

**JORNADAS SOBRE
PUENTES DE BÓVEDA DE FÁBRICA
Madrid, 5 de Octubre de 2000**

**IDENTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS
DE LOS PUENTES DE FÁBRICA**

**José M. Simón-Talero Muñoz
José A. Torroja, Oficina Técnica, S.A.**

En nuestra cultura occidental la bóveda de fábrica ha sido utilizada para salvar los accidentes del terreno que se encontraban al discurrir los caminos entre diferentes poblaciones. Así ha sido durante al menos 22 siglos, los que nos llevan desde la época romana hasta los albores del pasado siglo, el XX.

El Siglo de las Luces y las innovaciones tecnológicas del siglo XIX impulsaron enormemente el conocimiento científico que, en el campo de la ingeniería de puentes, se plasmó en la definición de un cuerpo teórico que sirvió de base para que la teoría del equilibrio y los métodos energéticos pudieran ser empleados en el cálculo de las estructuras.

La revolución industrial y la aparición del ferrocarril en el siglo XIX llevó, a la utilización de nuevos materiales para la construcción, tales como el acero y el cemento Pórtland por una parte, y por otra a la modificación de las solicitaciones a considerar.

Por último, en el pasado –o a punto de extinguirse - siglo XX el empleo masivo del hormigón armado o pretensado y del acero estructural de alta resistencia ha llevado el campo de aplicación del elemento resistente "viga" a copar la mayoría de las realizaciones. Adicionalmente, los sucesivos incrementos en las solicitaciones y el gran auge de las comunicaciones, que provocó una vasta y urgente necesidad de

vías rápidas y de gran capacidad, han conducido al práctico desuso de la bóveda de fábrica como elemento estructural resistente.

Así, los ingenieros hemos abandonado la tradición de los arcos y los sillares, habiendo sido sustituidos por el uso de lo recto y del continuo representado por las vigas.



Foto 1: Puente de Tordesillas



Foto 2: Puente sobre el río Ulla

Sin embargo, aún hoy siguen en pie multitud de obras de paso de nuestra red, tanto de carreteras como de ferrocarril, que mantienen la tipología de la bóveda de sillería, ladrillo o mampostería, haciéndonos ver aún hoy su vigencia.

Es decir, hoy no "proyectamos" bóvedas de fábrica aunque, convivimos con ellas y observamos los efectos que el paso del tiempo y de las cargas, para las que no fueron construidas, generan en ellas. Además, sólo levemente conocemos su comportamiento estructural siendo incluso incapaces, en muchas ocasiones, de referirnos con los nombres correctos a sus elementos constructivos.

Las líneas que siguen hablan de la terminología empleada en el lenguaje "bovedil", de los elementos constructivos de los puentes de bóveda de fábrica y de las principales dimensiones y reglas de proyecto que nuestros predecesores emplearon para su diseño, para su proyecto y para su ejecución.

Así, hablaremos siguiendo a J.E. Ribera (Puentes de Fábrica y de hormigón armado, 1929) de las tres partes de los puentes de fábrica:

- los estribos y pilas,
- las bóvedas, y
- los tímpanos

a los que hay que añadir otros dos:

- el relleno, y
- los cimientos

1.- LOS ESTRIBOS DE FÁBRICA

Se define como ESTRIBO la "*obra de fábrica que contrarresta el empuje lateral de una bóveda o arco y que constituye el apoyo extremo de los arcos principales*". (Primer glosario de términos empleados en puentes de carretera; AIPCR – 1999, en adelante GLOSARIO).



Foto 3: Estribos de sillería del Puente sobre el río Lozoya

Los estribos deben resistir por gravedad el empuje horizontal de las bóvedas, ya que, del lado de la seguridad, no se solía considerar el empuje del terreno que contrarresta la carga horizontal del arco extremo. Los espesores en el pie del estribo si se dimensionan, sin embargo, para contener el empuje de tierras del terraplén de acceso. Hasta 40 m de luz Leveillé presentó unas fórmulas empíricas (cuya representación gráfica se adjunta) para determinar el espesor de estribos en bóvedas escarzonas y de medio punto.

