Ricardo Aroca Hernández-Ros Doctor Arquitecto www.arocaarquitectos.com
C/ Rafael Calvo nº9, 28010 Madrid 914482505 estudio@arocaarquitectos.com

Título Cimbrado y descimbrado de puentes en el siglo XVIII Perronet
Autores Esperanza González. Ricardo Aroca.
Medio Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción
Fecha 2005/01/28

Cimbrado y descimbrado de puentes en el s. XVIII: Perronet

Esperanza González Redondo
Ricardo Aroca Hernández-Ros

En la construcción de puentes en Francia en el s. XVIII, en aquellos que precisaban de la construcción de grandes bóvedas, era necesario tener gran experiencia y esmero en la elección de los materiales, en la exactitud del aparejo y en el cuidado con el que se tallaban y colocaban las dovelas, pero el verdadero éxito de la construcción resultante estribaba en la forma de cimbrarlos y descimbrarlos evitando así las deformaciones excesivas o incluso el colapso. En este trabajo se hace un estudio sobre las distintas soluciones utilizadas por Perronet en la construcción de numerosos puentes en Francia en el s. XVIII.

Este trabajo se compone de tres apartados esenciales: 1) el cimbrado de los puentes, 2) los movimientos de las bóvedas durante su construcción y los asientos resultantes, y 3) el descimbrado. En el primero, se explica la construcción de las cimbras de madera. a) la disposición de los elementos de las armaduras, b) las piezas principales y sus dimensiones, c) el ensamblaje de las piezas y d) la formación de las armaduras; en el segundo los movimientos que sufren las cimbras a medida que se van cargando con las distintas dovelas observando que bajan en la zona de los apoyos y tienden al mismo tiempo a subir en la zona de la clave y la forma de controlar estos movimientos para que no se abran excesivamente las juntas; y en el tercero, el descimbrado de las bóvedas una vez cerrados los arcos y cuando el mortero ha adquirido la consistencia suficiente, en el que se expone el orden seguido en la retirada de los calzos y los forros y siempre de forma simétrica a ambos lados de la bóveda y una vez que las bóvedas quedan libres, se retiran o se hacen caer las cimbras para finalizar la fase de descimbrado.

Perronet no sólo ha construido numerosos puentes con grandes bóvedas, sino que ha escrito varias memorias en las que se describe su trazado, construcción, y retirada una vez colocadas las claves. Este trabajo pretende acercarnos a una de estas memorias «Sur le cintrement et le décintrement des ponts» (*Mém. Par*. 1773).

Perronet: sus aportaciones a la ingeniería estructural

El trabajo de Perronet (1708–1794), el gran ingeniero del siglo de las luces, es parte del desarrollo general de la ingeniería de las estructuras francesa del s. XVIII. Su obra es de gran envergadura y estriba principalmente en las carreteras, los puentes y los canales. En su afán por construir puentes de mayor solidez, intentó disminuir la resistencia al flujo del agua reduciendo el espesor de las pilas y aumentando la separación de los arcos: mientras que lo habitualmente recomendado era que el espesor de las pilas fuera un quinto de la separación del arco, los apoyos del puente de Neuilly eran sólo la décima parte de esta separación. También es igualmente sorprendente lo rebajado así como la ligereza de estos arcos. Criticado por sus atrevidas creaciones, Perronet contestó a sus detractores comparando el soporte de los puentes modernos con los pilares de las iglesias góticas.

Ricardo Aroca, www.arocaaarquitectos.com

Según él, la transferencia del empuje horizontal a los pilares explicaba la ligereza de los soportes verticales en estos dos tipos de construcciones.

Su fama se basa esencialmente en los trabajos de estructuras en la construcción. De los trece grandes puentes del s. XVIII: Orleans (1750–1760, comenzado por Huppeau); Mantes (1757–1765); Trilport (1758–1764); Saint-Edme, en Nogent (1766–1769); Les Fontaines (1770–1771); Biais-Bicheret (1775); Neuilly (1768–1774); Chateau-Thierry (1765–1786); Pont-Sainte-Maxence (1774–1785); Brunoy (1784–1787); Rosoy (1786–1787); La Concorde, en Paris (1786–1791); Nemours (1776–1805), ha proyectado y construido once, ha terminado uno (Orleans) y comenzado el último (Nemours, terminado en 1805). Los tres principales son Neuilly, Pont-Sainte-Maxence y su obra maestra el puente Luis XVI (actualmente Puente de la Concordia, en París), en los que ha revolucionado las reglas de construcción usadas hasta entonces.

