

Elogio de los puentes de piedra.

Apelación a que los ingenieros los estudien

(2ª parte)



Praise of the stone bridges. Exhortation to engineers to study them (II)

Francisco Javier León
Benedetta Orfeo
Leonardo Todisco

*Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras.
ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid*

Se presenta, en el conjunto de las dos partes en que se ha dividido este artículo, la relación de virtudes de estos puentes (también de algunos puntos débiles), tan numerosos y tan desconocidos por parte de los propios ingenieros. Entremezclados con experiencias profesionales, investigadoras y académicas, se da cuenta aquí de aspectos tan interesantes como las cimbras: una bóveda, un arco, no funciona como tal hasta que no se cierra en clave y puede retirarse la cimbra. Hasta ese instante, las dovelas no son sino una carga (no pequeña) sobre esas estructuras temporales, con frecuencia colosales, proyectadas y construidas con los medios de otros tiempos. Se trata, en palabras de Julio Sánchez, de una expresión de “ingeniería efímera” que merece reconocimiento. Como reza el título, se hace una reivindicación de la necesidad de que se estudien estos puentes, incorporando las enseñanzas a los planes docentes de los másteres de nuestras Escuelas de Ingenieros de Caminos. Se retomará así, de manera actualizada, la brillante trayectoria de aquellos ingenieros decimonónicos que dotaron al país de unos puentes con los que se vertebró la red de carreteras y de ferrocarriles. Merecemos especialistas que traten con conocimiento el patrimonio heredado y que, por qué no, proyecten hacia el futuro las posibilidades de un material estructural, la fábrica de piedra o ladrillo, de cualidades bien probadas pero olvidadas.

The advantages and some weak points of masonry bridges are reminded in this paper, published in two parts. Although bridges of this type are numerous in Spain and in many other European countries, they are rather unknown by civil engineers. Together with professional, research and academic experiences, the authors pay attention to questions like centring. Thus, an arch will function as a self-supporting structure only when the voussoir at crown is placed and the scaffolding is removed. Till this moment, voussoirs act merely as big loads on such often huge temporary structures erected with the equipment of ancient times. Such “ephemeral engineering” deserves a special recognition, as Julio Sánchez says. As declared in the title of the paper, a special emphasis is given to the need of studying such bridges, disseminating this knowledge through the Civil Engineering Schools or Faculties and their Curricula. Thus, the brilliant tradition of civil engineers of the past (especially 19th Century), properly updated, can be recovered to improve the quality of the refurbishment works on these bridges today and, why not, conceive new possibilities for newly designed bridges on stone or brick.

La construcción de los puentes de piedra

La figura 1 representa el croquis arquetípico e ilustrado del objeto construido. A las cimentaciones, sigue la construcción de los estribos, de las pilas y de los tajamares. La forma de estos últimos ha sido objeto de muchos estudios por parte de los antiguos tratadistas, pues estos eran elementos fundamentales para evitar la tan temida socavación de las pilas, problema principal del colapso de este tipo de puentes. Por limitaciones de espacio, no se entra en la descripción de estos elementos y de las versiones contradictorias que formulan diferentes tratadistas a lo largo de los siglos.

Finalizada la construcción de estribos, pilas y tímpanos, al menos en parte, comienza la realización de la estructura portante horizontal, sustentada por la bóveda, elemento característico y, sin duda, distintivo de todo puente de fábrica. Sobre ella, se posiciona un relleno, que queda confinado por los tímpanos, y que sirve de sustento final para la plataforma [1]. En el proceso constructivo destaca el papel, más bien ignorado, que jugaban las cimbras [2], indispensables para la sustentación de la bóveda, antes de colocar la dovela de clave. Éstas son, conjuntamente con las ataguías y los cajones de cimentación, el medio auxiliar de mayor importancia en el proceso evolutivo del puente y, al mismo tiempo, un elemento a menudo obviado por los tratadistas. Merece la pena dedicar siquiera unas líneas a estas grandes desconocidas [3] y a desvelar al ingeniero de a pie el verdadero papel de la cimbra en el pasado y sus implicaciones en la ingeniería del presente (figura 14 de la primera parte).

