

La segunda juventud de los puentes arco de fábrica: s. XVII, XVIII Y XIX



José Antonio Martín-Caro Álamo

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director de Ines Ingenieros Consultores

Resumen

El presente artículo pretende resaltar la importancia que tuvo en el proyecto y construcción de los puentes de fábrica la conjunción de una serie de hechos favorables relacionados con el conocimiento científico técnico que se dieron lugar a finales del s. XVII y principios del s. XVIII. Esta sinergia positiva derivó en un segundo periodo de esplendor de los puentes de fábrica que llevó consigo una mejora cualitativa de estas estructuras y la construcción de un ingente número de bellas estructuras. Se trata, por tanto, de subrayar esta nueva juventud de los puentes de fábrica, de su relación con el desarrollo de la matemática y la ingeniería, de su relación con sus inmediatos predecesores, los puentes medievales y modernos, y de su muerte temprana a finales del primer cuarto del s. XX, coincidiendo con la irrupción del hormigón armado.

Palabras clave

Puentes de fábrica, teoría general de estabilidad, historia de los puentes, evolución en el análisis de los arcos

Abstract

This article underlines the implications in the design and construction of masonry bridges brought about by a series of favourable advances in the knowledge of science and technology that took place at the end of the 17th century and the start of the 18th century. This positive synergy led to the resurgence of masonry bridges accompanied by the improved quality of these structures and witnessed by the construction of a vast number of beautiful bridges. The article outlines this renaissance of masonry bridges, highlighting their relation to the development of mathematics and engineering, their relation to their immediate predecessors, the medieval and modern bridges, and their early demise in the 1920's on the emergence of reinforced concrete.

Keywords

Masonry bridges, General Theory of Elastic Stability, history of bridges, development in arch analysis

1. Introducción

El análisis sincero de los puentes arco de fábrica desde el punto de vista de su proyecto y construcción, es decir, desde una perspectiva ingenieril, permite concluir que sólo existen dos grandes épocas identificables, la época romana y la que abarca el s. XVIII y s. XIX.

Tanto los puentes pertenecientes a la época medieval, como los construidos durante la Edad Moderna, no presentan innovaciones relevantes en cuanto a su genealogía y razón de ser. En ocasiones, se habla de puentes románicos, renacentistas, barrocos, etc. empleando estilos arquitectónicos para tratar de catalogar a estos puentes situados entre dos momentos ingenieriles históricos, pero salvo en aquellas ocasiones en que la presencia de detalles arquitectónicos o conjuntos escultóricos importantes en el mismo, le confieran pertenencia

a estos estilos, no parece una manera muy afortunada de nombrarlos.

Los puentes arco de fábrica anteriores al siglo XVIII fueron construidos en épocas en las que no se tenía apenas conocimiento de lo que hoy se entiende como Teoría General de Estructuras. Paradójicamente, la gran mayoría de las grandes estructuras de fábrica construidas lo fueron en épocas consideradas “precientíficas”: puente de Constantino sobre el Danubio con luces de 65 m, puente sobre el Adda en Trezzo, Italia, con 73 m de luz, puente de Alcántara en Toledo y un largo etcétera.

Tan sólo a partir del s. XVIII y especialmente en el XIX, el proyecto de estos puentes se ve asistido por herramientas teóricas de análisis, posibilitando el proyecto y construcción

de un gran número de estructuras de especial factura. Pero en ese momento, la irrupción con fuerza de otras tipologías (estructuras metálicas y de hormigón) provocó que el proyecto de los puentes de fábrica con arreglo a un conocimiento científico-técnico apenas perdurara en el tiempo un siglo. Un tiempo comparativamente pequeño con la perspectiva de los muchos años de historia de estas estructuras.

El presente artículo trata sobre la nueva juventud de los puentes de fábrica en los siglos XVIII y XIX, de su relación con el desarrollo de la matemática y la ingeniería, de su relación con sus inmediatos predecesores y de su pronta e injusta desaparición en el s. XX.

2. Sus inmediatos predecesores, los puentes del medioevo y de la Edad Moderna

2.1. Los puentes medievales

La época medieval, que comienza una vez finalizado el dominio romano, es claramente dependiente de la romana en cuanto a la construcción de sus puentes. En principio, la Edad Media recibe la bóveda de medio punto, pero la ortodoxia no es tan rigurosa como en la época precedente, ni en sus formas, ni en sus materiales, ni en su procedimiento

constructivo, resultando en construcciones mucho más variadas en general.