Perronet también escribe numerosas memorias teóricas, entre sus publicaciones cabe destacar: «Mémoire sur l'éboulement que arrive quelque fois à de portions de montagnes et d'autres terraines élévés, etc.» (*Mém. Par*., 1769); «Sur le cintrement et le décintrement des ponts» (*Mém. Par*. 1773), «Mémoire sur les moyens de conduire à Paris une partie de l'eau des riviéres de l'Ivette et de la Bièvre» (París 1776), «Sur la réduction de l'épaiseur des piles et sur la courbure qu'il convient de donner aux voûtes, pour que l'eau puisse passer plus librement sous les ponts» (*Mém. Par*., 1777); «Description des projects et de la construction de divers ponts, canaux, etc.» (París, 1789–93); «Mémoire sur une nouvelle manière d'appliquer les chevaux au mouvement des machines en y employant de plus leur poids et celui du celui du conducteur» (París, 1793 y 1834), y «Mémoire sur les moyens de construire de grandes arches en pierre» (París, 1793).

Perronet muere en París a los 85 años de edad. Arquitecto, ingeniero, inventor y administrador de talento, ha renovado el arte de construir los puentes del s. XVIII y ha creado y dirigido durante cuarenta y siete años la Escuela de Ponts y Chaussées.

Las cimbras de madera: elementos constituyentes

Para construir los puentes de piedra es necesario, en general, emplear una estructura de madera, denominada cimbra, que sea suficientemente fuerte para sostener las bóvedas hasta que se colocan las claves y las bóvedas son estables por sí mismas. Esta estructura se compone de unos elementos ensamblados colocados verticalmente, llamados cerchas o armaduras, que suelen espaciarse de 6 a 7 pies unos de otros, y de unas piezas horizontales llamadas forros, que soportan las hiladas de dovelas de una armadura a otra. Se colocan unas cuñas o calzos fuertes bajo los forros y otros menores para acabar de situar cada hilada de dovelas a la altura que exija la curva de la bóveda; las armaduras se atan a continuación con riostras y largueros colocados horizontalmente y sostenidas por codales a ambos lados para evitar su inclinación.

Estas armaduras que componen las cimbras, se fabrican generalmente con unas piezas horizontales llamadas tirantes, con pares, pendolones, riostras colgantes y parecillos, todas machihembradas y empernadas. Cuando las armaduras no se apoyan más que en los estribos y en las pilas de los puentes, se las denomina armaduras recogidas; cada punto de apoyo puede tener así una sola pieza de madera, llamada montante, en lugar de estarlo sobre varias filas de pies derechos, como era la costumbre. Perronet escribe cómo construir las cimbras para bóvedas de 60, 90 y 120 pies de luz. En la construcción de las cimbras del arco central del puente de Cravant de 60 pies de luz y 20 de flecha de la clave a los arranques, que se muestra en la figura 1, se procedió como sigue:

> Se ha cimbrado, siguiendo mis dibujos, con cinco armaduras recogidas separadas 5 pies y medio una de otra; cada armadura compuesta de tres hileras de pares, la primera y la tercera de cinco piezas y la de en medio de cuatro. Estas hileras de pares estaban colocadas una encima de la otra, unidas en triángulo y sujetas con riostras, como he explicado anteriormente: cada par tenía de 15 a 16 pies de largo y de 8 a 9 pulgadas de grosor; las riostras eran todas del mismo grosor y de 7 a 7 pies y medio de largo. El grosor de cada tablón de los forros era de 4 a 5 pulgadas: la piedra empleada en este puente pesa 176 libras el pie cúbico y el espesor de la bóveda es de 4 pies en la clave. Se constató que las maderas eran endebles y se aconseja dar, para una bóveda de este tamaño, al menos 10 pulgadas de grosor a los pares y riostras, o aproximar las armaduras a cuatro pies.

Ricardo Aroca, www.arocaaarquitectos.com

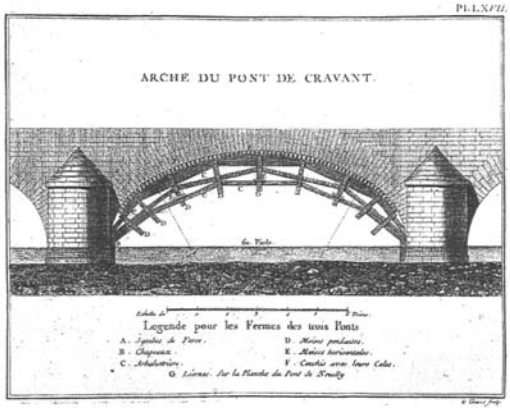

Figura 1
Arco central del puente de Cravant. Leyenda para las armaduras de los tres arcos. A. Montante, B. Viga horizontal, C. Pares, D. Riostras verticales, E. Riostras horizontales, F. Forros con sus calzos, G. Larguerost

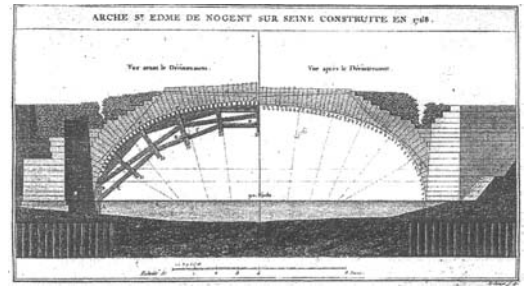

Figura 2
Arco de Saint-Edme construido en Nogent-sur-Seine de 90 pies de luz. Se cimbró con cinco armaduras libres. Vista antes del descimbrado con la leyenda para las armaduras: A. Montante, B. Viga horizontal, C. Pares, D. Riostras verticales, E. Riostras horizontales y F. Forros con sus calzos; y después del descimbrado con la numeración de las distintas hiladas de dovelas desde la primera en el arranque hasta la 47 en la clave