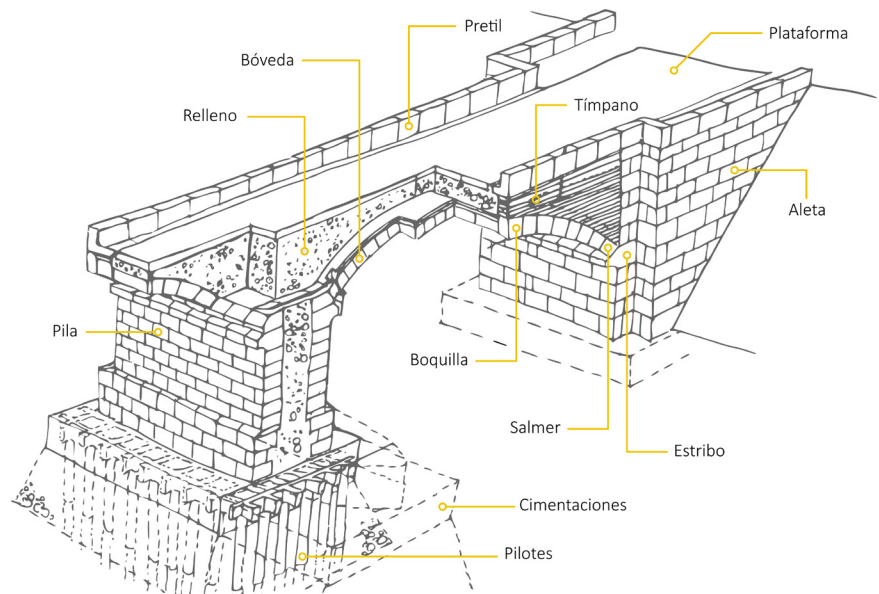


Figura 1. Elementos constitutivos de un puente de piedra

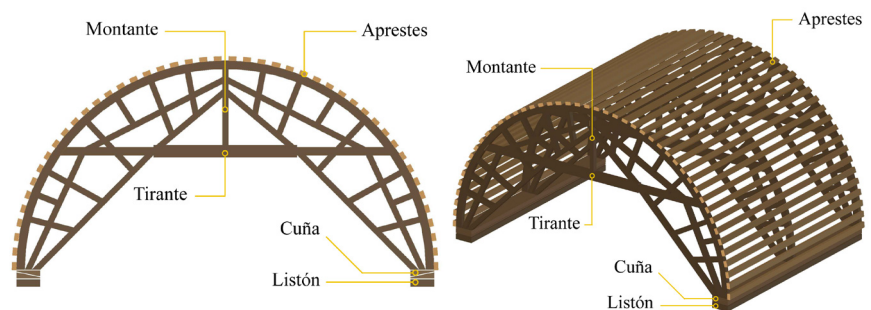


Figura 2. Elementos constitutivos de las cimbras más utilizadas en España (tomado de [3]): a) vista frontal de un cuchillo; b) vista en perspectiva de un conjunto de cuchillos. Ver también la figura 14 de la primera parte.

Tipos de cimbra y sus componentes

Son estructuras de madera formadas por un arco exterior que constituye el esqueleto portante, al cual están clavados elementos lineales de manera radial hacia el centro. La cimbra más utilizada para arcos de medio punto es la que se representa en la figura 2 a partir de la descripción, entre otros, de Sánchez Taramas [4]. Es una cimbra rígida, caracterizada por un montante vertical y un tirante horizontal. Para la construcción de un arco, se suele usar un solo cuchillo, ya que el arco tendrá un solo orden de dovelas. En una bóveda, sin embargo, el arco se proyecta en la tercera dimensión y la cimbra requiere de un cierto número

de cuchillos paralelos, a una distancia el uno del otro de 4 a 7 pies españoles (1 pie español = 27,9 cm). Sobre los cerchones (cuchillos), se ponen unas maderas muy derechas que se llaman apresteres o forros [3] y que no se clavan, dando apoyo a las dovelas en el vacío entre dos cuchillos.

