

Ricardo Bellsolá y los primeros puentes de hormigón en España

Ricardo Bellsola and the first concrete bridges in Spain

Luis Javier Sanz Balduz. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Titular de Estructuras. EUPLA. Universidad de Zaragoza
Director Técnico. Imagina, SLP. Huesca (España). lj sanz@unizar.es

Resumen: El siguiente artículo tiene como objetivo dar a conocer sucintamente la figura de Ricardo Bellsolá y Bayo, el ingeniero que construyó las primeras bóvedas monolíticas “modernas” de hormigón en España, enmarcada en el contexto histórico en el que transcurrió su vida. Se desarrolla tanto su biografía como las obras más relevantes de su carrera profesional. El texto se completa con la descripción de la situación de la teoría de estructuras y la práctica tecnológica en el siglo XIX. Se pretende con ello reflejar el mérito de un técnico que contribuyó al avance de su profesión y de toda la sociedad sin que por ello haya sido específicamente recordado.

Palabras Clave: Bellsolá; Puente; Hormigón; Cemento; Bóveda

Abstract: The present article provides a brief account of Ricardo Bellsolá y Bayo, the engineer who built the first concrete monolithic vaults in Spain, and set within the historical context of his day. The article gives an account of his life and describes the most relevant works of his professional career. The text is completed with a description of the state of the theory of structures and technological practice in the 19th century. Our aim is to reflect the merits of an engineer who contributed to the development of his own profession and society as a whole, but one who has not gained sufficient recognition for his work.

Keywords: Bellsolá; Bridge; Concrete; Cement; Vault

0. Prólogo

El presente artículo está basado en sendos trabajos de investigación de dos alumnos de Ingeniería Técnica de Obras Públicas de la Escuela Universitaria Politécnica de La Almunia de Doña Godina (Universidad de Zaragoza), Juan Donaire Merino y Rosa Villuendas Martín.

1. Introducción

En ingeniería de puentes se tiende a pensar con cierta ligereza que en la antigüedad se construía lo que buenamente se podía mientras en la actualidad, con los medios técnicos disponibles, se ejecuta la totalidad de lo que se imagina. Sin negar taxativamente

dicho aserto resulta interesante analizar casos particulares que acaecen en los momentos de cambio, en los momentos de variación de tendencias, en los momentos límite –parafraseando a Eugenio Trías-. Parece que hablar hoy de hormigón se reduce a comprender qué es el material y cómo se desarrolla su cálculo, pero no se debe olvidar que sólo han transcurrido poco más de cien años desde que se inició el estudio sistemático para responder a ambas cuestiones. En concreto, en España, la cátedra de hormigón de la Escuela de Caminos inició su andadura hace un siglo. Hasta ese año de 1910 se realizaron importantes avances en la tecnología de la construcción del hormigón. Lo que tradicionalmente había servido sólo como relleno interno rígido o semirrígido de las obras de sillería, mampostería o ladrillo –el *opus caementicium* romano– fue adquiriendo una categoría específica para, fi-



Fig. 1. Puente de Lavalé sobre el río Iregua. Ingeniero: Ricardo Bellsolá y Bayo (Fotografía: Juan Donaire Merino).

nalmente, protagonizar el desarrollo de las obras públicas durante todo el siglo XX.

La figura de Ricardo Bellsolá se enmarca en la actividad de esos primeros intentos de prever y anticipar las posibilidades de un material que, aunque no se comprendiera perfectamente, parecía probar su capacidad para mejorar las técnicas constructivas desarrolladas hasta entonces. Para valorar en su justa medida la experiencia personal de Bellsolá se ha pretendido contextualizar su trabajo mediante una somera descripción de la situación social y tecnológica del momento. Precisamente en esa línea parecía importante situar la figura del protagonista, como personaje eminentemente técnico, en dos ámbitos básicos, el primero relacionado con los métodos de análisis de estructuras y el segundo ligado a la situación de los materiales disponibles en España en esa época.

Resulta tremendamente ilustrativo poder seguir el proceso lógico de Bellsolá para poder afrontar el reto de analizar y dimensionar una bóveda que, como advirtió correctamente, no se ajustaba a la naturaleza de lo que se había ejecutado hasta el momento. Más allá de que algunas hipótesis o conjeturas no fueran correctas la experiencia concreta de Bellsolá, además del valor puramente histórico, muestra un ejemplo de planteamiento honesto y sincero que el ingeniero murciano –riojano de adopción– no tuvo inconveniente alguno en compartir con sus compañeros de profesión para que éstos se beneficiaran de su iniciática experiencia.

2. Contexto histórico

A mediados de la tercera década del siglo XIX, y a la sombra de una inusitada actividad socioeconómica al otro lado de la cordillera pirenaica, una España rezagada comenzaba a despertar tímidamente a golpe de interminables luchas internas. En esta época, concretamente el 27 de diciembre de 1836, nacía en Murcia Ricardo Bellsolá y Bayo, primer ingeniero español que utilizó el hormigón como material estructural resistente y visto (excluyendo los elementos de cimentación) en la ejecución de diferentes proyectos de puentes (1).

El viejo continente se encontraba en aquellos años en el punto álgido de la llamada primera Revolución Industrial, inmerso en la gran reestructuración económica y social que había comenzado en la Inglaterra del siglo anterior. Durante las décadas posteriores se produjo una revolución tecnológica sin precedentes que propició el paso de una economía fundamentalmente agraria y artesanal a otro modelo dominado por la industria y la mecanización. Todo ello transformó profundamente los sistemas de trabajo y las diferentes estructuras sociales provocando, como consecuencia inmediata, la instauración de un nuevo orden socioeconómico en Centroeuropa que se exportó centrífugamente con resultados dispares.

Una de las causas principales (entre otras) de esta catarsis social fue la aplicación de una invención extraordinaria, la máquina de vapor, bosquejada por el inglés Thomas Newcomen en 1712 y perfeccionada por el escocés James Watt en 1784 –fecha de la inscripción de la patente–. Este novedoso artificio permitió transformar la energía calorífica en

(1) La primera referencia de los logros de Bellsolá proviene de los artículos que escribió en la Revista de Obras Públicas en 1862 (1) y 1867 (2). A partir de ese momento libros posteriores recogerán tales experiencias refiriéndose a ellas como el origen de la utilización del hormigón estructural en puentes. José Vacchelli incluye en la segunda edición española del libro *CONSTRUCCIONES DE HORMIGÓN Y DE CEMENTO ARMADO* (3) esta circunstancia transcrita, casi literalmente, a partir de los mencionados artículos. Igualmente José Eugenio Ribera, el gran protagonista de la universalización del hormigón armado en España a comienzos del siglo XX, indicaba en el tomo III de su libro *Puentes de fábrica y hormigón armado* (4), escrito en 1925, que “desde hace sesenta años, los Ingenieros españoles empezaron a construir bóvedas de hormigón en masa para sustituir a las de sillería, ya entonces costosas, y en bóvedas oblicuas, para evitar los despieces complicados de las piedras”. Ribera incluye los nombres de esos dos puentes en concreto, Lavalé e Iregua (Lumbreras), pero omite el nombre de Bellsolá.

energía mecánica y su posterior uso generalizado motivó inmensos avances tecnológicos. Se utilizó profusamente en el desarrollo de la mecanización de la incipiente industria y protagonizó dos aplicaciones directas de gran importancia en los medios de transporte: el barco de vapor y el ferrocarril. En concreto éste último se configuró como un elemento clave en el desarrollo económico posterior.