La variedad en las directrices empleadas en las bóvedas es grande y las luces alcanzadas en alguna ocasión (puente la Reina, Ponte Vella, Pont du Avignon, Pont du Diable, etc.) sorprenden por su magnitud. No debemos olvidar que a esta época pertenecen los dos estilos arquitectónicos, románico y gótico, que mejor han empleado la bóveda. Se construyen arcos de medio punto, apuntados y rebajados, con esbelteces que, en ocasiones, superan a las empleadas en la época romana. Las proporciones geométricas utilizadas en esta época en la mayoría de los países de nuestro entorno son, comparativamente con la época romana, mucho más variadas y menos uniformes; la esbeltez de la pila (b_p/L) oscila entre situaciones donde se llega a construir pilas cuya anchura llega a alcanzar la mitad de la luz libre de la bóveda hasta pilas cuya anchura no llega a 1/8 de la luz del puente. Sí bien es verdad que se detecta un retroceso generalizado en el trabajo de los materiales (labra, mortero, etc.) y una peor ejecución y una desconfianza en el cimientto.

Durante un primer periodo, según se expone en los trabajos de Carlos Fernández Casado, se repararon los puentes



Fig. 1. Puente de Besalú, en Girona. Puente representativo junto con el de Frías en Burgos de los puentes fortaleza construidos en los s. XII y XIII. El arco central de menor luz denota la antigua presencia de un puente levadizo de madera



Fig. 2. Puente de San Martín, en Toledo. La luz del vano central es de 38 m y fue construido en el s. XIV

romanos precedentes para pasar, ya en la época románica, a la construcción de nuevos puentes, recuperando de nuevo el dominio del medio punto, principalmente en las regiones del norte de Cataluña y Navarra, donde se tomó como prototipo el puente romano de la época republicana, formado por tramos de bóveda de medio punto con arquillos de aligeramiento sobre las pilas intermedias. Ejemplos de esta época son Besalú, Camprodón, puente la Reina y otros muchos.

Destacan en esta época la presencia de torres defensivas y de control en los puentes, muchos de los cuales eran de propiedad privada y donde se cobraban derecho de pontazgo. Es propia de esta época también la presencia de arcos de aligeramiento que aliviaban las cargas en cimentación y aumentaban la sección de desagüe y la rasante en lomo de asno.

En nuestro país, la historia de los puentes medievales está ligada a la transformación de los caminos utilizados por cristianos y musulmanes en la Reconquista y a la intervención de las órdenes monásticas en la construcción de estas sin-

gulares estructuras en el Camino de Santiago (valga como ejemplo la labor de Santo Domingo de la Calzada y San Juan Ortega).

Aún en época medieval, una vez concluida la época de los puentes románicos, todavía de técnica imperfecta, sobrevienen los puentes góticos de directriz ojival dentro de los siglos XIII a XV, que suponen una novedad tipológica con respecto a las bóvedas romanas. Existen diferentes respuestas que intentan explicar el por qué de esta nueva directriz, desde la más ligada al simbolismo religioso, a la apuntada por Carlos Fernández Casado, que justifica este apuntamiento en la directriz para compensar la utilización de cimbras de poca rigidez y el posible movimiento durante el descimbrado. Ejemplos de puentes de este periodo son, entre otros, el de Alcántara, en Toledo, o el de San Martín, también en Toledo.

El puente Vecchio ayuda a explicar la evolución final de los puentes de esta época, puentes en ciudades, con edificaciones sobre ellos, con bóvedas rebajadas y no peraltadas y con luces de hasta 30 m.



Fig. 3. Puente Vecchio. Bóvedas de 30 m de luz con un rebajamiento de 1/7

2.2 Los puentes de la Edad Moderna

La época del Renacimiento supuso una vuelta a los clásicos en todos los sentidos. Se percibe una mejora en las técnicas constructivas y la labra es mejor. Se construyen nuevos puentes, no demasiados, pero de gran factura y de una belleza formal nueva, como correspondía al interés por la arquitectura y la física propia del momento. Los puentes se empiezan a ver como objetos individuales, se conoce el nombre del arquitecto que los proyecta, son los casos de Andrés de Vandelvira, Juan de Herrera, Hernán Ruiz el Joven entre otros.