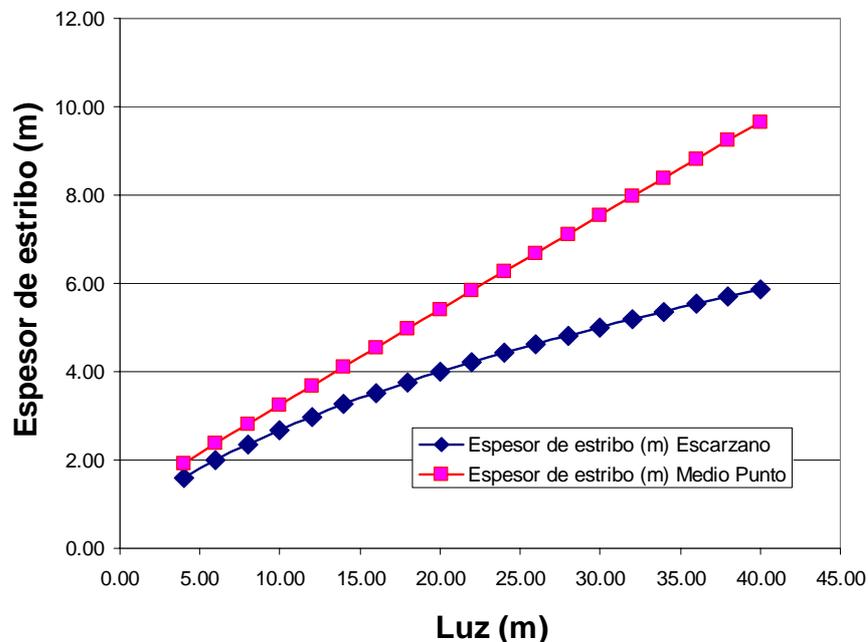


Gráfico 1: Espesor en pie de estribos según Leveillé

En lo referente a los aparejos, se establecen las juntas horizontales en los paramentos. Sin embargo, en el interior de los macizos deben inclinarse las hiladas en la dirección -aproximada- de los empujes.

En cuanto a los materiales, era frecuente rellenar el estribo, que se recuerda funciona como muro de gravedad, con materiales no escogidos o con hormigón ciclópeo, reservando para el paramento el sillarejo y las mamposterías careadas o concertadas.

2.- LAS PILAS DE FÁBRICA

Una PILA es un "elemento vertical situado entre dos vanos o bóvedas consecutivas de un puente" (Glosario).

Los espesores en arranques de pilas han ido variando a lo largo de los tiempos. Con los romanos (ver figura) los espesores de pilas eran importantes (0,3L, aproximadamente).

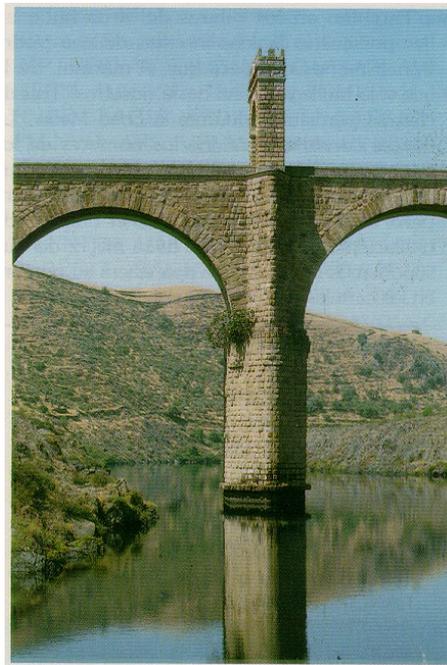


Foto 4: Pilas romanas del Puente de Alcántara

En la época medieval (ver foto), aumentan estos espesores hasta llegar, a veces a pilas de un grosor igual a la mitad de la luz del paso a salvar ($e = 0,5L$) quizá para equilibrar empujes disimétricos de las bóvedas adyacentes o quizá para compensar deficiencias en los cimientos, dando a éstos mayor superficie (ver figura).

De Perronet (siglo XVIII) en adelante las pilas se estilizan, siendo habitual espesores del entorno del 10% de la luz a salvar (ver foto).



Foto 5: Pilas medievales del Puente del Paso Honroso sobre el río Esla

En lo que se refiere a los ataluzamientos de las pilas, fue práctica habitual mantener la sección constante hasta alturas de unos 8 ó 10 m. Para alturas mayores, y hasta 20 m, se solía aumentar el canto transversal con pendiente 1/100 y el longitudinal con pendiente 1/50.



Foto 6: Pilas modernas del Puente sobre el arroyo de Valdelobos

En cuanto a los materiales, era habitual emplear la sillería con juntas horizontales en todo el paramento en puentes monumentales, o sólo en los tajamares y frentes de pilas en los puentes ordinarios; en los paramentos interiores solía bastar con mampostería careada. Las pilas se rellenaban con calicanto (hormigón ciclópeo formado por mortero de cal grasa y grandes cantos rodados) o con mortero de cemento Pórtland.