Mientras tanto en España la situación resultaba muy diferente; ya olvidada la exaltación patriótica desatada tras la Guerra de la Independencia y en plena depresión colonial, el país se encontraba hastiado tras las múltiples revueltas internas acaecidas. En 1843 –recién terminada la primera guerra carlista– la escasa densidad de población y la casi inexistente red de infraestructuras de comunicación y transporte impedían que se desarrollaran mecanismos productivos mínimamente basados en la industria, a semejanza de la situación existente en el resto de países europeos. Algunos planteamientos políticos definidos en esa época, como la división provincial de 1833 –siguiendo parcialmente el esquema de prefecturas de José Bonaparte y más fielmente la división de las Cortes de Cádiz–, se encaminaban básicamente a vertebrar el territorio intentando definir un nuevo concepto de mercado económico interno.

A pesar de que los historiadores se refieren habitualmente a este periodo como *políticamente nefasto* es justo cuando aparecen los primeros tímidos indicios de modernización. Para suplir la falta de capital interno, agotado con las recientes experiencias militares, se acudió a la búsqueda de inversión procedente del exterior que desempeñó un papel fundamental puesto que, además de los réditos directamente económicos, provocó la implantación de los adelantos técnicos ya extendidos por Europa. El ejemplo más evidente resultó el desarrollo del ferrocarril que inició la integración real del mercado español, hasta el punto de que puede decirse que “con él nació la España contemporánea” en palabras del historiador Fernando García de Cortázar.

3. Análisis y construcción de puentes de fábrica en el siglo XIX

A mediados del siglo XIX los puentes de fábrica se calculaban siguiendo básicamente dos enfoques:

- Planteamiento cinemático: Identificación del mecanismo de colapso a evitar según los planteamientos de Philippe de La Hire (1712) o de Pierre Couplet (1730), por citar algunos⁽²⁾. Mención especial merece el trabajo del ingeniero español Joaquín Monasterio *Nueva teoría sobre el empuje de bóvedas* (alrededor de 1800) que ampliaba los supuestos previstos hasta entonces⁽⁵⁾.
- Planteamiento geométrico: Determinación de la localización de la línea de empuje real mediante diversos métodos entre los que destacan la teoría general de rotación de dovelas (1773) de Charles Augustin de Coulomb o aproximaciones más concretas como las de Gerstner, E. Méry o H. Moseley⁽³⁾.

El problema del cálculo de las bóvedas de geometría definida se reducía fundamentalmente al cálculo del espesor mínimo necesario de los sillares de bóveda y a la comprobación de la estabilidad de los estribos. En la España de mediados del siglo XIX era habitual seguir la fórmula que había introducido específicamente para puentes Jean Rodolphe Perronet para el primero de los casos, y en el segundo se utilizaban diversos planteamientos asegurando que se cumplían igualmente los valores previstos por La Hire. (6)

En ninguna de estas aproximaciones se introducía el comportamiento real del material que conformaba la bóveda en el modelo estructural analítico. Esta cuestión fue introducida paulatinamente mediante la aplicación de la teoría elástica establecida por Navier. En 1826 el ingeniero francés Claude Henri Navier había publicado su *Résumé des Leçons*, estructurando los trabajos previos de Bernoulli, Euler y Hooke, y sentando las bases de la primera teoría coherente de análisis estructural desde una perspectiva científica (7). Navier introdujo el análisis tensional en la teoría de los arcos y bóvedas de fábrica y desarrolló la teoría de arco elástico (empleada básicamente a posteriori con arcos de madera y hierro). De todas maneras no

(2) Bernard Forest de Bélidor simplificó la teoría de La Hire y consiguió generalizar la aplicación práctica del problema del análisis y dimensionamiento de bóvedas de fábrica.

(3) La influencia de estas tres aplicaciones concretas se debió a cuestiones básicamente idiomáticas. La teoría de Gerstner fue desarrollada por los países de ascendencia germana, la de Moseley por los de habla inglesa y la de Méry por los países francófonos y los más directamente relacionados con la École des Ponts et Chaussées como España.

Fig. 2. Vista de la ciudad de Fraga y su puente colgante, de Jenaro Pérez Villaamil. El puente, ejemplo paradigmático de la nueva ingeniería del siglo XIX en España, se inauguró en 1847 y en 1852 se hundió como consecuencia de una crecida del río Cinca. (13)



fue capaz de modelizar exactamente el arco de fábrica como un elemento elástico por varias razones:

- El comportamiento tensodeformacional de los materiales que conforman un arco de fábrica no fue investigado en condiciones de servicio hasta finales del siglo XIX.
- Las pequeñas compresiones que se producen en las dovelas en situación de servicio no podían ser cuantificadas con precisión mediante los aparatos de medida de la época.
- Las medidas de deformaciones producidas en condiciones de servicio en los arcos de fábrica, generalmente sobredimensionados, podían no tener un significado unívoco puesto que podían existir otras causas (p.ej. asentos) que motivaran movimientos de magnitud similar.

El ingeniero de caminos Eduardo Saavedra fue el primero que intentó aplicar la teoría de la elasticidad al análisis de los arcos de fábrica. En 1860 había traducido al castellano los trabajos de Michon (1848) que, al igual que los anteriores de Petit (1835), suponían la tabulación del planteamiento elástico de Navier particularizado a los arcos y las bóvedas. El mismo Saave-

dra introdujo consideraciones específicas adicionales de gran interés teórico aunque de escasa aplicación al problema práctico del diseño de arcos y bóvedas de fábrica (8). (4)

A mediados del siglo XVIII la piedra y la madera seguían siendo prácticamente los únicos materiales de construcción. Conforme los procesos de producción del hierro fueron desarrollándose se fue incorporando éste como material de construcción habitual. De hecho la rapidez de ejecución de los puentes de hierro determinó que se convirtiera en protagonista casi absoluto de los grandes viaductos de las nuevas infraestructuras. Durante el siglo siguiente insignes ingenieros como Thomas Telford, Isambard Kingdom Brunel o Robert Stephenson fueron algunos de los que adoptaron el “novedoso” material para sus estructuras. España fue importando rápidamente las tipologías derivadas del uso del hierro –la mayoría heredadas de la madera– como los puentes colgantes, las celosías (fundamentalmente de tipo