Esta época coincide con la aparición de varios tratados de arquitectura (Leonardo, Alberti, Palladio y otros). En sus trabajos se recogen, por primera vez por escrito, valores para las dimensiones de las bóvedas a través de relaciones entre el valor del canto de la bóveda y la luz (c/L) o la anchura de la pila y la luz (b_p/L).

- Palladio: $c/L = 1/12$
- Alberti: $c/L = 1/15$
- Serlio: $c/L = 1/17$

Durante esta época, se reconstruyen y reparan muchos de los puentes preexistentes; Juan de Herrera, antes de proyectar y construir sus puentes (Segovia o Galapagar, entre otros), aprendió el oficio en la reparación del puente Mayor de Orense.

Se amplía el abanico de posibilidades en la elección de la directriz del intradós al comenzar a utilizarse directrices escarzanas y elípticas. En Venecia y Florencia se construyen un gran número de bóvedas rebajadas por condicionantes de trazado.

De esta época son un gran número de estructuras emblemáticas provenientes de la sustitución de antiguas estructuras de madera por puentes de fábrica en las principales ciudades




**GRUPO
PUENTES**



Fig. 4. Puente de Almaraz. Pedro de Uría. S. XVI



Fig. 5. Puente de Santa Trinitá. Obra de Ammanati en el s. XVI.
Sus bóvedas están técnicamente inspiradas en los sarcófagos de los Medicis realizados por Miguel Ángel



Fig. 6. Pont Neuf. Terminado durante el reinado de Enrique IV en 1607, fue el primer puente de piedra en París sin viviendas en su estructura para no entorpecer la visión del Louvre. Durante mucho años fue más que un puente, en él se daban cita puestos ambulantes, artistas callejeros (acróbatas, tragafuegos, músicos...), charlatanes y curanderos. También eran habituales en la zona, estafadores, ladrones y carteristas por lo que, durante un tiempo, llegó a contar con su propia horca

y capitales de Europa (Pont Neuf, Stari Most, Fleischbrücke, etc.), puentes que comienzan siendo estructuras extramuros pero que pronto quedan insertadas dentro de la ciudad.

Del mismo modo que se percibe una vuelta a las proporciones geométricas de la época romana, en la cimentación resurge de nuevo la cimentación pilotada. Esto no quiere decir que la cimentación superficial se suprima totalmente, sino que sólo es elegida cuando las condiciones del terreno lo permitían. Existe una gran diversidad de técnicas y reglas para el proyecto de las cimentaciones basadas en un empirismo total, pero la dificultad sigue residiendo en el conocimiento geotécnico, en definitiva, en saber cuándo el terreno permite una u otra cimentación.

En nuestro país, esta época está ligada a los reinados de Carlos I y Felipe II, donde quizás el puente de Almaraz proyectado por Pedro de Uría es su mejor ejemplo. Sus 38 m

de vano central sorprenden si se comparan con puentes contemporáneos en otros países, por ejemplo el puente de Rialto tiene un vano de 27 m y el de Santa Trinitá 29 m.

El s. XVII comienza con un esfuerzo en toda Europa por renovar y mejorar sus vías de comunicación. Este esfuerzo comienza en Francia y rápidamente se contagia por toda Europa. Este impulso constructivo, donde Francia sirve de inspiración, comienza en España a mediados del s. XVII y alcanza su máxima expresión en el s. XVIII, con la llegada de Carlos III.

Es esta una época antecesora de la revolución que supuso el s. XVIII para los puentes, en ella se empiezan a introducir grandes mejoras en las técnicas constructivas, especialmente en la ejecución de cimentaciones complicadas; se comienza a emplear varios tipos de fábricas en un mismo puente (ladrillo y sillería), comienzan los decorados barrocos



Fig. 7. Puente Over. Gloucester. T. Telford. 1827. Luz de 45,70 m

y se detecta un interés por las formas hidrodinámicas en los tajamares.