Las cimbras se suelen clasificar, según su deformabilidad, en rígidas y flexibles [5]. La diferencia es debida a la presencia (o no) del tirante y del montante, inexistentes ambos en las cimbras flexibles [6]. Cabe decir que esta clasificación es convencional, ya que también las cimbras rígidas experimentan deformaciones bajo la aplicación de las cargas. Otra clasificación posible atiende a la manera de estar apoyadas [7]. Lo

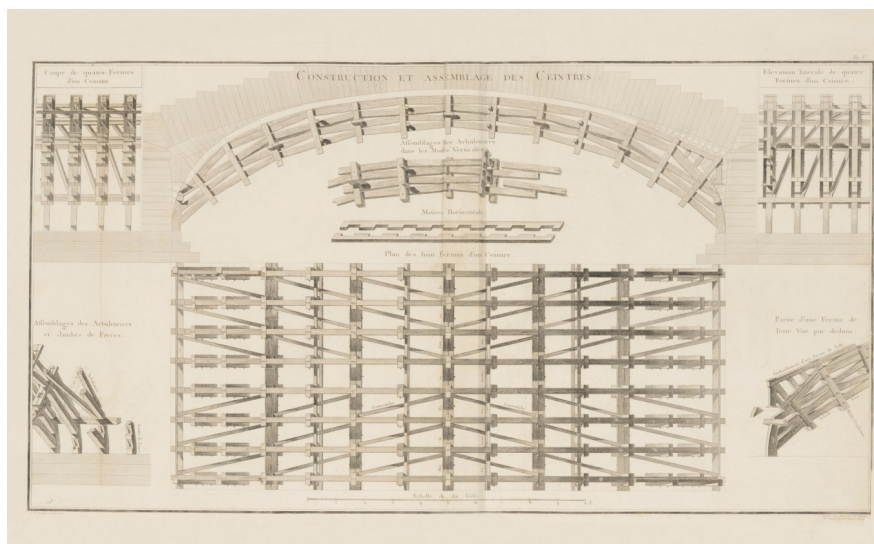


Figura 3. Cimbra flexible del puente de Neuilly (Perronet) [6]

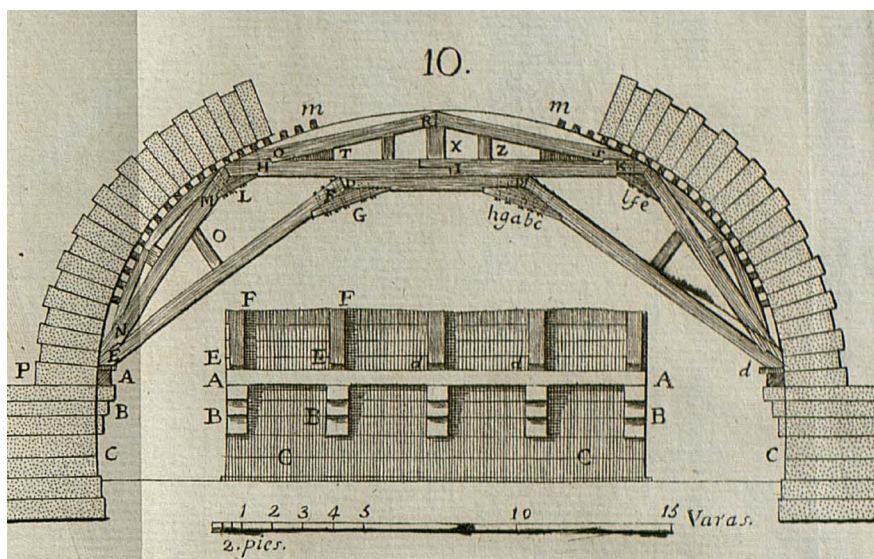


Figura 4. Detalle de hiladas de sillares donde se apoya la cimbra [4]