(4) La Revista de Obras Públicas, en varios artículos del año 1877 escritos por M. Szyskowski, recoge un extenso e ilustrativo resumen de las metodologías existentes así como la relación de las fórmulas prácticas de uso habitual hasta la fecha. Los textos sirven para introducir varias formulaciones de elasticidad aplicadas al análisis de las bóvedas de fábrica. (12)

Town) o los bow-string. De todas formas los puentes de fábrica seguían ocupando y preocupando a los ingenieros españoles como muestra la inclusión de numerosos artículos dedicados a las realizaciones en Europa y a las experiencias españolas en la Revista de Obras Públicas. A continuación se enumeran algunos casos nacionales coetáneos a las estructuras de Bellsolá:

- Puente de Villanueva de Cameros sobre el río Iregua en la provincia de La Rioja (Luz libre: 22 metros), 1862 (1).
- Puente de la Horadada sobre el río Ebro en la provincia de Burgos (Luz libre: 23.40 metros), 1863 (9).
- Puente de Navarces sobre el río Llobregat en la provincia de Barcelona (Cinco vanos de 20.62 metros de luz libre), 1864 (10).
- Puente sobre el río Deza en la provincia de Pontevedra (Cuatro vanos de 15.00 metros a ejes), 1864 (11).

4. El cemento en España

En la España de mediados del siglo XIX prácticamente sólo se empleaba el cemento natural de fabricación nacional. La producción de cemento se había iniciado en 1838 en la costa guipuzcoana, concretamente en Zumaya (14, 15, 16), donde la materia prima para producir el cemento se encontraba en abundantes canteras de margas y minas de lignito. Se crearon centros fabriles en otros municipios cercanos aunque la denominación de Zumaya englobó generalmente la producción de toda la provincia. La alta calidad de estos cementos era muy apreciada sobre todo en los proyectos costeros de construcción, tanto en España como en el extranjero. En menor medida se generó también actividad productiva en Aragón, Cataluña y norte de Andalucía.

En los primeros años de producción el cemento natural se fabricaba de una forma totalmente artesanal y básicamente estimativa, sin el apoyo de medios técnicos que pudieran regular los parámetros para su obtención. Los hornos verticales discontinuos eran pequeños, como los tradicionales de tipo calero, contruidos en las propias canteras de margas debido a la precariedad del transporte.

Independientemente de la incipiente capacidad cementera nacional se conocían los recientes avances de Inglaterra y Francia en la producción de cemento artificial y en las ventajas que aportaba éste sobre el

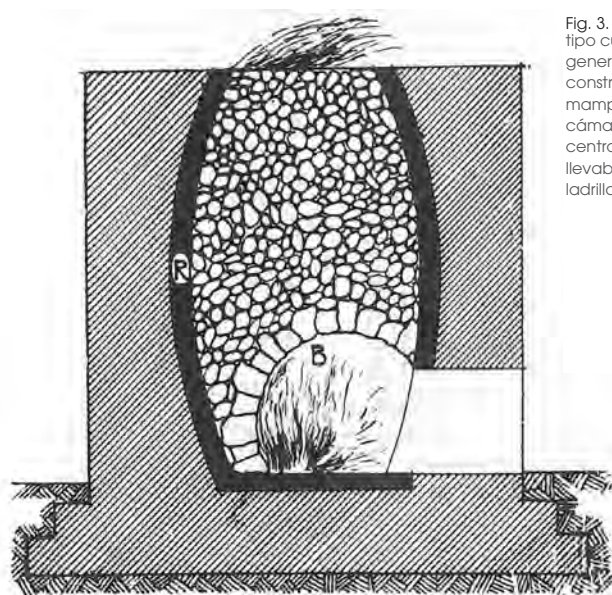


Fig. 3. Horno calero de tipo cuba (17). Estaban generalmente contruidos con mampostería, con una cámara cilíndrica central. En su interior llevaban un forro de ladrillo refractario.

natural. De todas formas el elevado coste que suponía la importación del nuevo cemento solía imposibilitar su aplicación práctica.

A partir de 1858, el inicio de importantes obras portuarias e hidráulicas provocó un progresivo aumento de la demanda de cemento, desencadenando la introducción de las mejoras necesarias para empezar con la producción a nivel industrial del cemento natural. Con la aparición de las nuevas fábricas se construyeron hornos modernos de producción continua ejecutados en mampostería y revestidos internamente con ladrillos macizos. Se introdujo igualmente un mayor control químico de los distintos tipos de rocas a emplear para poder obtener el cemento con las características requeridas.

José Vacchelli, en la segunda edición española de su libro *Construcción de Hormigón y de Cemento Armado* (3), transcribe casi literalmente la referencia de Manuel Pardo y su publicación *Materiales de construcción* donde incluye comentarios relativos a los cementos guipuzcoanos.

“Los cementos de Guipúzcoa constituyen productos de notable importancia, cuyo uso se ha generalizado, no sólo en España, sino en el extranjero, exportándose grandes cantidades al Mediodía de Francia y a América, donde compiten con los cementos ingleses y franceses”.

Prosigue comentando que dichos cementos presentan problemas relacionados con la falta de homo-

Fig. 4. Anuncio publicitario del cemento portland Asland incluido en el libro *Cemento Armado* del Ingeniero Militar Ricardo Seco de la Garza (18).

“Los cementos de Zumaya presentan, sin embargo, excelentes condiciones para determinadas obras. La rapidez de endurecimiento, la resistencia que presentan, aunque inferior a los buenos cementos de portland, su notable impermeabilidad y su baratura, pues se adquieren en el litoral del Norte a precio que no llega a la mitad del de los cementos de fraguado lento, explican que sean de grandísima utilidad para la construcción”.

Es interesante apuntar que el cemento, ya fuera natural o artificial, y a pesar de todas sus virtudes tuvo una lenta implantación en el abanico de tecnologías constructivas del momento. La creciente utilización en cimentaciones fue relativamente rápida pero tardó mucho tiempo en ser aceptada por ingenieros y arquitectos para otros roles estructurales (5).

Huérfano de padre desde los dos años vive su infancia en Elciego, pueblo riojano materno, donde entabla estrecha relación con una de las familias más influyentes de la provincia puesto que su madre, Doña Francisca Bayo, trabaja como dama de compañía de Doña Marcelina Hurtado de Amézaga. Años más tarde la ilustre dama dejará en testamento a Doña Francisca "10000 Reales de vellón" para que su hijo Ricardo pueda finalizar los estudios de ingeniería de caminos en Ma-

25 g 40

drid. En este mismo acto dejará todas sus posesiones a su hermano D. Guillermo, Marqués de Riscal de Alegre, cuyo hijo Camilo, años más tarde y continuando las inversiones familiares, terminó construyendo una bodega proyectada por Ricardo Bellsolá para elaborar vinos al estilo francés en Elciego. Para este encargo en concreto Don Camilo hizo viajar a Burdeos a Bellsolá con objeto de poder estudiar las más prestigiosas bodegas del Médoc, Graves y Saint Emilion. El ingeniero respondió al envite diseñando un edificio construido íntegramente en sillería y dotado de enormes galerías para la crianza, reproducción exacta del modelo francés.