3. La irrupción del conocimiento científico-técnico. Los siglos XVIII y XIX

Al igual que ocurrió con otras tipologías, en el proyecto y construcción de los puentes arco de fábrica la teoría y práctica no han ido siempre de la mano. El desarrollo teórico de las entonces novedosas teorías de la elasticidad y resistencia de materiales que, por otra parte, se venían produciendo desde el s. XVII con Galileo, Hooke, Mariotte, Bernouilli, Euler, Lagrange, Coulomb y resto de ingenieros matemáticos basado, en gran medida, en el propio desarrollo de las matemáticas no tuvo aplicación práctica inmediata en los puentes arco de fábrica.

No es quizás hasta la aparición de las escuelas politécnicas de finales del s. XVIII y principios del s. XIX, cuando la

teoría y práctica se empiezan a unir de manera indisoluble, produciéndose un doble acercamiento: por una parte, los conocimientos teóricos ayudan a entender, explicar y mejorar las prácticas constructivas adoptadas hasta la fecha y, por otra parte, las prácticas constructivas espolean, motivan y sirven de campo de experimentación a las nuevas teorías.

Este doble acercamiento teórico-práctico duró más de un siglo en el caso de los puentes arco de fábrica, ya que el peso e inercia que tenía la praxis constructiva en estas estructuras por un lado, junto con la todavía juventud de los nuevos descubrimientos y desarrollos teóricos por otro, generó un periodo de transición y convivencia largo y fructífero de dos maneras de entender y proyectar estas estructuras. Otra razón que ayudó a que se mantuviera una metodología de análisis diferente para los arcos, bóvedas y otros elementos de fábrica es el hecho de que, al estar constituidas por piezas independientes ligadas por mortero-

ro, la aplicación de las reglas de los medios continuos se pusiese en duda.

Además, el desarrollo teórico no fue único. Como se muestra a continuación, durante estos siglos convivieron dos maneras de entender el proyecto y construcción de estas singulares estructuras, la clásica y específica de ellas y la nueva, que sirvió para entender y analizar también las estructuras metálicas y de hormigón.

3.1. Evolución en el conocimiento de las estructuras de fábrica. Teoría general de estabilidad

Las primeras noticias que se tienen sobre el análisis científico-técnico y de estabilidad de las bóvedas de fábrica datan de finales del siglo XVII y principios del XVIII. Desde este momento y hasta finales del s. XIX diferentes autores profundizan en aspectos como la determinación analítica y gráfica de la línea o curva de presiones, los posibles mecanismos de colapso, la contribución estructural del relleno, etc.

Se recogen a continuación de manera resumida las grandes aportaciones de los diferentes ingenieros relacionados con los aspectos teóricos de la estabilidad de las bóvedas de fábrica y con el proyecto de puentes:

- La Hire, 1712. Estudio de la estabilidad de bóvedas desde un punto de vista científico, aunque partiendo de hipótesis inexactas.

- Couplet, 1729. Determinación de la junta de rotura (*joint of rupture*) en una bóveda cualquiera.

- Coulomb, 1775. Desarrolla una teoría que se apoya sobre bases científicas sólidas pero que es de difícil aplicación práctica.

- Gauthey y Rondelet realizan experimentos para conocer las formas de colapso de bóvedas y arcos.

- Boistard, 1796. Estando encargado de la construcción del puente de Nemours, proyectado por Perronet, realiza una serie de ensayos a escala real en los que constata la rotura de las bóvedas por la formación de articulaciones en ellas.

- Lamé y Clapeyron, 1823. Publican sus estudios sobre estabilidad de las bóvedas basándose en los ensayos de Boistard.

- Gerstner (1830). Realiza investigaciones sobre la línea de presiones.

- Navier, 1833. Determinación de la regla del tercio central: "La curva de presiones en una bóveda de fábrica debe pasar siempre por un punto de la clave situado a un tercio de la altura de la junta a partir del trasdós, y debe pasar también por el punto de la junta de rotura, situado al tercio de su longitud a contar desde el intradós".

- Moseley (1839). Demuestra que la línea de presiones y la línea de resistencia son curvas diferentes.

- Méry, 1840. Tras sus estudios es posible determinar analíticamente las condiciones de equilibrio de una bóveda de manera general. No obstante, su aplicación práctica para un caso concreto sigue siendo compleja.

