y problemas técnicos, Rev Estud Extremenos. LXXIII (2017) 2939–2976.

[17] D. Crespo, M. Grau, Restaurar una obra pública en la época de la Ilustración : el puente de Alcántara, in: Congreso Nacional de Historia de La Construcción, CEHOPU, 2007: pp. 243–252. http://www.academia.edu/21512639/Restaurar_una_obra_pública_en_la_época_de_la_Ilustración_el_puente_de_Alcántara (accessed October 26, 2017).

[18] P. Chias, T. Abad, El arte de describir el territorio: mapas y planos históricos en torno al puente de Alcántara (Cáceres, España), Informes de La Construcción. 64 (2012) 121–134. https://doi.org/10.3989/ic.11.071.

[19] J.P. Cortés-Pérez, J.J. de Sanjosé, A.D.J. Atkinson, L.M. del Río, Assessment of the structural integrity of the roman bridge of Alcántara (Spain) using TLS and GPR, Remote Sens (Basel). 10 (2018). https://doi.org/10.3390/rs10030387.

[20] M. Durán, Algunas cuestiones teóricas y prácticas sobre la reparación de los puentes de fábrica, I Congreso Internacional de Carreteras, Cultura y Territorio. (2010). http://www.traianvs.net/pdfs/2010_duran.pdf.

[21] I. Moreno, Ingeniería Romana: PUENTES ROMANOS DE EXTREMADURA. Entre la restauración y el desastre, (2016). http://traianvsnet.blogspot.com.es/2016/09/puentes-romanos-entre-la-restauracion-y-el-desastre_21.html (accessed October 27, 2017).

[22] C. Mayo, El cemento natural en el Madrid de los siglos XIX y XX. Identificación de sus aplicaciones, estado de conservación y compatibilidad con los cementos actuales., Universidad Politécnica De Madrid, 2015.

[23] P. Riart, L.F. Mazadiego, Las canteras históricas de Morata de Tajuña y la cementera Portland-val derribas, 1898 (2000) 109–115.

[24] L. Scheidnagel, Noticias sobre materiales de construcción en la parte relativa a cales y morteros, como también de algunos proyectos interesantes para la fabricación de piedras artificiales, estucos, pinturas, etc., Memorial de Ingenieros Del Ejército. (1858).

[25] F. Coignet, Emploi du béton hydraulique son appliction aux cconstructions, 22994, 1855.

[26] Revista de Obras Públicas, Nota sobre la aplicación del cemento para conservación de la madera debajo del agua de mar, Revista de Obras Públicas. I (1853) 68.

[27] Revista de Obras Públicas, Sociedades científicas. Sociedad de ingenieros civiles de Francia, sesión de 1º de febrero de 1856, Revista de Obras Públicas. 9 (1856) 109–110.

[28] C. Saez y Montoya, Informe, Revista de Obras Públicas. VI (1858) 269–271.

[29] R. Bellsolá, Memoria á relativa a los arcos de hormigón hidráulico construidos en la carretera de primer órden de Soria á Logroño. Consideraciones que han motivado al empelo del hormigón en los arcos., Revista de Obras Públicas. XV (1867) 13–17.

[30] A.B. Correa, Madrid and channel of Isabel II, Arbor. 171 (2002) 39–74. https://doi.org/10.3989/arbor.2002.i673.1021.

[31] Canal de Isabel II, Memoria sobre el estado de las obras y la situación económica de la empresa en diciembre 1853, publicada por acuerdo del consejo de administración, 1854.

[32] P. Dorveaux, Lambot-Miraval, Monier et le Ciment armé, Revue Horticole. 17–18 (1919).

[33] J.-F. Denoël, B. Espion, A. Hellebois, M. Provost, Histoires de béton armmé. Patrimoine, durabilité et inovations, 2013.

[34] Fco.J. Domouso, Las primeras patentes de hormigón armado. Algunas patentes españolas., Recopar. (2007) 23–47.

[35] P. Navascués Palacio, M. del C. Utande Ramiro, Modelo del puente de Alcántara en el siglo XVIII (Cáceres). Archivo Histórico Nacional, Madrid., in: Maquetas y Modelos Históricos. Ingeniería y Construcción, F. Juanelo Turriano, Fundación Juanelo Turriano, Madrid, 2017: pp. 110–115. https://www.juaneloturriano.com/exposiciones/exposicion/2017/05/29/maquetas-y-modelos-historicos.-ingenieria-y-construccion (accessed January 5, 2023).

[36] F. Rodríguez, Lámina LXVI. Puente de Alcantara, Real Academia de Bellas Artes de San Fernando. (1797).