Tras finalizar sus estudios en la Escuela de Caminos con un brillante expediente académico, Bellsolá es destinado como ingeniero en prácticas a Palencia en 1861, pero en menos de un año se traslada a Logroño donde es ascendido a Ingeniero de Primera.

Unos años más tarde, el 4 de noviembre de 1863, contrae matrimonio con D^a Jacinta Gurrea Arrieta. La pareja se establece en la capital riojana y Bellsolá comienza a trabajar como ingeniero interino en la Jefatura de la Provincia. Resulta destacable indicar que Jacinta era la ahijada de Jacinta Martínez de Sicilia y de Santa Cruz, esposa del General Baldomero Fernández Espartero, Príncipe de Vergara y Duque de la Victoria entre otros títulos nobiliarios.

En junio de 1867 Bellsolá es destinado a Málaga, pero su estancia no se prolonga por mucho tiempo ya que motivos personales le obligan a solicitar expectativa de destino y a los dos meses regresa a Logroño. Una vez allí, si bien se reincorpora al trabajo, vuelve a solicitar una segunda expectativa de destino por precisar más tiempo para solucionar diversos asuntos familiares. Finalmente en 1872 se reincorpora al servicio activo de la capital riojana donde permanece como Ingeniero Jefe hasta 1880.

Durante estos años mantuvo una estrecha relación con su pueblo materno al que dedicó gran parte de su labor profesional, activando el desarrollo económico de esta zona de la Rioja Alavesa. Entre otras obras realizadas en el entorno de Elciego merece la pena destacar su labor en la modernización de la carretera de Laguardia a Cenicero en 1868, la participación en la reconstrucción del puente sobre el Ebro en 1871 o la intervención en el proyecto de carretera que une el puente y la estación del ferrocarril en Cenicero (1872).

En sus últimos años de actividad profesional trabajó en el desarrollo de la Compañía de los Ferrocarriles de Madrid a Zaragoza y Alicante (MZA).

Falleció el 17 de septiembre de 1882, en Madrid, a los 45 años de edad.

Ricardo Bellsolá y Bayo desempeñó un papel activo en el desarrollo de las infraestructuras de la zona mediante numerosos proyectos y obras de carreteras, viaductos, abastecimientos de agua y otras infraestructuras civiles. Incluso proyectó y construyó edificios notables como los pertenecientes a las bodegas del Marqués de Riscal. Gozó de gran nombre y predicamento en la sociedad de su época e incluso fue nombrado como uno de los tres albaceas del testamento del General Espartero, fallecido en Logroño el 8 de enero de 1879.

6. Los primeros puentes de hormigón

La construcción de la Carretera de Primer Orden entre las ciudades de Logroño y Soria se inició en 1859 en suelo riojano. Su trazado discurría a lo largo de 71 kilómetros en un terreno de orografía especialmente quebrada y abrupta por lo que durante su construcción contó con numerosas dificultades, sufriendo diferentes interrupciones de diversa duración. La ejecución de la obra se dividió en dos etapas diferenciadas.

Hasta 1862, en una primera fase, la elaboración de los proyectos así como la dirección de las obras estuvo a cargo del ingeniero de caminos D. Adolfo de Ibarreta. Bajo su supervisión se construyeron 10 puentes, 23 pontones, varias alcantarillas y tajeas e incluso un túnel de 202 metros "abierto en un conglomerado, sin revestimiento interior y construido con tan solo dos arcos de fábrica, uno en cada boca".

A partir de 1862, en plena vorágine de excursiones ultramarinas patrias (de funestos resultados por cierto) y a causa de varios cambios en la Jefatura de la Provincia, se hizo cargo de la obra el joven Ricardo Bellsolá. En ese momento restaban por acometer numerosas obras de fábrica necesarias para salvar distintos ríos y barrancos localizados en la sierra de Cameros, entre los que destacaban por sus dimensiones los puentes de Villanueva de Cameros, de Lavalé y de Lumbreras.

Cuando Bellsolá se hace cargo de la obra el puente de Villanueva de Cameros se encontraba en construcción habiéndose ejecutado los estribos hasta la altura de los cuatro zócalos. La bóveda se realizó con rosca de sillería y el resto de mampostería ordinaria. Las pilastras, impostas y antepechos se ejecutaron con sillería, al igual que los zócalos.

Posteriormente Bellsolá encontró grandes dificultades para conseguir el material –ladrillo– que, con “acertadísimo criterio”, había seleccionado su predecesor para las bóvedas, tímpanos y pretilos de la mayor parte de las estructuras que faltaban. Comprobó que los precios de la fábrica, fijados en el proyecto por administración, estaban basados en el coste del material en el resto de la provincia pero en nada correspondían con la realidad de la zona. Las características climatológicas del emplazamiento, que limitaba la fabricación a dos meses al año, unido a la gran demanda que se originaba por la nueva construcción de la línea de ferrocarril entre Tudela y Bilbao, imposibilitaban adquirir el material al precio previsto.

Estas circunstancias, junto con la ausencia de canteras de rajuela o mampostería en el entorno próximo, así como la fortuna de contar con la presencia de un “cemento regular, aunque caro en fábrica” en la zona y una cantera de piedra arenisca, sugirieron a Bellsolá la idea de combinar el hormigón hidráulico y la piedra arenisca para construir las obras de fábrica que faltaban. En este grupo se encontraban dos puentes importantes, uno sobre el río Lavalé y otro sobre el río Iregua, con una longitud aproximada a salvar de 35 metros. Consecuentemente propuso a la “Superioridad” la posibilidad de construir las bóvedas de hormigón hidráulico con los aristones de sillería.

Cuando el ingeniero murciano desarrolla sus experiencias con el hormigón hidráulico da cuenta de las estructuras que ha ejecutado con tal material de forma monolítica y “sin más precauciones para el hormigón que las que usan en el de fundaciones”:

“- Siete tajeas de medio punto de un metro de luz.
Una alcantarilla de 1.50 metros de luz y 0.20 metros de flecha
Tres alcantarillas de medio punto, de 2 metros de luz, y cinco de 3 metros.
Un pontón de 4 metros de luz, y dos de 6 metros, todos de medio punto.
Dos arcos de un puente de tres, en el que el central es carpanel de 12 metros de luz y 3.72 metros de flecha, construido de sillería, y los laterales de medio punto de 7.44 metros de luz hecho de hormigón.
Un puente de tres arcos escarzanos de 10 metros de luz y 2.34 metros de flecha
Otro puente de tres arcos carpaneles de 10.216 metros y 3.92 de flecha.”

Estas dos últimas estructuras correspondían a los puentes de Lavalé y Lumbreras respectivamente.