- Scheffler, 1853. Independientemente de los estudios llevados a cabo en Francia, en Alemania Scheffler desarrolla el principio de mínima resistencia, según el cual la curva de presiones real es aquella en la que las reacciones son mínimas.

- Culmann, 1866. Su teoría sostiene que la curva de presiones real es aquella cuya posición se aproxime lo más posible a la línea que une los puntos medios de las juntas de las dovelas, condición de tensión mínima.

- Clapeyron, 1867. Desarrolla un método para el trazado de la curva de presiones que se basa en la imposición de tres condiciones:

o La presión máxima en un punto cualquiera de una junta entre dovelas debe ser siempre inferior al límite impuesto por seguridad.

o La curva de presiones debe estar siempre contenida entre el intradós y el trasdós de la bóveda.

o Las dovelas deben permanecer siempre en equilibrio sobre sus juntas y el rozamiento debe impedir su deslizamiento.

- La contribución de Clapeyron es modificada por Szyskowski para un nuevo método de trazado de la curva de presiones, en 1877.

3.2. Evolución en el conocimiento de las estructuras de fábrica. Teoría general de estructuras

Casi al mismo tiempo y en paralelo, el desarrollo de las matemáticas permitió el desarrollo de una nueva teoría general de estructuras no pensada sólo para las estructuras de fábrica y que fue permitiendo un análisis más general de todo tipo de elementos estructurales y materiales. Este desarrollo estuvo basado, entre otras, en las siguientes aportaciones:

- Hooke, 1673. Ley de proporcionalidad de esfuerzos y deformaciones.
- Bernouilli, 1700. Determinación de la elástica, hipótesis de las secciones planas.
- Coulomb, 1776. Primer análisis exacto de la flexión en vigas. Estudio del esfuerzo cortante.
- Young, 1807. Módulos de elasticidad; teoría de la deformación ante esfuerzo tangencial.
- Cauchy, 1822. Ecuaciones fundamentales del equilibrio elástico; direcciones principales y coeficientes elásticos.
- Navier, 1825. Teoría de la elasticidad en sólidos tridimensionales; hipótesis de las secciones planas; teoría definitiva de las vigas.
- Poisson, 1828. Fundador de la teoría de la elasticidad junto con Cauchy y Navier.
- Lamé, 1852. Desarrollo de la teoría de la elasticidad y aplicación a casos particulares.
- Saint-Venant, 1855. Teoría de la torsión; coeficiente de dilatación transversal.
- Clapeyron, 1857. Teorema de los tres momentos. Expresión de la energía interna de un cuerpo elástico.
- Rankine, 1858. Distribución de los esfuerzos cortantes. Fórmula de la resistencia de columnas.
- Maxwell, 1864. Principio de las deformaciones recíprocas; diagrama para la resolución de entramados.

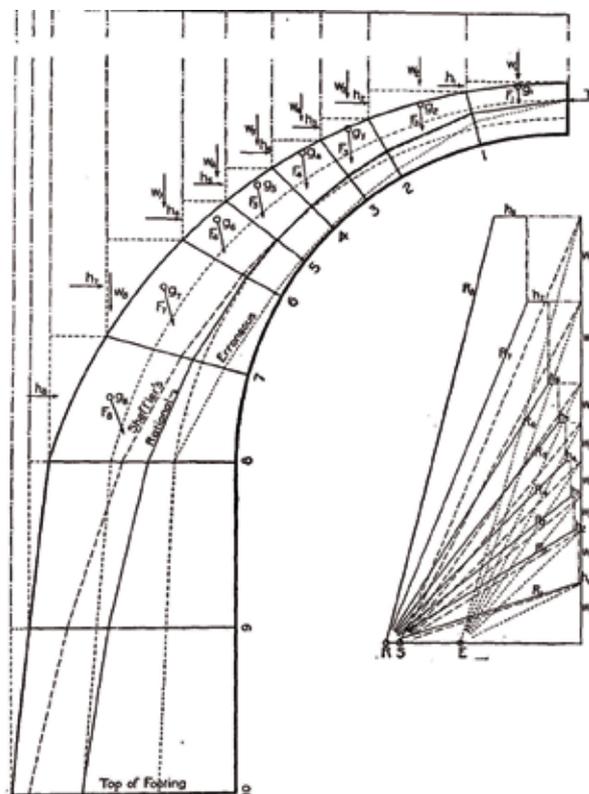


Fig. 8. Obtención de la línea de presiones en un puente teniendo en cuenta la acción horizontal del relleno. Comparación de la teoría racional y la de Scheffer.