3.- LAS BÓVEDAS

La BÓVEDA es, según J.E. RIBERA, "*el elemento resistente de los puentes abovedados de fábrica*". Hablando de resistencia, mencionar que habiendo construido a principios del siglo XX un nuevo puente sobre el río Tormes en Salamanca y para honor del puente romano construido 1900 años antes, rezaba en él un cartel advirtiendo:

"Atención, vehículos de más de 18 Ton, por puente romano".

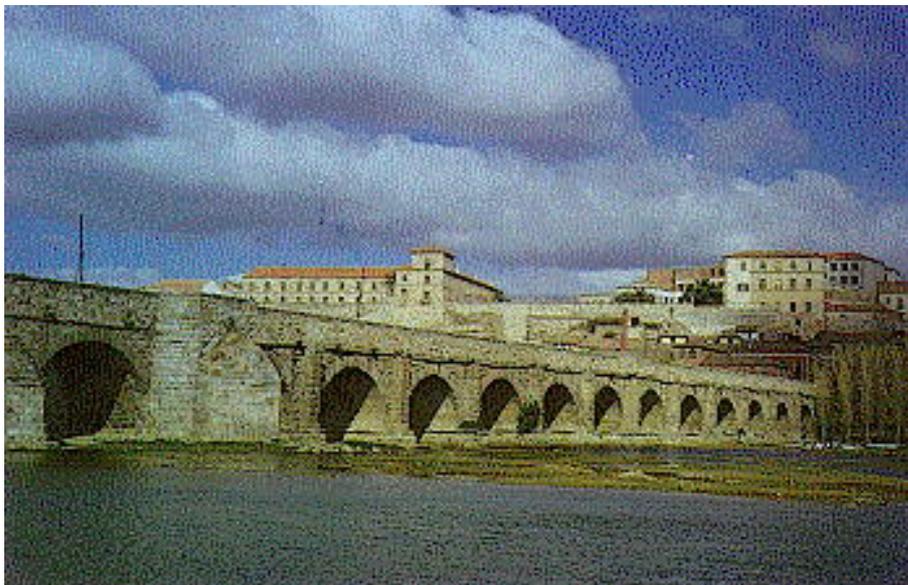


Foto 7: Puente romano sobre el río Tormes

Dos son los principales problemas de diseño en lo concerniente a la capacidad portante de las bóvedas: su forma y su canto.

Tradicionalmente las curvas circulares han sido las más empleadas, aunque también hay ejemplos de intradós elíptico.

Los romanos y medievales emplearon con gran profusión la *bóveda de medio punto* en que el rebajamiento (relación flecha/luz) del intradós era 0,5, resultando la reacción en pilas vertical.