Aunque Bellsolá era consciente de la nula experiencia previa en el análisis, dimensionamiento y construcción de bóvedas de hormigón monolíticas⁽⁶⁾ partió del conocimiento de las diferentes aproximaciones al cálculo de bóvedas de fábrica (en su texto cita prácticamente todas los diversos planteamientos del problema de la determinación del comportamiento de las bóvedas de fábrica –entre otros La Hire, Coulomb, Méry y Saviedra–). De todas maneras advirtió que todas estas teorías suponían “la existencia de presiones debidas a la división o despiece de las bóvedas” por lo que no debían ser directamente aplicables al caso de la bóveda monolítica. En su planteamiento lógico identificaba una serie de incertidumbres:

- “1º ¿Hay presiones cuya intensidad, dirección y puntos de aplicación siguen la misma ley que en una bóveda compuesta de dovelas?
- 2º Caso de que supusiésemos rota la bóveda, ¿aparecerían las roturas normales al intradós?
- 3º ¿Pueden compararse los arcos monolíticos de hormigón a una pieza elástica de su misma forma y dimensiones, empotrada en sus extremos?”

Para cada una de las preguntas que él mismo se formulaba bosquejó una argumentación que le permitiera autoconvencerse de la idoneidad de ejecutar lo que intuía aunque, haciendo gala de gran honestidad, confesaba que era “una serie de preguntas a las que yo no me atrevo a contestar de una manera absoluta”. Bellsolá era perfectamente consciente de que la aprehensión del fenómeno estructural subyacente en una bóveda monolítica le superaba. De todas formas razonó que el comportamiento eminentemente bidimensional de la bóveda sería capaz de resistir el efecto puntual de una carga a través de la cohesión del material con el que estaba construida. En este sentido citaba las delgadas bóvedas tabicadas de ladrillo y yeso (“de espesor insignificante”), que demostraban la competencia mecánica de dichas tipologías, e incluso citaba los casos construidos por Marc Isambard Brunel en Inglaterra. Precisamente este hecho abundaba, en su opinión, en la idea de que el monolitismo podía permitir obviar el concepto

(6) Sí que había resultado frecuente rellenar las bóvedas de fábrica con material semirrígido mediante el uso de conglomerantes o incluso plantear sistemas mixtos mediante arcos formos y verdugadas de fábrica y material conglomerante.



Fig. 5. Fotografía coloreada del Puente de Alma en París (tomada entre 1890 y 1900) (20).

de la línea de empuje puesto que esa concentración de cargas debía difuminarse por el efecto de la cohesión comentada anteriormente. Igualmente supuso (porque en ninguna de sus estructuras apreció patologías semejantes) que las diferentes roturas debían desarrollarse normalmente al intradós por ser la dirección en la que menos espesor presenta y asumió finalmente que la futura y correcta comprensión de los fenómenos resistentes debía ser realizada mediante la teoría elástica y verificados por “experimentos que comprueben o inutilicen los resultados de la teoría”.

En definitiva Bellsolá recogió todas estas cuestiones y llevó a cabo el análisis de sus puentes según el método de cálculo “usado para puentes de mampostería con cemento de Vassy, de los que hay hasta 22 ejemplos notables en Francia, y cuyas dimensiones han sido sancionadas por la experiencia de algunos años”. Citaba expresamente el puente de Alma (1855) en París cuya bóveda de mayor longitud (el vano central) alcanzaba los 43 metros con un espesor de rosca de sólo 1.50 metros y que había sido calculada mediante la formulación de Dejardin⁽⁷⁾. Esta circunstancia, el hecho de que existieran varios ejemplos construidos de su confianza, resultó definitiva puesto que Bellsolá eligió finalmente este planteamiento “aumentando en algunos centímetros (el canto) sus resultados para atender a la desconfianza que me ofrece el cemento empleado respecto a la igualdad de clase”.

Precisamente el cemento utilizado se produjo en una “fábrica provisional” localizada entre Nestares y To-

recilla de Cameros, por resultar más económico que el importado de Europa o el que se podía adquirir en San Sebastián. La fábrica comentada no era más que un antiguo molino harinero con un horno muy próximo que se acondicionó para conseguir el objetivo deseado.

A pesar de las previsiones iniciales de Bellsolá la calidad del cemento producido provocó ciertos problemas. La comparación de la composición química de los elementos que debían formar el cemento, que apuntaba inicialmente a la imposibilidad de fraguar en presencia del agua, con las propiedades hidráulicas comprobadas experimentalmente arrojaba dudas sobre las posibilidades de uso del futuro conglomerante. Sucesivos análisis demostraron que los resultados eran muy sensibles a la calidad de la piedra caliza empleada por lo que se debió extremar el cuidado en determinar exactamente los afloramientos idóneos. Los problemas no finalizaban ahí puesto que como el cemento no podía consumirse al ritmo que se producía, también se debió prestar especial atención al acopio para evitar su alteración y asegurar de esta forma el requerido fraguado lento. Para cada uno de los puentes descritos a continuación resultó necesario habilitar unos almacenes provisionales de modo que “ni la humedad del suelo ni la de la atmósfera pudiesen alterarlo”.

La piedra machacada, formada por cuarcita y cuarzo puro, resultaba muy dura pero no idónea para el hormigón ya que como observaba Bellsolá, al partirla, las caras quedaban demasiado pulimentadas. En cuanto a las arenas, que eran de mediana calidad, mezcla de las minas y de material procedente de los ríos Lavalé e Iregua, se remarcó la necesidad de eliminar la totalidad de la materia vegetal y controlar específicamente el contenido de sulfatos para evitar “desagregados” en la masa.

Por último, el agua se obtuvo de río o pozo, sin ningún contenido en sales. Bellsolá estableció la conveniencia de añadirla de una sola vez y en la menor proporción posible.

6.1. Puente de Villanueva de Cameros. 1862

Esta estructura se localizaba sobre el río Iregua, en uno de los sitios más quebrados y pintorescos de su cauce, cerca del pueblo de Villanueva de Cameros. El régimen del río era estable a lo largo de todo el tramo y se localizaban magníficos bancos de roca para poder situar las primeras hiladas de piedras de los estribos.

(7) El texto comentado de M. Szystowski recogido en la ROP de 1877 (12) recoge las fórmulas más habituales utilizadas para la obtención del espesor mínimo de las bóvedas. Entre ellas la de Perronet y la de Dejardin.



Fig. 6. Alcantarilla de Villanueva de Cameros. (Fotografía: Juan Donaire Merino).

La estructura principal debía salvar una luz de 22 metros que se realizó mediante una bóveda de directriz elíptica de 8 metros de flecha que se apoyaba sobre cuatro zócalos elevados 2.40 metros hasta la línea de máximas avenidas. Los zócalos y las pilastras se conformaron mediante paramentos de sillería e interiores de mampostería; de la misma manera los aristones de la bóveda se ejecutaron en sillería y la propia bóveda en "buena mampostería ordinaria".