En la construcción de las cimbras del puente de Saint-Edme en Nogent-sur-Seine de 90 pies de luz y 26 de flecha de la clave a los arranques, que se muestra en la figura 2, escribe:

> Se cimbró con cinco armaduras recogidas, separadas 7 pies una de otra, compuesta cada una de ellas por tres hileras de pares, como en el puente precedente: la primera y la tercera hilera se componían de cinco piezas y la de en medio de cuatro, cada una de 18 a 22 pies de largo y de 14 a 16 pulgadas de grueso; las riostras tenían el mismo grosor que los pares y de 7 a 8 pies de largo; cada tablón de los forros tenía de 6 a 7 pulgadas de grueso. Estas cimbras eran muy resistentes: creo que habría bastado darles de 12 a 15 pulgadas de grosor a los pares, como proponía mi presupuesto, en lugar de las 14 a 16 que el contratista les ha dado, para emplear las maderas como se encuentran en los bosques. La arenisca con la que se ha construido ese puente pesa 180 libras el pie cúbico y el espesor de la bóveda en la clave es de 4 pies y 6 pulgadas.

En la construcción de los cinco arcos del puente de Neuilly de 120 pies de luz, 30 de flecha y 45 de ancho que se muestra en la figura 3, Perronet escribe:

> Se cimbró con ocho armaduras recogidas separadas 6 pies. Cada armadura estaba compuesta por cuatro hileras de pares, atados triangularmente como los de los dos arcos precedentes; la de abajo se componía de ocho piezas, la segunda y la cuarta de siete y la tercera de seis, todos de 19 a 23 pies de largo y de 14 a 17 pulgadas de grueso; las riostras colgantes, en total trece, tenían de 9 a 10 pies de largo y de 14 a 15 pulgadas de grueso cada pieza. El conjunto estaba atado con cinco riostras horizontales de 9 a 15 pulgadas de grueso y ocho largueros también de 9 pulgadas. Los forros tenían de 7 a 8 pulgadas de grosor; los calzos de debajo y de encima de estos forros tenían, unos de 6 a 7 pulgadas y los otros, que son los del asentador, alrededor de 2 pulgadas de altura, de forma que el intervalo entre la parte superior de las armaduras y las

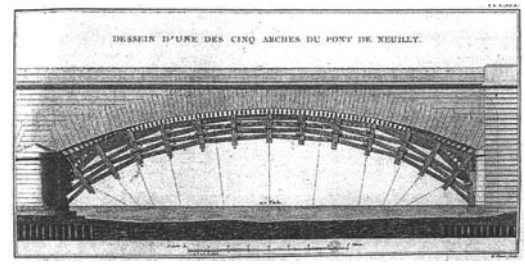

Figura 3
Trazado de uno de los cinco arcos del puente de Neuilly de 120 pies de luz. Leyenda: C. Pares, D. Riostras verticales, E. Riostras horizontales, F. Forros con sus calzos inferiores y superiores y G. Largueros

bóvedas era de 17 a 18 pulgadas, siendo necesario darle al menos el doble de la altura de los forros.

Trazado y posición de los elementos de una armadura

Para resistir esfuerzos, las piezas de madera pueden trabajar de dos formas distintas: 1) si la carga se aplica en los extremos, con las fibras dispuestas según la dirección de la fuerza, en esta posición las piezas tienen la máxima resistencia, o 2) si tienen las fibras oblicuas a la dirección de este empuje, las piezas oponen una fuerza menor, cuyo valor es al anterior como el coseno del ángulo que forma la dirección del empuje con la de las fibras de la madera es al seno total; de manera que cuando las piezas son horizontales la fuerza es nula. Según este principio, las piezas principales de las cimbras deberían colocarse siguiendo la dirección del radio de las bóvedas que han de sujetar.

Trazado de la armadura

Para construir una armadura, es necesario hacer un trazado minucioso de la solución adoptada. Perronet explica en sus memorias cómo debe realizarse éste y lo refleja en una de sus láminas que reproducimos más adelante en la figura 4:

> Si por el centro de gravedad *F* de una sección de bóveda tal como la *BCDE* (figura 4, fig. 1) hacemos pasar una línea vertical *GI* que corta en *I* a la perpendicular *HI* levantada sobre el punto *H*, se traza el arco *YZ*, determinado por los centros de gravedad de todas las dovelas que forman la bóveda, supuestas infinitamente delgadas; cerraremos a continuación el paralelogramo *NLIS*, en el que el lado *IM* tiene centro en *A*, y el punto *N* está situado sobre la vertical *IG*; la diagonal *IN* expresará el peso de la porción de bóveda *BCDE*; el lado *IL*, el esfuerzo que realiza sobre las dovelas inferiores *BCTV*; e *IS* la parte que transmite la carga a la cimbra según la dirección del radio *AI*. Sucederá de la misma manera en las restantes zonas de la bóveda.