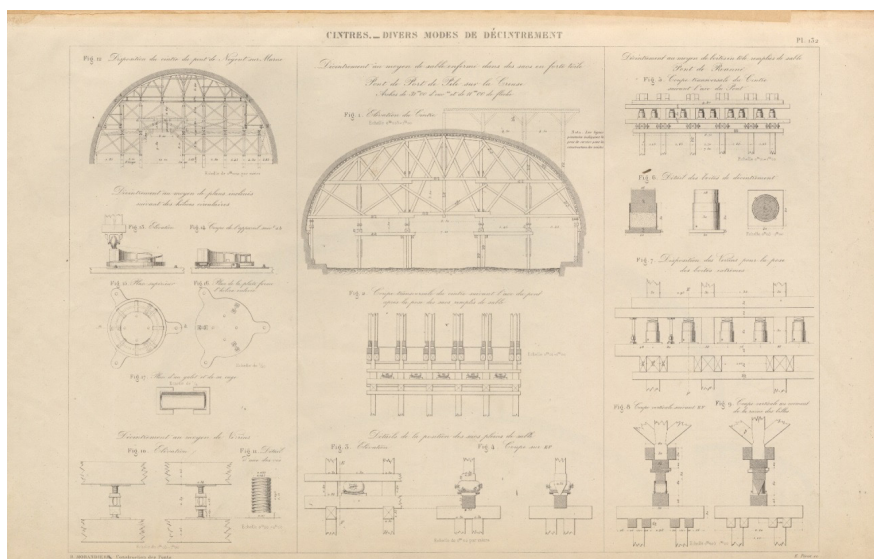


Figura 5. Cimbra apoyada sobre el lecho del río [7]

más frecuente es que los cuchillos de las cimbras apoyen sobre hiladas de sillares en ménsula que sobresalen de las pilas (B y C en la figura 4 [4].

Los cuchillos no apoyan directamente sobre los sillares, sino sobre unos listones (A) de madera, a su vez dispuestos sobre los sillares sobresalientes en voladizo progresivo. Por encima de los maderos y debajo del apoyo de la cimbra, es posible identificar unas cuñas (d) de unas cuatro pulgadas de grosor (9,3 cm) para aflojar y desarmar la cimbra al concluir la bóveda [8]. Este método es independiente de las condiciones del terreno y las ménsulas no representan un obstáculo para las embarcaciones u objetos flotantes transportados por la corriente de agua bajo la cimbra. Alternativamente, en verano y con cauces bajos, se disponían pies derechos sobre el lecho del río y apeaar allí la cimbra y los andamios (figura 5).

El material

La madera, el principal material utilizado en las cimbras, ha de ser lo suficientemente resistente como para evitar un colapso prematuro de la bóveda. También debe asegurar que las deformaciones que se producen, antes y después del descimbrado, no superen los valores límites aceptables asociados a una adecuada geometría final de la bóveda. La madera tiene que ser uniforme, sin nudos, y tiene que haberse ensayado frente a heladas invernales. El P. Pontones [8] dedica un capítulo entero a los materiales empleados en la construcción y reparación de los puentes, con particular atención a la madera. Aconseja el empleo del alcornoque, la encina, el olmo y el pino, recomendando por encima de todos ellos el albar porque es resinoso y se conserva mejor.

En la figura 6, de Wiebeking [9], se visualiza el proceso de ensayo de las maderas para valorar su aptitud a flexión, con un detalle de su rotura, para evaluar la resistencia del material en puentes de madera, pero los resultados sirven también para las cimbras. Para evaluar la resistencia, el P. Pontones [8] propone ensayar un madero bajo una carga aplicada en el centro. Da una fórmula que, certeramente, hace depender del cuadrado del canto, por el ancho, dividido por la luz, lo que denota que se va abandonando la idea clásica de la proporcionalidad en las resistencias, acercándose a lo que, decenios después, plantean Bernoulli y Navier. Es interesante también observar que introduce lo que hoy llamamos “coeficiente de seguridad”, que dice ha de ser 2.

Proceso de construcción de una bóveda

El proceso de construcción de las bóvedas es uno de los aspectos fascinantes de los puentes de piedra o ladrillo y que, como las cimentaciones, son muy desconocidos. El ingeniero de hoy contempla la bóveda terminada y admira el resultado, pero su valoración se queda corta si ignora cómo se construyó. De la cimbra depende la forma final de la bóveda del puente [10]. Las primeras dovelas, comprendidas entre la línea de imposta y los 30° (figura 7a), se apoyan una sobre otra sin necesidad de cimbra, ya que el rozamiento entre las dovelas es suficiente como para que no deslicen (ni vuelquen) cayendo hacia el centro del arco [5]. La cimbra, en este caso, juega sólo el papel de guía para dar la correcta forma a la bóveda. Como se puede ver en a), se utiliza una cuerda, llamada cintrel y conectada al centro del arco, para que las dovelas estén posicionadas con la correcta