Pero lo más interesante de este puente, desde el punto de vista del presente artículo, no radica en la luz principal sino en una pequeña obra de fábrica adyacente (1):

"Y en la derecha, a 20 m. del paramento del estribo derecho, una alcantarilla para paso inferior, la cual tiene 3 m. de luz y 4.5 m. de altura hasta la clave, resultando de unas proporciones muy convenientes para el objeto a que se destina; es de medio punto con los aristones de estribos y bóveda de sillería; el interior del cañón de hormigón hidráulico y los frentes de la misma mampostería de que están hechos los muros de avenida del puente".⁽⁸⁾

Ésta es la primera evidencia escrita de una estructura portante monolítica ejecutada con hormigón sin revestimientos posteriores o encofrados resistentes, cuyo éxito motivó nuevas realizaciones posteriores en la misma carretera.

(8) En 1862 se publica en la Revista de Obras Públicas (1) una reseña sobre este puente en la que se indica que "después he probado su resistencia pasando sobre la bóveda sin intermedio de capa de tierra volquetes cargados de piedra y en la actualidad carros de tres mulas cargados de paños, sin que se note la menor alteración en la bóveda". Se infiere por tanto que es el propio Bellsolá el autor de dicho texto.

El espesor de la bóveda en clave alcanzó los 60 centímetros y el hormigón se vertió directamente sobre un encajonado de tablonos apisonándolo a continuación pero "sin hacer refluir la mezcla a la parte superior". En la preparación de dicho hormigón se procedió a mezclar en partes iguales una "cal hidráulica pura y una piedra arenisca" de la zona, teniendo esta última la característica de ser dura y muy porosa. La bóveda se descimbró a los diez días sin percibir ningún tipo de grietas ni defectos. Si bien tanto el contratista como los trabajadores temieron por la seguridad de la obra cuando comprobaron que la clave no se iba a introducir a golpes de maza, la operación dio un resultado más satisfactorio aún de lo que se esperaba.

6.2. Puentes de Lavalé y Lumbreras. 1866

Ambas estructuras se acometieron en 1866, durante los últimos estertores del reinado isabelino. Para ello, y como se ha comentado anteriormente, Bellsolá decidió prescindir de las medidas de seguridad adicionales (respecto a las usualmente empleadas en cimentaciones), "que se creen indispensables" y que encarecen este sistema. Con esta premisa se ciñó a los aspectos de su manipulación que pudieran "afectar a la solidez", es decir, las obras se realizaron como si el material se fuera a utilizar para las "fundaciones o chapas de obras de fábrica". Éste era uno de los aspectos que Bellsolá pretendía comprobar, ya que en un principio consideraba "la celeridad de ejecución y la economía" como únicas ventajas respecto a la sillería y el ladrillo. El hecho de poder demostrar su aplicación en cualquier situación, sin temor a la competencia estructural y al comportamiento a lo largo del tiempo, podría motivar que el hormigón se convirtiera en un material verdaderamente competitivo.

Para la ejecución de las bóvedas de hormigón se plantearon inicialmente dos posibles métodos. El primero consistía en la ejecución y colocación de dovelas de hormigón en masa sobre una cimbra común y tratarlas como sillares comunes de una bóveda de fábrica, y el segundo confeccionar el molde del hormigón con la propia cimbra de forma que la bóveda fuera de una sola pieza, es decir monolítica. Ambos puentes, así como el resto de obras de fábrica de la sierra de Cameros, finalmente se realizaron con el sistema más rentable para este tipo de construcciones a juicio de Bellsolá, es decir la segunda alternativa. En el

Fig. 7. Planos del puente de Villanueva de Cameros publicado en la Revista de Obras Públicas (1).

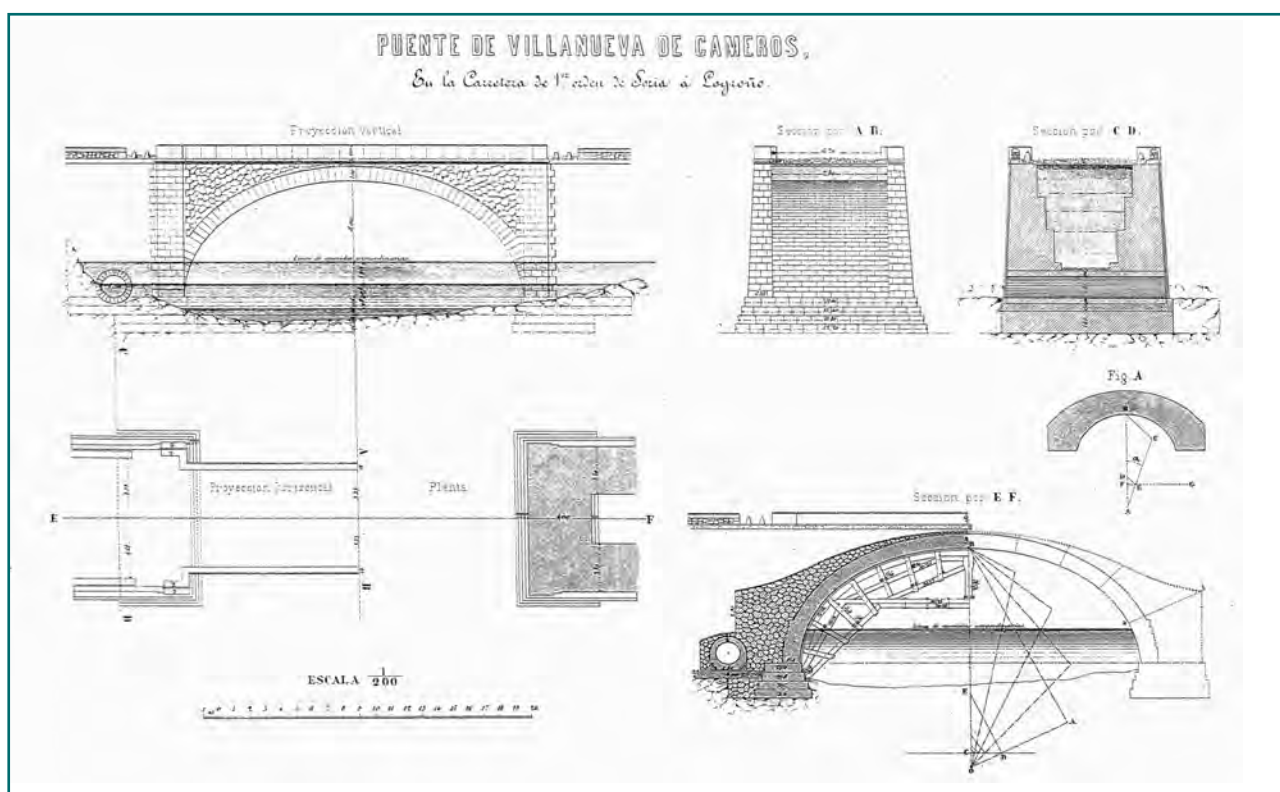


Fig. 8. Puente de Lumberas. Ingeniero: Ricardo Bellasolá (Fotografía: Juan Donaire Merino).



proceso de ejecución distinguió tres etapas claramente diferenciadas:

1. "Formación del molde y trazado de la curva del trasdós"
2. "Confección y empleo del hormigón en obra"
3. "Descimbramiento"

Los diferentes moldes para el encofrado de hormigón se ejecutaron forrando las cimbras de los arcos con tabla siguiendo exactamente la curva del intradós. Como los aristones de sillería debían estar trabados con las bóvedas de hormigón se practicaron en las cimbras el rebajo correspondiente, de tal modo que se descimbrasen simultáneamente aristones y bóvedas. Sobre la cimbra ya asentada se construían los tímpanos y los macizos de contra-empuje.