Disposición de las piezas y dimensiones

Según Perronet la disposición que considera más adecuada para las piezas principales de las armaduras es la que se apoyan en los estribos y las pilas y escribe

> La sección de bóveda *BCDE* (fig. 4, fig. 1) que carga la cimbra, está representada por el segmento *AM*, que se puede descomponer en dos, un empuje horizontal *MP*, y otro vertical *MO*; cada una de estas líneas expresa el valor de la fuerza que hay que dar a la pieza de madera que representa fuerzas cuya suma es mayor que la inicial (*AM*). La pieza *MP* y otras similares, al prolongarlas, encuentran puntos de apoyo en el lado opuesto de la bóveda, pero en el caso de las piezas verticales tales como *MO* habría que crearlos; esto sólo puede hacerse con muros o pilotes, que obstaculizarían el paso del agua y difícilmente llegarían a ser lo suficientemente sólidos en el caso de los arcos grandes. Estos inconvenientes suelen obligar a apuntalar las piezas inferiores contra los estribos o las pilas, según representa la línea *MT*. Para recibirlos se acostumbra a dejar piedras salientes o ménsulas cerca del arranque de los arcos; las armaduras y cimbras en las que los jabalcones o piezas inferiores están dispuestas de esta manera reciben el nombre de recogidas.

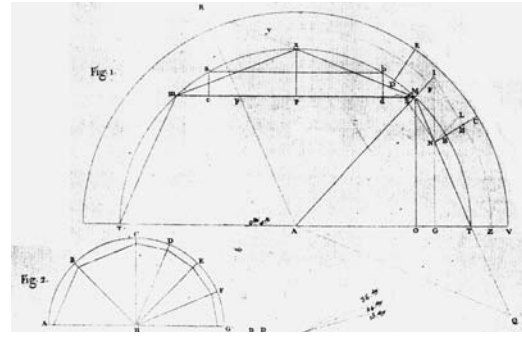

Figura 4
Trazado de una cimbra, fig. 1 y fig. 2

La construcción de ese tipo de armaduras, las recogidas, es más cómodo y la mayoría de las veces menos costoso que las que sitúan el punto de apoyo en zonas distintas a estribos y pilas, sin embargo su construcción requiere más pericia. Perronet se refiere a ellas en su memoria y no hace referencia a los otros tipos salvo para compararlos con éstas.

> Las piezas horizontales *mPM*, que en las armaduras reciben el nombre de tirantes, se suelen situar a la altura de

45 grados para asegurar la bóveda en este punto, que es el que consideramos más débil; pero puesto que es preciso duplicar estos elementos para sujetar las dovelas del arco superior en *xM*, tal es el caso de las piezas *ab*, y sujetarlas por medio de otros elementos *am* y *bM* en *ac* y *bd*, que consumirían mucha madera, resulta preferible, y así lo he hecho en la práctica, colocar sólo un tirante, que se podrá reforzar si se considera necesario con una o dos piezas semejantes situadas inmediatamente por debajo, el resto de las dovelas se sujetarán con unas piezas denominadas pares, como las *mX* y *MX*, que se ensamblan en un pendolón *PX* (figura 4, fig.1), y soportan el peso de los camones *C* encargados de recibir los largueros de madera *D* y las dovelas *E*. Si se duplican en cada lado los jabalcones *MT*, y los pares *MX*, y se añaden los pilarejos *A* y los cepos *B*, todo ello ensamblado, enclavijado y asegurado con pernos, como se acostumbra hacer para unir y sujetar las piezas entre sí, obtendremos una armadura de cimbra recogida.

Perronet explica las ventajas de este tipo de construcciones como sigue:

La fuerza de las piezas *TM* y *MX* (fig. 4, fig. 1), representada por el segmento *MA*, que hace falta para soportar la sección de bóveda *BCDE*, se obtiene prolongando los lados hasta *MQ* y *MR*, con lo que se cierra el paralelogramo de fuerzas *RQ*; la fuerza de las piezas *TM* y *MP*, necesaria para soportar el peso anterior, quedará representada por los segmentos homónimos, que son menores que los anteriores: con esta última disposición se pierde por tanto parte de la fuerza de los maderos, pero queda compensada con la ventaja que supone aproximar las piezas de la bóveda, como pasamos a explicar. En primer lugar, se utilizan menos maderos largos que cuando los puntos de apoyo están alejados de la circunferencia, puesto que en este último caso habría que prolongar las piezas, o bien añadir otras nuevas hasta estos puntos; y ello no eximiría a otros elementos de tener que estar inscritos en la circunferencia que hay que sujetar; y como se verá a continuación, el ahorro podría llevar incluso a suprimir los tirantes, puesto que se hallan aún más alejados de las bóvedas.