- Mohr, 1874. Deducción del principio de las deformaciones recíprocas por el método de los trabajos virtuales. Representación gráfica del estado elástico.
- Castigliano, 1875. Principio del mínimo trabajo elástico.
- Müller Breslau, 1886. Sistematización de los procedimientos de cálculo de estructuras hiperestáticas.
- Timoshenko, 1930. Estudio de los efectos dinámicos y equilibrio elástico de estructuras.

Al finalizar el siglo XIX, Castigliano (1878) publica un libro para el departamento de mantenimiento de puentes de la Red Ferroviaria en el Norte de Italia. El análisis de dos estructuras de la red, una situado en la línea Milán-Venecia, puente sur l'Òglio y otra en Doire del ingeniero Mosca, abren una nueva vía para el análisis de las bóvedas



Puente Infante D. Henrique sobre el río Duero. Oporto.

Luz: 280m

IDEAM

Ingeniería de Puentes y Estructuras

Jorge Juan, 19 - 3º - 28001 Madrid
Tel. 91 435 8084 - e-mail: general@ideam.es
www.ideam.es

ESPAÑA ■ BRASIL ■ MÉXICO

Presidente: Francisco Millanes Mato

Director General: Luis Matute Director de Ingeniería: Miguel Ortega

Principales campos de actuación:

- Puentes de Carretera, Autovías, Líneas de Ferrocarril y de Alta Velocidad
- Pasarelas Peatonales
- Edificación Singular
- Rehabilitación e Inspección de Puentes y Estructuras
- Asistencias Técnicas y Direcciones de Obra

Actividades:

- Estudios Previos, Anteproyectos y Proyectos de Licitación
- Peritajes y Asesorías Técnicas
- Auscultación e Instrumentación de Estructuras
- Control de Calidad de la ejecución de estructuras
- Supervisión y Control de Proyectos y Ejecución de Obras

Asistencias Técnicas:



Luz: 324m

L.A.V. Madrid-Extremadura
Viaducto de Alcántara
A.T. a la Dirección de Obra



Luz: 384m

L.A.V. Madrid-Extremadura
Viaducto sobre el río Almonte
Asesoría Técnica a FCC



Luz: 220m

Autovía de la Plata AP-66
Viaducto sobre el río Tajo
A.T. a la Dirección de Obra



Luz: 184m

Autovía de la Plata AP-66
Viaducto sobre el río Almonte
A.T. a la Dirección de Obra



Fig. 9. Construcción de un puente carretero

de fábrica, dando entrada al análisis elástico de manera definitiva.

3.3. La convivencia de ambas teorías en el proyecto de los puentes arco de fábrica

En general, e independientemente de cuales fueran finalmente en cada caso, las reglas o bases teóricas en las que se basara el proyecto y dimensionamiento de estos puentes, es posible concluir que el proyecto de estas estructuras se ayuda en gran medida en la experiencia de los “hechos consumados”, es decir, en el número de estructuras existentes que se encuentran cumpliendo con su tarea, siendo prueba evidente de su estabilidad, por no hablar de la historia de colapsos de estas estructuras que también dan luz sobre el comportamiento de las mismas.

Durante estos siglos, la metodología de proyecto de estas estructuras se estableció de la siguiente forma:

- predimensionando las bóvedas según unas reglas empíricas o de reglas de buena práctica;
- comprobando, posteriormente, las bóvedas con las teorías clásicas existentes basadas en la estática gráfica o en las nuevas basadas en la resistencia de materiales y elasticidad.