La fabricación del hormigón resultó muy laboriosa debido las características anteriormente comentadas y a la nula experiencia previa de la mano de obra. Finalmente la dosificación empleada consistió en una mezcla homogénea de 0.063 m³ de cemento y el mismo volumen de arena. Ambos componentes se revolvió bien y se procedía a verter de vez todo el volumen de agua, 0.030 m³. Una vez amasado el conjun-



Fig.9. Puente de Lumbresas. Se aprecian las llaves de trabazón entre los aristones de sillaría y la bóveda de hormigón (Fotografía: Juan Donaire Merino).

to con batideras ordinarias se agregaban “cunachos de piedra machacada” y se volvía a amasar la mezcla hasta que las piedras quedasen bien envueltas en mortero. Posteriormente se vertía la mezcla, desde el artesón de madera –con un volumen de un tercio de metro cúbico– donde se había realizado la amasada al punto conveniente de la bóveda.

Una vez obtenida la dosificación precisa de la mezcla Bellsolá tomó ciertas precauciones en la ejecución de las bóvedas. En ambos puentes las operaciones de hormigonado y terraplenado posterior se prolongaron durante nueve días, por lo que resultó necesario prever la ejecución de varias juntas de hormigonado. Éstas se materializaron mediante tabloncillos trabados en los sillares de los aristones y situados en un plano perpendicular a la bóveda. Dichas juntas, justo antes de verter la siguiente fase, se repicaban y regaban de forma que se asegurara la correcta unión con el hormigonado a efectuar a continuación. El hecho de que estas superficies de contacto existieran permitió limitar la existencia de fisuración localizada asociada al fenómeno de la retracción. De todas formas Bellsolá era muy consciente de que debía realizar el hormigonado en el tiempo más corto posible para conseguir que el comportamiento de todas las zonas hormigonadas en diferentes fases fuera lo más homogéneo posible.

Para concluir las estructuras quedaba pendiente la definición del momento de descimbrado de las bóvedas de hormigón que, tal como describió Bellsolá, precisó de un tiempo más o menos largo. Esta incerti-

dumbre suponía prácticamente el único inconveniente que encontraba a este tipo de construcción (2).

“El fijar de antemano y de una manera absoluta el tiempo que se han de tener los arcos cimbrados es imposible, porque depende no sólo de la potencia del cemento, de la clase de arena que se emplee, de las proporciones en que se mezclen estos materiales y de la fluidez del mortero, sino también de las condiciones atmosféricas de la localidad.”

En esta última etapa se encontró con el inconveniente de quedarse sin presupuesto y tuvo que desapear las bóvedas de los puentes después de lo que inicialmente había previsto –seis meses–. En el caso de las estructuras de menor longitud se percató, entre otras cosas, de que era posible descimbrar antes aquellos elementos ejecutados con hormigón apisonado, atribuyéndolo a la reducción de la porosidad.

Observó igualmente que el hormigón vertido se contraía con el fraguado, separándose de la cimbra y permitiendo así un descimbramiento mucho más ventajoso que el de los arcos de piedra. Bellsolá comentaba que, “aun en los arcos de mucho espesor, que a los dos meses de concluidos, sus cimbras producen un sonido hueco si se las golpea, lo que hace sospechar que al contraerse el hormigón a causa del fraguado, se separa de la cimbra”. Por esta circunstancia el rebajamiento del arco tras descimbrar

Fig.10. Contacto de una bóveda de hormigón del puente de Lavalé y los aristones de sillaría (Fotografía: Juan Donaire Merino).



podía ser considerado nulo. Evidentemente la consideración de que el peso no despreciable de los aristones, tímpanos y rellenos de los puentes descansaran en la misma cimbra que servía de molde al hormigón dirigía la incertidumbre de Bellsolá respecto al tiempo necesario para el desapeo, ya que el hormigón por sí solo tendía a levantarse por efecto de su fraguado –retracción– como él mismo advirtió correctamente.

Tanto el puente de Lavalé como el de Lumbreras se construyeron con este tipo de hormigón y con los mismos procesos de ejecución con el matiz de que en ninguno de ellos “se apisonó el hormigón para evitar que la mezcla refluyese a la superficie”. Durante el proceso de ejecución Bellsolá tomó precauciones para retardar el fraguado del hormigón mediante el almacenamiento previo del cemento durante dos o tres meses. Al contrario de lo que ocurría en el caso de las cimentaciones o las obras sumergidas, en estos casos aconsejaba emplear “cementos perezosos” permitiendo una manipulación más esmerada. Igualmente definía que la bóveda de hormigón recién finalizada debía cubrirse inmediatamente con una buena capa de tierra con el fin de protegerla adecuadamente de los agentes atmosféricos y que las operaciones de hormigonado debían evitarse en situaciones de temperatura extrema. En definitiva planteó un conjunto de operaciones que tendrían a disminuir el calor de hidratación durante el fraguado y, en consecuencia, el valor de la retracción asociada.

Si bien ambas estructuras diferían en la geometría de los tipos de arco utilizados, así como levemente en su luz y flecha, resultaban muy similares geométricamente. Ambas estructuras siguen hoy en pie aunque bastante deterioradas como muestran las fotografías adjuntas.

Puente de Lavalé

Situado sobre el río que lleva su nombre cuenta con tres arcos escarzanos de 10 m. de luz y 2.34 m. de flecha. El espesor de la bóveda en la clave alcanza los 90 cm., aumentando hacia los riñones, según la dirección de la curva del trasdós. Los aristones, como ya se ha comentado, se ejecutaron en sillaría arenisca formando una faja concéntrica con el intradós. Los tímpanos, de 50 cm. de espesor constante, fueron construidos con mampostería de can-



Fig.11. Deterioro en el tímpano del puente de Lavalé (Fotografía: Juan Donaire Merino).



Fig. 12. Vista del puente de Lumbreras (Fotografía: Juan Donaire Merino).

Puente de Lumbreras

Es una estructura que salva el cauce del río Iregua mediante tres arcos carpaneles de 10,216 m. de luz y 3,92 m. de flecha. El espesor de la bóveda es idéntico al de la bóveda de Lavalé y los aristones están ejecuta-

dos igualmente con sillares de arenisca –con almohadillado rústico–, formando una faja concéntrica con el intradós de 70 cm. Los tímpanos y los macizos de contra-empuje son idénticos a los del puente de Lavalé.