Para armaduras de arcos de grandes dimensiones, de más de 3 ó 4 toesas de luz, es necesario multiplicar el número de filas de piezas principales y adoptar una disposición triangular, que es la más estable cuando se cargan las cimbras asimétricamente, según se ve en la figura 6, fig. 5, para que se apuntalen mutuamente y sujeten en el centro a aquéllas que están cargadas perpendicularmente a sus fibras. La posición más favorable para las piezas encargadas de unir y sujetar las anteriores consiste en orientarlas hacia el centro de los arcos, de modo que, en la medida de lo posible, sean perpendiculares a las piezas principales.

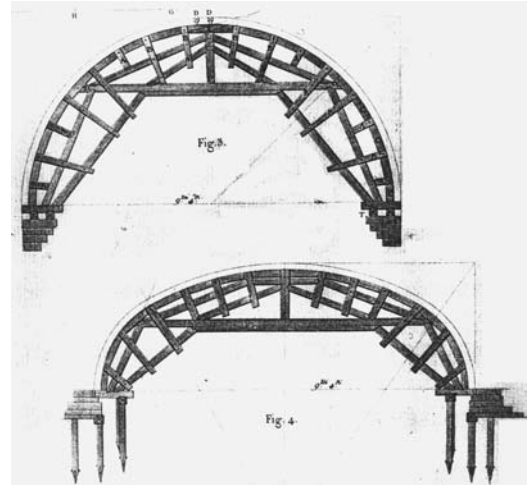

Figura 5
Armadura utilizada en la construcción del puente de Cher, fig 3 y armadura del puente de l'Assise cerca de Tours, fig. 4

Las piezas de madera que denominamos camones forman entre sí ángulos menores cuanto mayor es su longitud: cuanto más se aproximen a la dirección del peso que actúa sobre su junta hacia el centro de la bóveda, serán más resistentes. Según esto (fig. 4, fig. 2) los camones *AB* y *BC*, correspondientes a ángulos de 45 grados, resistirán una carga aplicada en su encuentro *B*, según la dirección *BH*, mejor que las *CD*, *DE*, *EF* y *FG*, correspondientes a cuerdas de arcos de tan sólo 22 grados y 30 minutos, supuestas con la misma carga y también dirigida hacia el centro *H*, y haciendo abstracción del grueso de las piezas. Se procederá de la misma manera con el resto de los elementos principales de las armaduras que se han propuesto anteriormente, disponiendo cada una de las filas paralelas a las cuerdas, y formando triángulos entre sí; lo que obliga a que tengan la mayor longitud posible, igual que en el caso de los camones.

Ricardo Aroca, www.arocaaarquitectos.com

Los elementos más largos ofrecen las ventajas que se han comentado, pero también tienen menor resistencia. En la figura 6 explica la disposición de estos elementos como sigue:

> En el caso de que las armaduras propuestas requieran utilizar maderos largos, bastará con corregir el último movimiento al que están sometidas, quedando todo arreglado. Para llevarlo a cabo habrá que arriostrar las piezas en uno o más puntos a lo largo de su longitud, separados a distancias aproximadamente iguales, que en general no superarán los 6 u 8 pies, como se ha hecho en la armadura de la figura 6, fig.5, en la que la pieza *Be*, de 14 pies de longitud, está sujeta en el centro, y la *eP*, que mide 26 pies, lo está en tres puntos; ello unido a los tirantes de los que vemos los extremos *I* y *z*, que atraviesan las armaduras y junto con los largueros se encargan de mantenerlas en posición vertical, impide que las piezas principales se curven de manera apreciable entre los cepos; lo que equivale a suponer que la fuerza longitudinal de los maderos es aproximadamente igual que si estuviesen divididos entre los cepos. Vemos igualmente que algunas de estos cepos, como los *ot* y *rf* también son necesarios para recibir el extremo de las piezas con las que se ensamblan, y que las *AB* y *de*, independientemente de que reciben dos filas de piezas similares, también sujetan en el punto medio las piezas *hc* y *cf*; en esta cimbra tan sólo quedan los cepos laterales *St* y *VX*, que no tienen otra función más que la comentada en este punto.

El grueso de las piezas, o la relación existente entre los lados de su sección, puesto que el grueso efectivo depende de la luz de los arcos, según Parent es aquélla en la que el cuadrado de uno de los lados es el doble del otro; lo que equivale aproximadamente a una relación de 7 a 5. Las piezas que resultan son fáciles de arriostrar, ya que han de poder colocarse tanto de canto como de plano; Se deben utilizar los mismos gruesos y proporciones en todos los elementos principales, incluso en los camones: su recrecido se puede ajustar con unas piezas colocadas en la parte superior, que los carpinteros denominan cuernos de vaca y se realizará según se describe al hablar del ensamblaje de las armaduras. En cualquier caso, es conveniente aumentar en la parte inferior el grueso de los jabalcones y piezas que sostienen las cimbras. Los cepos deben ser cuadrados; el grueso de los que han de recibir los extremos de las piezas principales será igual que el lado menor de éstas; a los intermedios basta darles tres cuartos de esta dimensión.