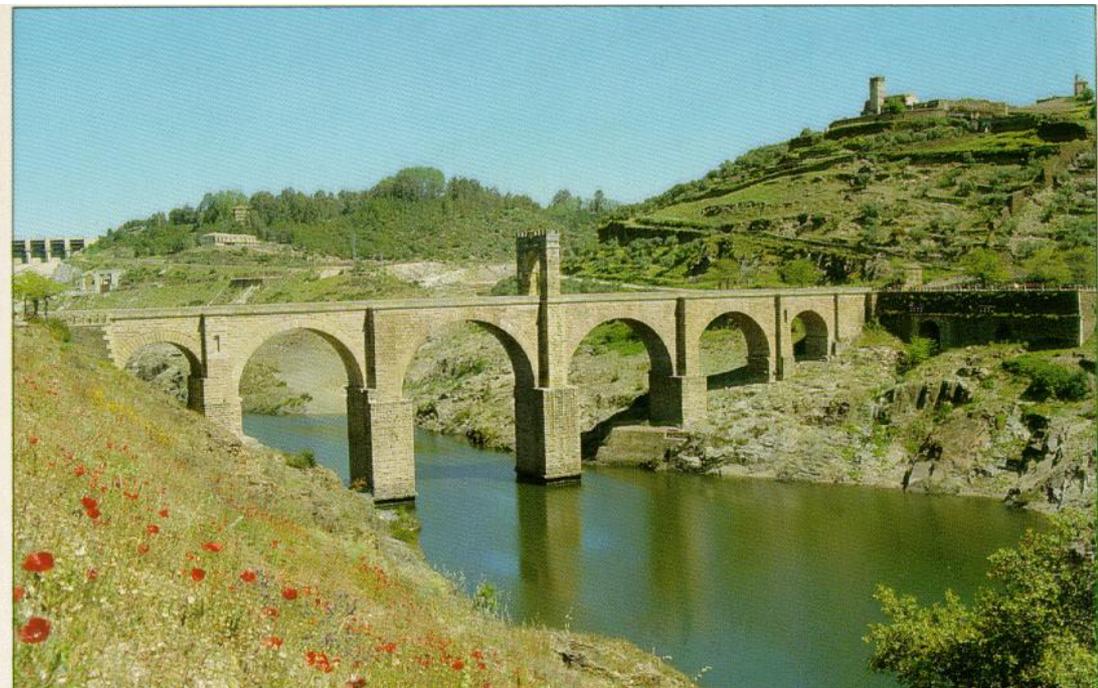


Foto 8: Bóvedas de medio punto del puente romano de Alcántara

Con un único radio pero desarrollos de menos de 180° se llega a las *bóvedas escarzanas* en que el rebajamiento desde $1/3$ hasta $1/10$ viene justificado para ajustarse a rasantes no muy elevadas, para respetar condiciones de desagüe, o por meras condiciones estéticas.

También han sido empleadas en siglos pasados las *bóvedas carpaneles* (formadas por una sucesión de círculos de diferentes radios) y las *bóvedas elípticas* que dan rebajamientos menores de $1/2$, y tangente vertical en los arranques de pilas y estribos.



Foto 9: Bóveda escarzana del Puente sobre el río Manol

Aquellas bóvedas con rebajamientos superiores a $\frac{1}{2}$ se llaman peraltadas. Las *bóvedas ojivales*, profusamente empleadas en la arquitectura gótica, no lo son tanto en los puentes, quizá porque se ajustan malamente al antifunicular de una carga distribuida, como es el caso del peso propio, predominante en el dimensionamiento de muchas bóvedas.



Foto 10: Bóveda ojival del puente de Tordesillas

En lo referente al espesor en clave osciló con los romanos entre 1/10 de la luz para luces menores de 15 m y 1/20 para dimensiones mayores, aproximadamente. Este incremento de la esbeltez está seguramente justificado para que no aumente en exceso el peso de los sillares a utilizar en la construcción de la bóveda.

Durante la Edad Media la esbeltez se reduce, volviendo a sus "valores romanos" con Palladio, Alberti y Serlio que en el Renacimiento utilizan esbelteces entre 1/12 y 1/17 (esbeltez = relación canto en clave/luz).

El espesor de la clave de la bóveda fue objeto de numerosos estudios a lo largo de los siglos XVIII y XIX en que casi todos los grandes ingenieros propusieron "su fórmula". Entre estas expresiones se adjunta la representación gráfica de las propuestas por Dupuit, Perronet, Leveillé y Sejourné, entre otros (figuras tomadas de "Reglas de Proyecto. Teoría de la estabilidad en bóvedas. Método de Análisis" – José A. Martín Caro-2000).

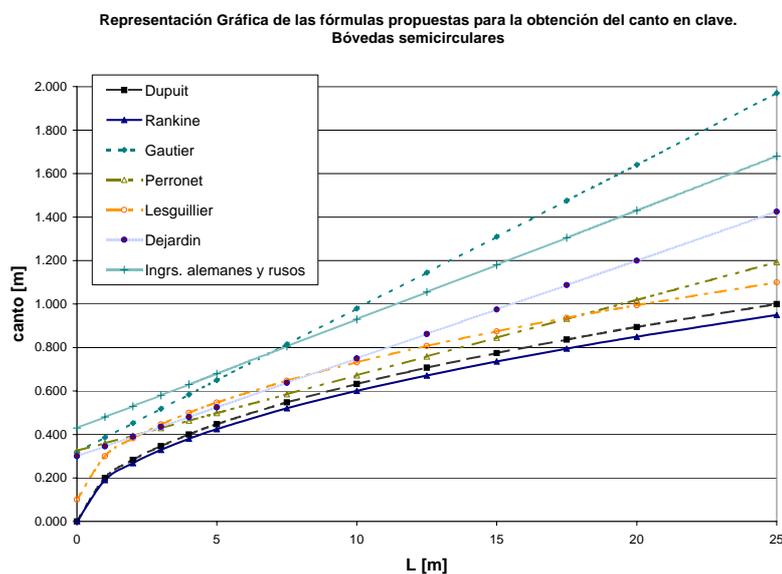


Gráfico 2: Canto en clave en bóvedas semicirculares según diversos ingenieros

Así como en los grandes muros y en las pilas la preponderancia de las presiones verticales lleva a las hiladas horizontales, los aparejos de las bóvedas deben acomodarse a la ortogonalidad de la resultante de las cargas sobre las bóvedas. Dada la presencia de sobrecargas de uso la línea de presiones varía, por lo que es

preciso adoptar inclinaciones medias de las hiladas; así, en general, se disponen las juntas en perpendicular al intradós de la bóveda.