7. Epílogo

Tras finalizar las obras, en 1867, Ricardo Bellsolá publicó un artículo en la Revista de Obras Públicas en el que describió prolijamente toda la casuística referida. En dicho artículo Bellsolá expresaba la convicción de que la “construcción de las bóvedas de hormigón hidráulico de una sola pieza, sin más precauciones que las utilizadas para las fundaciones” iba a permitir definir un sistema de construcción sumamente expedito y económico. Y si precisamente él, con un hormigón fabricado de forma artesanal y rudimentaria, había sido capaz de dirigir la construcción de los dos puentes indicados –así como varias otras bóvedas de distintas luces y formas para numerosas tajeas, alcantarillas y pontones– resultaba evidente que el nuevo procedimiento constructivo podía configurarse en una alternativa plausible frente a otras técnicas constructivas existentes.

Como significativa conclusión se incluye un comentario de Bellsolá con el que finalizaba el texto del artículo de 1867 (2).

“Éstas son las observaciones que he hecho sobre los arcos de hormigón, nada nuevas por cierto, pero que desearía sirviesen para que perdiendo el miedo a este género de obra, se hagan experimentos, que unidos a los resultados de la ciencia, puedan perfeccionar este sistema de construcción, sacando de él las ventajas que no dudo es capaz de proporcionar”

Bellsolá, con notable humildad, introducía la característica que debe resultar inseparable de una ingeniería –entendida como *tekné*– comprometida con su tiempo y su sociedad, es decir innovación a partir del conocimiento de la tecnología de los materiales y de sus métodos de cálculo. Quizás sea una buena oportunidad para recuperar –rehabilitar– estos primeros ejemplos de puentes de hormigón estructural que suponen, al fin y al cabo, la materialización más ortodoxa de los valores intrínsecos de la ingeniería. ♦

Referencias:

- (1) REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS. “Puente de Villanueva de Cameros, en la carretera de primer orden de Soria a Logroño y noticia de esta carretera y otras de la provincia”. *Revista de Obras Públicas*, 1862, vol. 10, tomo I, nº 24, p. 288-294.
- (2) BELLSOLÁ BAYO, Ricardo. “Memoria relativa a los arcos de hormigón hidráulico contruidos en la carretera de primer orden de Soria a Logroño”. *Revista de Obras Públicas*, 1867, vol. 15, tomo I, nº 2, p. 13-17; nº 3, p. 25-26; nº 4, p. 37-43.
- (3) VACCHELLI, José. *Las construcciones de hormigón y de cemento armado*. 2ª ed. aum. traducida de la 4ª ed. italiana. Madrid: Adrián Romo, 1910. p. 12-13 y p. 243-244.
- (4) RIBERA Y DUTASTE, José Eugenio. *Puentes de Fábrica y Hormigón Armado. Tomo III. Anteproyectos y puentes de fábrica*. 2ª ed. corr. y aum. Madrid: (s.n.), 1936 (Gráficas Barragán), p. 179.
- (5) HUERTA, Santiago. “Lecreux 1774. Una memoria inédita sobre el colapso de estribos”. *Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Cádiz, 27-29 enero 2005*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, SEdHC, Arquitectos de Cádiz, COAAT Cádiz, 2005.
- (6) HUERTA, Santiago; HERNANDO DE LA CUERDA, Rafael. “La teoría de bóvedas en el siglo XVIII: La contribución de Philippe de La Hire”. *Actas del Segundo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Madrid: Instituto Juan de Herrera, SEdHC, Universidad de La Coruña, CEHOPU, 1998.
- (7) KURRER, Karl-Eugen. *The History of the Theory of Structures. From Arch Analysis to Computational Mechanics*. Ernst & Sohn, 2008. p. 90. ISBN: 9783433018385
- (8) SAAVEDRA MORAGAS, Eduardo. “Nota sobre la determinación del problema de equilibrio de las bóvedas”. *Revista de Obras Públicas*, 1860, vol. 8, tomo I, nº 9, p. 101-104.
- (9) PELOGRA RIGADA, José. “Puente de la horadad sobre el Ebro, en la carretera de Cereceda a Villante por Medina de Pomar, provincia de Burgos”. *Revista de Obras Públicas*, 1863, vol. 11, tomo I, nº 12, p. 137-145.
- (10) REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS. “Memoria descriptiva del proyecto de un puente de piedra sobre el Río Llobregat, provincia de Barcelona”. *Revista de Obras Públicas*, 1864, vol. 12, tomo I, nº 15, p. 173-179; nº 16, p. 183-187.
- (11) GARCÍA DEL HOYO, Ángel. “Memoria relativa a la construcción de un puente sobre el río Deza”. *Revista de Obras Públicas*, 1864, vol. 12, tomo I, nº 2, p. 16-22; nº 3, p. 30-33.
- (12) SZYSTOWSKI, M. “Resistencia de materiales. Método nuevo para el trazado de la curva de presiones en las bóvedas de fábrica”. *Revista de Obras Públicas*, 1877, vol. 25, tomo I, nº 17, p. 196-198; nº 18, p. 212-216; nº 20, p. 232-238; nº 23, p. 265-268; nº 24, p. 277-282.
- (13) VÁZQUEZ DE LA CUEVA, Ana. *La Ingeniería Civil en la Pintura*. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2008. p. 185 y 193.
- (14) VARAS, M.J.; ALVAREZ DE BUERGO, M.; FORT, R. “The origin and development of natural cements: The Spanish experience”. *Construction and Building Materials*, 2007, vol. 21, nº 2, p. 436-445.
- (15) BURGOS NÚÑEZ, Antonio. *Los orígenes del hormigón armado en España*. Madrid: Ministerio de Fomento; CEDEX-CEHOPU, 2009. p. 227-253.
- (16) IBÁÑEZ GÓMEZ, Maite; ZABALA LLANOS, Marta; TORRECILLA GORBEA, María Jose. *Cementos Rezola. 150 años de historia*. Cementos Rezola-Italcementi Group, 2ª Edición, 2001. p. 15-32.
- (17) ARREDONDO, F. *Estudio de materiales. III. Cales*. 5ª ed. Madrid: Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento, 1967. p. 13.
- (18) SECO DE LA GARZA, Ricardo. *Cemento Armado. Cálculo rápido*. 3ª ed. Madrid: P. Orrier, 1913.
- (19) RIBERA Y DUTASTE, José Eugenio. *Puentes de Fábrica y Hormigón Armado. Tomo I. Generalidades, muros y pequeñas obras*. 2ª ed. Madrid: Talleres gráficos Herrera, 1934. p. 45.
- (20) LIBRARY OF CONGRESS. *Alma Bridge, Paris, France*. Washington: Library of Congress Prints and Photographs Division. LC-DIG-ppmsc-05212.