La búsqueda de la mejor directriz para el intradós y la definición de la magnitud del canto, eran las variables más importantes en el proyecto de los puentes arco de fábrica. Los complejos análisis de estabilidad parten de unas dimensiones previas que son el resultado de la aplicación de unas reglas de proyecto propuestas, en este caso, en la literatura científica. El siglo XIX es rico en publicaciones sobre la elección de la directriz adecuada, el valor del canto en clave y en arranques, las dimensiones de pilas y estribos, etc. Estas reglas de naturaleza empírica, que si bien es verdad dejan de lado variables de cierta importancia en el proyecto, como el valor de la resistencia de la fábrica y su aparejo, el peso específico, el tipo de relleno y su compactación, el proceso de descimbrado, la cimentación, y las sobrecargas, estaban basadas en estudios detallados de la construcción tradicional y eran validados por los técnicos y científicos del momento. Estas reglas también reflejaban los gustos estéticos de la época.

La aplicación de estas fórmulas requería de una comprobación posterior de la estabilidad de las bóvedas. Conocer que existían otras estructuras con las mismas dimensiones podía conseguir que se aceptará como válida la afirmación de que la estructura fuera segura, pero ¿cuánto de segura? Resumiendo, dentro del proyecto de bóvedas de fábrica, la



Fig. 10. Puente de ferrocarril de Frómista. Este puente ferroviario que salva el Canal de Castilla permite la vista simultánea de las dos infraestructuras que revolucionaron el proyecto y construcción de estos puentes

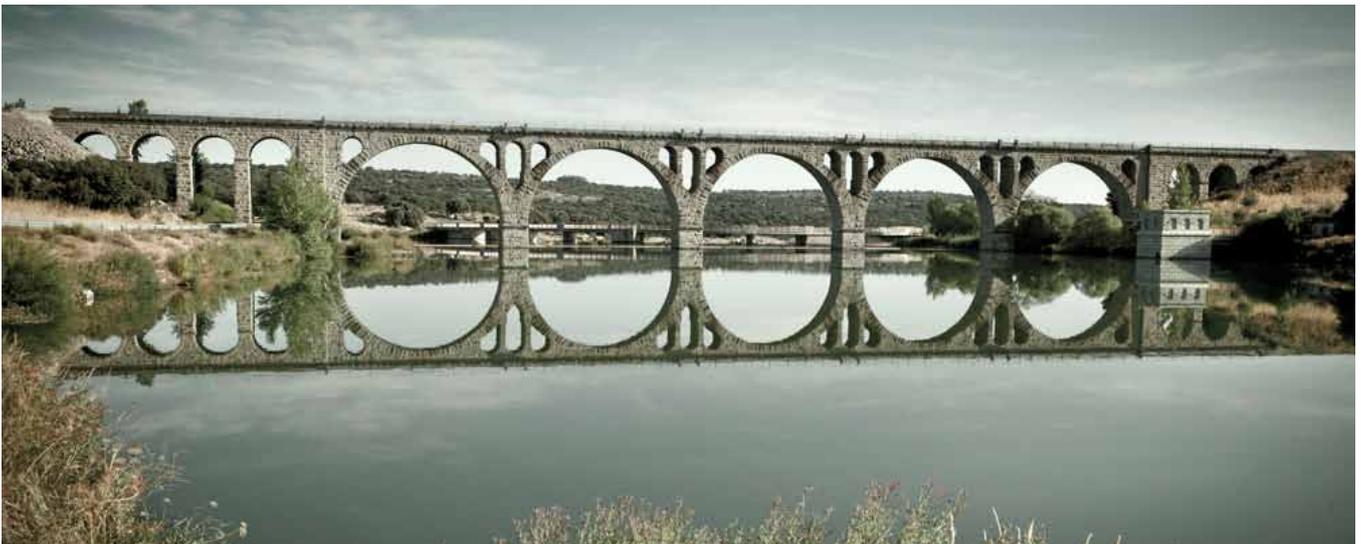


Fig. 11. Puente del Adaja. Línea Ávila-Salamanca

teoría era interpretada por la experiencia, pero la experiencia fue analizada para mejorar la teoría. Todo este desarrollo iba a tener en el proyecto y construcción de los canales y el ferrocarril un campo perfecto de aplicación y prueba.

4. La aparición del ferrocarril y los canales, el nuevo periodo de esplendor de los puentes arco

Con la aparición de los canales y el ferrocarril, las estructuras debieron adaptarse a unos requerimientos más complejos de trazado, es decir, la estructura ya no mandaba como en el caso de las carreteras y caminos donde el trazado se modificaba para conseguir una estructura más sencilla de ejecutar. Esta sumisión de la estructura obligó a proyectar y construir estructuras curvas y esviadas, por una parte, y a viaductos de gran longitud con pilas altas, por otra.