[37] A. de Laborde, Voyage pittoresque et historique de l'Espagne (1806-1820), Pierre Didot l'ainé, Paris, 1811.

[38] M. Cruz, El puente de Alcántara en los siglos XVII y XVIII: noticias sobre su estado y planteamiento de restauración, NORBA-ARTE. 22–23 (2003) 89–99. http://hdl.handle.net/10662/5860 (accessed October 18, 2017).

[39] M. et al Rodriguez, El puente romano de Alcántara: reconstrucción en el siglo xIx, Institución Cultural El Brocense., Cáceres, 1992.

[40] D. Crespo Delgado, Preservar los puentes : historia de la conservación patrimonial de la ingeniería civil en España (Siglo XVI-1936) /, Fundación Juanelo Turriano, 2017.

[41] A. Pizzo, El puente romano de Alcántara: nueva documentación arqueológica y evidencias constructivas previas, Arqueología de La Arquitectura. 13 (2017) 2–22. https://doi.org/10.3989/arq.arqt.2016.023.

[42] A. Millán, Láminas de los planos del proyecto de rehabilitación del puente de Alcántara de Alejandro Millá, Fundación Iberdrola España. (1856).

[43] C. Fernández Casado, Historia del Puente en España, Informes de La Construcción. 32 (1980) 57–100. https://doi.org/10.3989/ic.1980.v32.i317.2372.

[44] Revista de Obras Públicas, Obras de intervención en Puente de Alcántara, Revista de Obras Pública. (1858) 12–12.

[45] V.M. García-Lozano, Guerra Civil española . Destrucción y reconstrucción de puentes, Universidad de La Coruña, 2015.

[46] V. Martí, Puente de Alcántara, 1858.

[47] Gaceta de Madrid, Ley de Carreteras 1851/05/07, 1851.

[48] F. Sáenz Ridruejo, Biografía y semblanza del ingeniero de caminos Lucio del Valle, in: Lucio Del Valle (1815-1874): Ingeniería y Fotografía, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2015: pp. 15–35. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5504251 (accessed January 20, 2022).

[49] F. Sáenz-Ridruejo, Ingeniería de caminos y canales, también de puertos y faros, in: M. Silva Suárez (Ed.), El Ochocientos, Profesiones e Instituciones Civiles, Real Academia, Real Academia de Ingeniería, Institución «Fernando el Católico», 2007: pp. 127–184. http://ifc.dpz.es (accessed August 31, 2022).

[50] C. Clifford, Fotografía del puente romano de Alcántara remitida por el ingeniero Alejandro Millán, (1858). https://www.cervantesvirtual.com/nd/ark:/59851/bmcf4956.

[51] C. Clifford, Fotografías del puente de Alcántara, Biblioteca Nacional de España. Biblioteca Digital Hispánica. (1859). http://bdh-rd.bne.es/viewer.vm?id=0000027213 (accessed January 10, 2023).

[52] J. Laurent, Fotografía del puente de Alcántara, Biblioteca Nacional de España. Biblioteca Digital Hispánica. (1870). http://bdh-rd.bne.es/viewer.vm?id=0000017078 (accessed January 10, 2023).

[53] IPCE Ministerio de Cultura y Deporte, Fotografía puente de Alcántara (Cáceres), Archivo Ruiz Vernacci . VN-41041 (1925). http://catalogos.mecd.es/IPCE/cgi-ipce/ipcefototeca/O13170/ID04576478/NT14 (accessed January 13, 2023).

[54] J. Blázquez Marcos, Por la vieja Extremadura. Guía artística de la provincia de Cáceres, Tipogra. Extremadura, 1929. https://issuu.com/bibliotecavirtualextremena/docs/viejaextremadura1_ee8f7c4bbd60fa (accessed January 10, 2023).

[55] F. Díaz, La reinauguración del Puente de Alcántara en 1860 y la participación de la Real Academia de la Historia, in: C. I. T. Centro de Iniciativas Turísticas Trujillo (Ed.), XXXV Coloquios Históricos de Extremadura. Dedicado a La Memoria Del Obispo D. Gutierre de Vargas Carvajal, 2006: pp. 215–232. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2532648 (accessed June 7, 2022).

[56] C. Marín, Hacer arqueología en la Extremadura contemporánea. La comisión provincial de monumentos históricos y artísticos de Cáceres (1844-1982), Universidad de Extremadura, 2017.

[57] Fototeca - Instituto del Patrimonio Cultural de España, Fotografías tomadas por Calleja del puente de Alcántara, (1969). https://ipce.mecd.gob.es/documentacion/fototeca.html (accessed September 26, 2018)

[58] A. Blanco-Freijeiro, El puente de Alcántara en su contexto histórico, 1st ed., 1977.