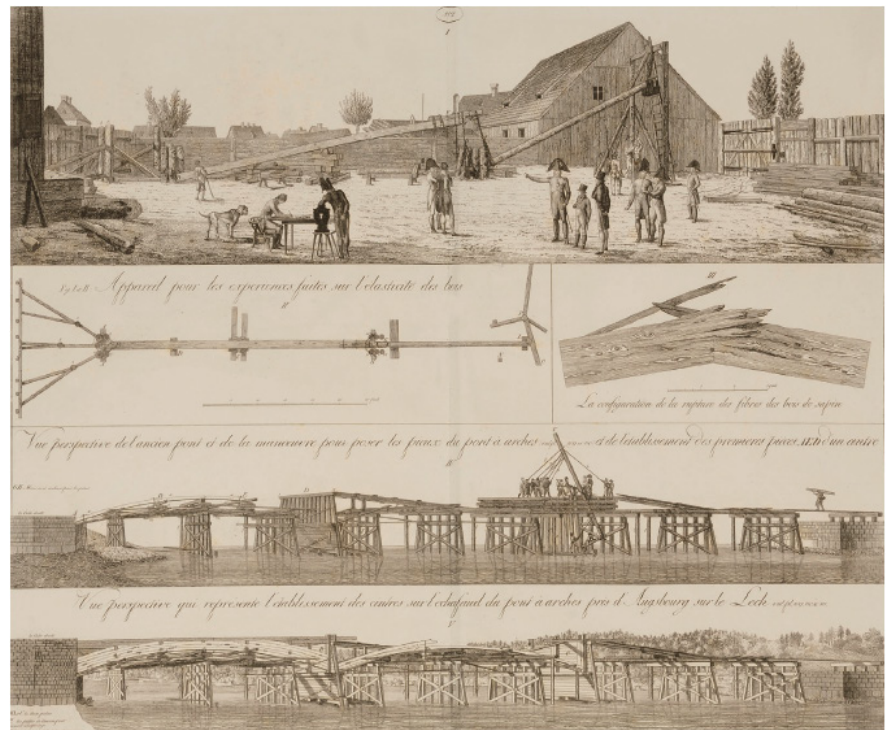


Figura 6. Lámina 112 de Wiebeking [9], en la que se muestran, en la parte superior, los ensayos a flexión realizados sobre rollizos de madera, incluyendo la forma de rotura

inclinación y sigan la dirección radial [8] (ver también la figura 14 de la primera parte de este artículo, en el centro de la semicircunferencia). Además, desde el principio del proceso constructivo, es indispensable acopiar ordenadamente en clave y hombros de la cimbra una serie de dovelas en horizontal. Son necesarias para contrarrestar la tendencia de la cimbra a deformarse hacia arriba a medida que se ponen sobre los aprestes las dovelas desde los 30° en adelante (figura 7b). Una vez las dovelas empiezan a acercarse a la clave de la bóveda, estas piezas se van retirando [6].

Finalmente, se dispone la dovela de clave, con la ayuda de un martillo de madera, en un proceso a lo largo del cual el arco empieza a entrar en carga, trabajando, por lo tanto, de manera independiente sin necesidad del sustento que le brinda la cimbra. En este momento, las cuñas en las que se apoya la cimbra se retiran, abandonando ésta de forma definitiva el contacto con el arco (figura 7c). Concluida la

bóveda, se disponen los tímpanos (figura 7d) y los rellenos rígidos y granulares del trasdós (el más oscuro representa el relleno rígido que es el más profundo y se encuentra sobre las sillas de las bóvedas en pilas y estribos), con altura, desde la línea de arranques, equivalente a 2/3 o 4/5 de la flecha, según se trate de puentes de carretera o ferroviarios, con las lógicas variaciones [5]. El relleno rígido es un elemento resistente de enorme importancia porque tiene capacidad portante. El relleno granular, más económico, tiene la misión de repartir la acción de las cargas sobre la plataforma hacia el conjunto relleno rígido – bóveda, además de “pretensar” en conjunto frente a las sobrecargas no simétricas.