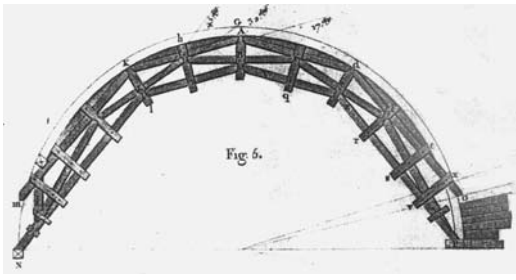

Figura 6
Construcción de las triangulaciones, fig 5

Las bóvedas construidas exclusivamente con sillares, se sujetan mediante largueros situados en el centro de cada hilada de dovelas; aunque conviene que las piezas sean más altas que anchas, puesto que su resistencia se obtiene como producto del cuadrado de la altura por el ancho, es preferible que los largueros sean cuadrados porque al tener más base se mueven menos cuando se calzan y se apoyan las dovelas.

Para terminar de construir las armaduras, se colocan los tirantes, cuya función es unir y sujetar las armaduras entre sí en posición vertical. En esta situación las piezas han de resistir compresiones y tracciones de sus fibras, que siguen la dirección del empuje; bastará con dar a los tirantes el mismo grosor que a los cepos cuadrados que acabamos de mencionar.

Ensamblaje de piezas

Las espigas y las muescas debilitan las maderas, por ello se deben suprimir ensamblando las piezas principales de las cerchas, denominadas pares, en varias hileras, uniendo unas a otras de tal forma que los extremos de una coincidan con el centro de los pares superiores, con los cuales formarán triángulos, que tendrán por base la longitud entera de un par y por lados dos medios pares de la fila superior. Las piezas principales deben estar arriostradas en el centro de su longitud así como en sus extremos y empernadas.

En general, los cajeados se realizarán en los cepos que sirven para atar las piezas principales; tendrán sección circular de radio igual a la longitud de los pares, para que puedan recibir los extremos de las piezas principales conservando todas ellas su grosor, y solamente se redondearán con el radio de las cajas,

como observamos en la fig. 7, fig. 6. Los camones, que interesa que tengan la mayor longitud posible, serán sin embargo más cortos en caso de que no se reemplace el grueso ordinario de los maderos con un recrecido o cuerno de vaca adicional, que se unirá a la pieza inferior con clavijas situadas en cada extremo, según se muestra, entre otras, en la fig. 8, figs. 11, 12 y 13. También se puede economizar, colocando dos cuernos de vaca uno sobre otro formando elementos largos con varios más cortos, con las juntas situadas sobre las riostras (fig. 7, fig. 6). Perronet en su memoria distingue tres tipos de riostras, y se refiere a ellas como sigue:

> En las armaduras se utilizarán tres tipos distintos de riostras: unas, las designadas por *AB*, *CD* y *EF* (fig. 7, fig. 6), reciben el extremo de los camones y se ensamblan según se ha visto; éstos recibirán igualmente, en la parte inferior y de la manera que se ha presentado como ejemplo, también en la fig. 6, el extremo de las piezas principales *HB*, *BD*, *DF* y *FG*, con la ensambladura circular comentada previamente; estas riostras se abrirán inmediatamente por encima de la unión, para permitir que los atraviesen las piezas *IK, KL y LM*; se mantendrán unidos colocando pernos de hierro en los extremos bien apretados con arandelas y pasadores. En las armaduras de arcos de luz igual o inferior a 3 toesas, se puede sustituir uno de los pendolones por riostras y ensamblar los camones del mismo modo; la única diferencia será el espesor (fig. 8, fig. 14).
>
> Las segundas riostras *K* y *L* se situarán transversalmente en el centro de los camones con los que se unen: recibirán inmediatamente por debajo de éstos el extremo de las piezas *IK*, *KL* y *LM*, con uniones de sección circular del tipo explicado anteriormente, y estarán abiertos por la parte inferior para permitir que los atraviesen las piezas *BD* y *DF*, que se sujetan sólo en los extremos; por encima se dejará cierta holgura para permitir el asiento debido a la compresión de las fibras; y finalmente, se calzarán si se considera necesario. Las riostras se atornillarán en la parte superior sobre los camones; en la inferior, se