La adopción de esta tipología, antigua y conocida, por los nuevos conocimientos teóricos y prácticos de la época, junto con la aparición de los retos técnicos y constructivos provenientes de las nuevas infraestructuras (canales y ferrocarril), dio lugar a un nuevo periodo de esplendor para estos puentes, a una segunda juventud y a la generación de muchos de sus mejores ejemplos.

Es muy importante resaltar que los puentes arco de fábrica son estructuras cuya génesis es muy anterior al periodo industrial, pero es precisamente en este periodo donde adquieren un nuevo significado y desarrollo, tanto teórico (concepción y proyecto) como práctico (construcción), nunca visto hasta entonces (salvo quizás en la época romana).

Tal y como ya se ha indicado en el punto anterior, es el s. XVIII y XIX el periodo donde quizás se produzcan los avances más importantes relacionados con la ingeniería en general y con la ingeniería civil en particular. Este periodo culmina con la creación de las escuelas de ingenieros civiles y de los correspondientes cuerpos de la Administración, que posibilitan la creación y extensión de las obras públicas pertenecientes a la infraestructura ferroviaria por todo el territorio de manera eficaz y bajo criterios uniformes que descansaban en conocimientos técnicos.

La irrupción de proyectistas especializados con conocimientos técnicos fundados y consensuados, deriva en una construcción racional y fiable que permite abordar el proyecto y construcción de obras que hasta la fecha parecían retos inalcanzables. Sólo el establecimiento de las nuevas reglas de juego técnicas consensuadas, el establecimiento de nuevos cuerpos de fun-

cionarios y técnicos dentro del nuevo entorno social, político y económico anteriormente mencionados, hizo posible la construcción de las grandes infraestructuras de esta época.

5. La aparición del hormigón y el final de una época

Es en esta época cuando se vuelve a descubrir el hormigón gracias al hallazgo del cemento hidráulico natural y del cemento Portland. Se recuperó la técnica de su dosificación y amasado, empleándose en primera instancia en diques y cimentaciones. Rápidamente, su uso se extendió a las grandes obras civiles y por supuesto a los puentes de bóvedas.

En los primeros momentos, el nuevo material es aplicado a las formas estructurales ya conocidas, el arco y la bóveda, sin apenas sacar provecho de las nuevas prestaciones del nuevo material. Se ejecutan bóvedas de hormigón imitando las antiguas bóvedas de fábrica, con las mismas dimensiones, incluso se llegan a fabricar sillares de hormigón en masa simulando una sillería de piedra artificial. Esto permitía aligerar la cimbra ya que ésta sólo tenía que soportar la primera bóveda de sillares. Posteriormente se hormigonaba sobre ella el resto de la bóveda.

Poco a poco, el hormigón se fue liberando de la tradición y especificidades de la fábrica y se fue abriendo a las nuevas posibilidades. Aunque la construcción de bóvedas de hormigón heredó los métodos constructivos de sus predecesoras de fábrica, entre ellos las cimbras para soportar las bóvedas durante su construcción, se idearon procesos constructivos para reducir la importancia de la cimbra en la ejecución de bóvedas de hormigón en masa. Uno de estos métodos es la construcción de la bóveda por roscas; otro es el empleo de armaduras rígidas, cimbras metálicas que quedan embebidas en el hormigón, aprovechándose la rapidez de su puesta en obra.

La desaparición progresiva de canteros, el elevado costo de materiales y mano de obra, junto al apogeo en el proyecto de estructuras metálicas y de hormigón, hicieron que el proyecto y construcción de los puentes arco de fábrica, tipología que nos había acompañado durante los últimos 24 siglos, desapareciera totalmente a partir de 1930 salvo en China donde aún hoy se proyectan y ejecutan puentes de fábrica por considerarlos funcionales y económicos.

El empleo desinhibido del hormigón armado, gracias al asentamiento de las nuevas teorías de la resistencia de materiales y el impulso dado por ejemplos como el puente de Martín Gil, elevó el proyecto de los arcos a otra categoría, pero eso ya es otra historia. **ROP**