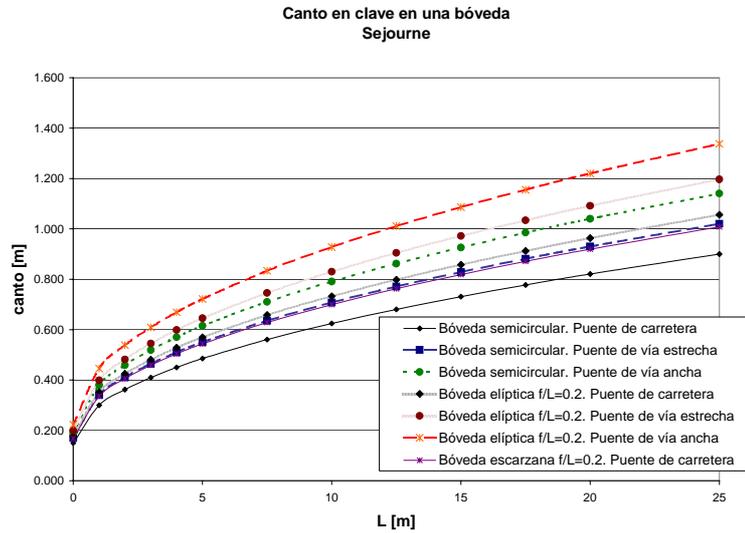


Gráfico 3: Canto en clave según Sejourné



Foto 11: Juntas ortogonales al intradós en el Puente sobre el arroyo de Confort

En bóvedas de ladrillo de no mucha luz se imita el aparejo de las bóvedas de sillería. Sin embargo, en luces importantes el canto de las bóvedas crece, con lo que el espesor de las juntas debe ser creciente desde el intradós al trasdós para compensar el grueso constante de los ladrillos. Por ello, en estos casos, se suelen aparejar los ladrillos por "roscas" (ver foto), lo cual permite, además, importantes ahorros de cimbra, ya que la primera rosca sirve de soporte al resto durante la construcción.



Foto 12: Triple rosca en bóveda de ladrillo del Puente de Arevalillo

Por cierto, que en el caso de bóvedas de sillería o mampostería, las dovelas sólo se desbastan y labran en las caras vistas apareciendo una gran irregularidad en el trasdós (ver foto). Para evitar que el agua que se filtra a través del relleno se acumule en los huecos del trasdós se debe regularizar éste por medio de una capa más o menos impermeable. Así se dispone la llamada *contrarrosca* que es una capa de mortero, de cal antiguamente y después hidráulico, que da continuidad de pendientes en el trasdós de la bóveda y conduce al agua a los mechinales dispuestos al efecto.



Foto 13: Irregularidades del trasdós de una bóveda (fotografía tomada de RIBERA)

4.- LOS TÍMPANOS

Seguendo el Glosario los tímpanos son "*muros de altura variable situado sobre la boquilla y coronado por la imposta que contiene los rellenos colocados sobre las bóvedas de un puente*".

La función fundamental del tímpano es contener el relleno, con lo que se podrá contar con la acción estabilizadora de las compresiones que genera el peso del relleno sobre la bóveda. Además la, en general, imperfecta conexión tímpano-bóveda hace que aquél rigidice a ésta haciéndole trabajar, en cierto modo, como viga de gran canto.

En general los tímpanos son siempre macizos para puentes de luz menor de unos 20-30 m (ver foto 18), aligerándose en ocasiones (ver foto 19) para luces mayores.



Foto 14: Tímpano macizo del Puente de A Ramallosa

Cuando se tiene alturas de tímpanos importantes, su espesor se hace creciente con la altura.



Foto 15: Tímpano aligerado del Puente de Abbassabad (Turquía)

5.- EL RELLENO

El relleno que confinado lateralmente por los tímpanos y que carga sobre las bóvedas cumple, al menos, tres cometidos: habilitar una rasante diferente a la de la bóveda, transmitir y repartir las cargas de uso a la bóveda resistente y estabilizar ésta frente a posibles flectores producidos por las cargas de uso, al incrementar el axil de compresión en la bóveda.

En general, los rellenos pueden ser rígidos (hormigón ciclópeo, calicanto) o granulares, aunque a veces coexisten ambos, disponiéndose hormigón sobre las pilas y arranques de las bóvedas y un relleno granular en la zona central de las bóvedas.



Foto 16: Relleno del Puente de Pesquera