Figura 7
Tipos de riostras, fig. 6

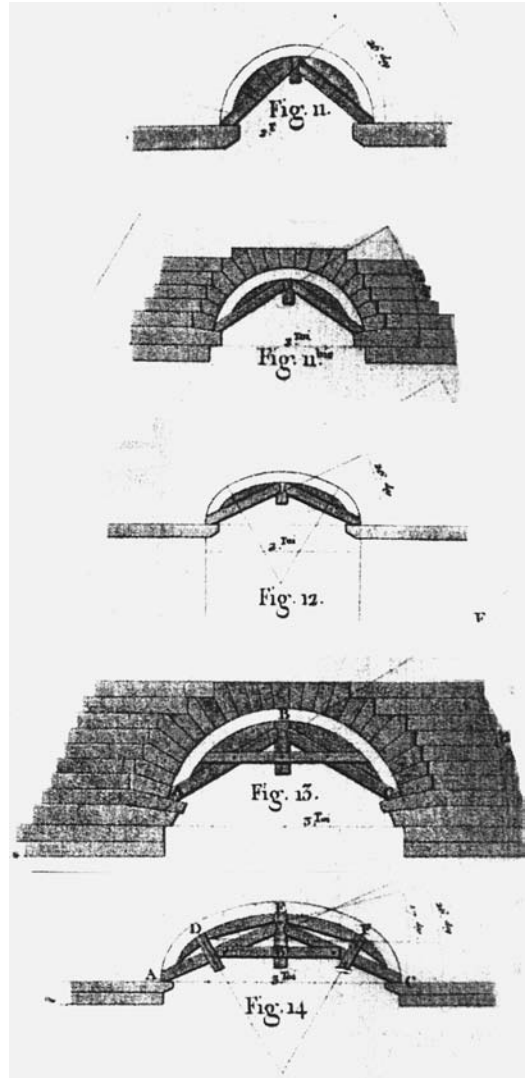

Figura 8
Ensamblaje de las piezas: fig 11, 11 bis, fig. 12, fig. 13 y fig. 14

sujetarán inmediatamente por debajo de las piezas que los atraviesan perpendicularmente, y no sobre ellas, como de hecho es costumbre hacer: se impedirá así que las piezas se carguen estando en esta posición, que es en la que la madera opone la menor resistencia.
Los últimos cepos se sitúan en *M, N, O, P, Q, R, S* y *T*, en el espacio que queda entre los anteriores: se ensamblarán y atornillarán como en el último caso, cuidando igualmente que quede al menos media pulgada de holgura sobre las piezas transversales, a las que no deben abrazar más que por los costados y por debajo; de este modo, cuando los elementos principales estén muy comprimidos en los extremos y tiendan a curvarse, como por ejemplo *BD* y *DF*, sólo podrán hacerlo por arriba, hacia *K* y *L*, donde tienen como punto de apoyo la propia carga de la bóveda. Las riostras horizontales que pueden utilizarse, en lugar de los tirantes, en armaduras de arcos pequeños de entre 3 y 7 toesas; en este caso los pendolones y el resto de las riostras se prolongarán y ensamblarán entre sí a media madera, todo ello según se puede ver en los dibujos de las armaduras que se han propuesto para los arcos en la figura 8, fig. 13.

Levantamiento de las armaduras y fijación en los puntos de apoyo

Una vez ensambladas las armaduras en obra, siguiendo el dibujo trazado sobre un muro en el caso de los arcos pequeños, o sobre un marco a nivel en el de los más grandes, sólo queda levantarlas y asentarlas sobre los puntos de apoyo. El levantamiento se hará utilizando andamios provisionales que pueden descansar sobre hileras de estacas en el caso de los arcos grandes, o sobre apoyos flotantes, situados en las pilas y los estribos, que es la práctica habitual; acerca de la forma de fijar las armaduras en los puntos de apoyo, Perronet escribe:

> Los jabalcones pueden asentarse sobre modillones, recrecidos una pulgada por la parte posterior, como se puede ver en el punto *P* (fig. 6, fig. 5); o bien en orificios previstos en la obra de fábrica, como los *M* y *O* (fig. 6, fig. 5); sobre soleras (fig. 7, fig. 6), o soleras con canes según vemos en *T* (fig. 5, fig. 3); o bien sobre las cabezas de atado de los pilarejos, que se recortarán siguiendo el retranqueo de la primera hilada de cimientos, tal y como sucede en *F* (fig. 9, fig. 18), pilarejos en los que las piezas pueden también ensamblarse por embarbillado. Dependiendo de las circunstancias, se elegirá el método que se estime conveniente; creemos que el primero, que los obreros denominan asentar a pelo, es suficiente para las armaduras de los arcos de menos de 5 ó 6 toesas de luz, y evita tener que colocar soleras innecesarias.

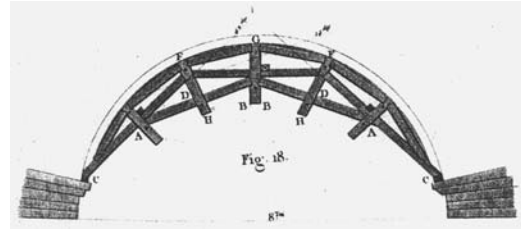

Figura 9
Fijación de las armaduras en los puntos de apoyo, fig. 18

En el momento de levantar las cimbras las presas deben estar retiradas, de modo que el nivel de las aguas bajas, que suele ser el del arranque de los arcos, designará el punto de apoyo inferior. Sin embargo, puede situarse por debajo del agua utilizando pilarejos, que se representan por *A* en la figura 10, fig. 7, y se alojan en los retranqueos de las piezas con las que se ensamblan.

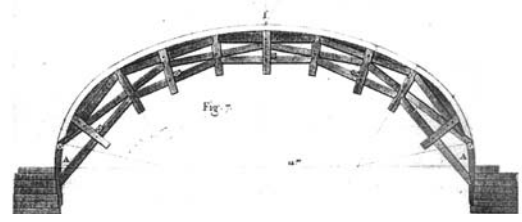

Figura 10
Fijación de las armaduras en los puntos de apoyo, fig. 7

Colocación de dovelas y movimientos de las bóvedas

La fuerza (según Amontons) necesaria para mover un cuerpo de base plana y lisa, apoyado sobre un plano horizontal también liso, es la tercera parte del peso necesario para vencer el rozamiento de las bases; de donde resulta que si el peso está situado sobre un plano inclinado no comenzará a deslizar hasta que la altura del plano mida la tercera parte de la longi-

tud; el ángulo del plano con la horizontal medirá 18 grados y 20 minutos. Si se trata del rozamiento de una piedra apoyada en un madero, el ángulo es de 39 grados y 52 minutos.

Según estas indicaciones, se pueden comenzar a poner sin cimbra las primeras hiladas de dovelas hasta que comiencen a deslizarse sobre las dovelas inferiores, esto es, cuando la cara superior de esas piedras está inclinada respecto a la horizontal de 39 a 40 grados. Las hiladas de dovelas que se colocan a continuación a cada lado, comienzan a cargar las cimbras: esta carga, que aumenta progresivamente hasta que se pone la clave y hace bajar un poco la parte de las cimbras cercana a los apoyos, tiende al mismo tiempo a hacer subir la parte superior; por este motivo se deben cargar con dovelas, ya talladas, que se utilizarán después en la parte superior de las bóvedas a medida que la bóveda se eleva para sujetar los entramados e impedirles subir. Este descenso inevitable de las armaduras ocasiona primero una apertura en las llagas superiores de las dovelas, a poca distancia de la perpendicular de los arranques, sobre todo en las grandes bóvedas, y después progresivamente más arriba a medida que se construye la bóveda, pero estas juntas se cierran después de colocar las claves.

Descimbrado de los puentes

Las cimbras descienden por su ensamblaje y bajo el peso de las bóvedas durante su construcción debido a la compresión de las fibras de la madera y a la pequeña curva que sufren los pares, lo que obliga a peraltarlas, sobre el patrón o plantilla con la forma exacta de los arcos, en la misma cantidad en la que pueda ser evaluado este descenso. Para disminuir el asiento de las bóvedas y facilitar el descimbrado de los puentes, lo habitual era poner en seco un cierto número de las últimas hiladas de dovelas, afirmarlas fuertemente con cuñas de madera introducidas a golpe de mazo entre tablas enjabonadas y rellenarlas y fijarlas después con mortero de cal y cemento. Algunas bóvedas se dejaban el mayor tiempo posible sobre las cimbras; otras se desmontaban enseguida, tras cerrar los arcos. Se debe esperar entre un mes y seis semanas o al menos hasta que el mortero de las juntas de las últimas hileras de dovelas hayan adquirido bastante consistencia (de dos a tres semanas, si la piedra es porosa).

Se pueden considerar dos partes en una bóveda, la superior que tiende a bajar, la inferior de ambos costados, que resiste y es empujada hacia afuera. Esta última parte de cada lado de la bóveda incluye aquéllas que no cargan las cimbras antes de colocar la clave. Couplet la sitúa en 30 grados en las bóvedas de cañón o la sexta parte de la media circunferencia, es decir, el tercio de la semi-bóveda. Se puede pues, según estas observaciones, comenzar por quitar sin temor todos los forros que se hayan colocado en ambas partes inferiores de las bóvedas, por lo menos hasta el tercio de las semi-bóvedas; ya que, cuando se hayan colocado las claves, estas partes, en lugar de cargar sobre las cimbras, son desplazadas hacia fuera por el peso de las dovelas superiores; esta operación debe realizarse lentamente, quitándolos en igual número cada día y en ambos lados al mismo tiempo, para que las armaduras al descender lo hagan lentamente.

Cierre de las juntas

Antes de colocar las claves, las juntas de las dovelas tienden a abrirse, por el descenso de las armaduras, cuyo movimiento parte de los montantes que están dispuestos contra las pilas y estribos para sostenerlos, y aumenta al subir por esas armaduras: pero cuando se colocan las claves y las cimbras están a punto de ser descargadas, la causa del movimiento de las bóvedas cambia y es de las claves y las contraclaves de donde parte la acción de las dovelas, en sentido contrario al movimiento de las armaduras, para dirigirse hacia las pilas y estribos que deben sostener las bóvedas tras ser descimbradas. Este último movimiento de las dovelas es el que tiende a cerrar las juntas que se han abierto durante su colocación.

Nota

Este trabajo ha sido financiado por la Comunidad de Madrid en el marco de una beca postdoctoral de investigación.

Ricardo Aroca, www.arocaaarquitectos.com