Además, el relleno rígido ayuda a resistir los empujes horizontales que deben soportar las pilas provenientes de las bóvedas. Esta función resulta fundamental pues, en algunos casos, este empuje puede no ser compensado por el de la bóveda adyacente si ésta aún no

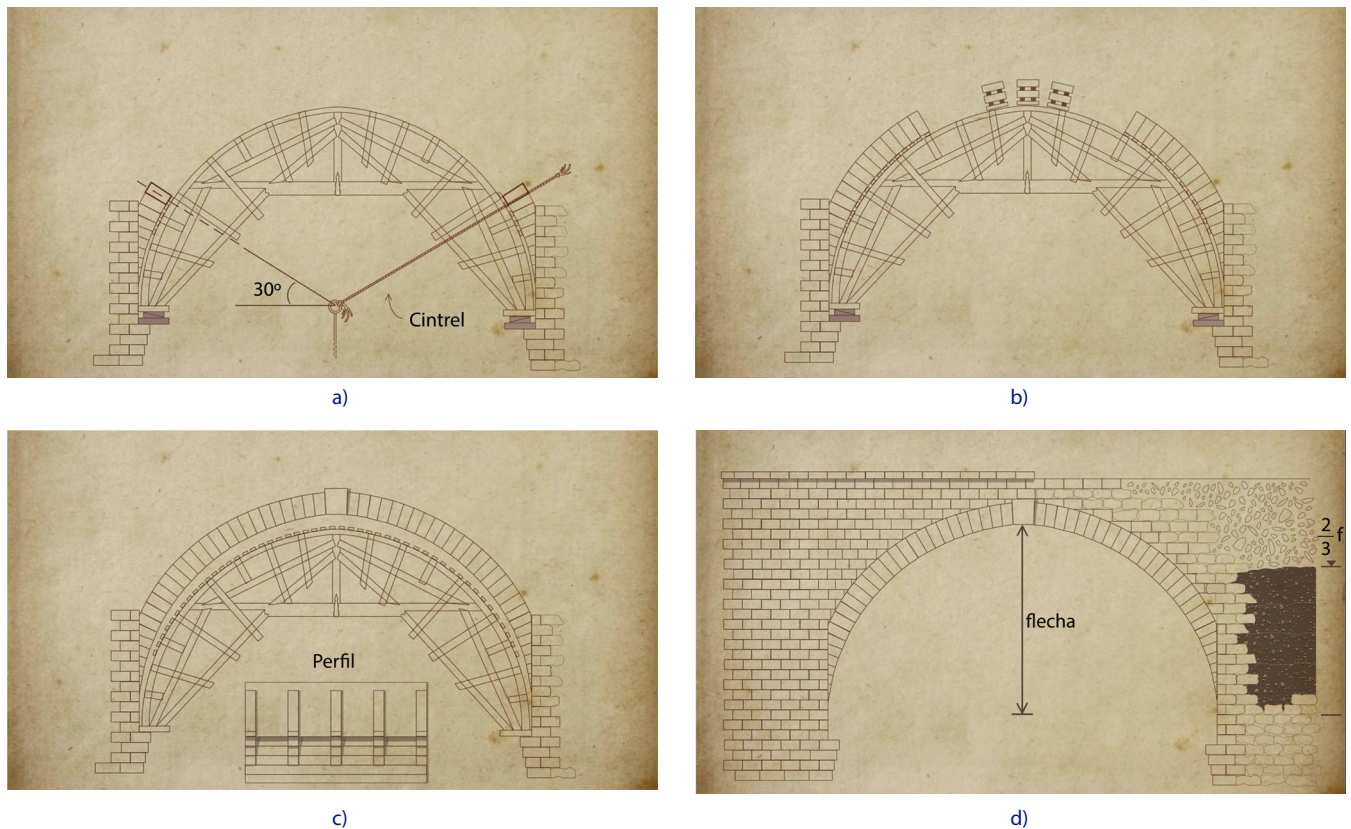


Figura 7. Secuencia de fotogramas que muestran la evolución en la construcción de una bóveda de fábrica (trabajo de B. Orfeo con fines docentes)

ha sido construida. Usualmente, la misma cimbra era empleada para construir todas las bóvedas del puente, lo que imposibilitaba la realización simultánea de todas ellas, dándose este tipo de desequilibrios especialmente crítica en puentes con pilas muy esbeltas, como en el caso del puente de Neuilly [6].

El descimbrado

Esta operación es muy delicada. Debe realizarse con cuidado y siempre de forma gradual. Este procedimiento puede realizarse inmediatamente después de la construcción de la bóveda, o pasadas algunas semanas una vez haya fraguado el mortero o la lechada introducida en las juntas de dovelas. El descimbrado requiere retirar al mismo tiempo todas las cuñas para garantizar un asentamiento uniforme de la cimbra [6].

Comportamiento resistente de la cimbra

La figura 8 presenta la distribución de los esfuerzos axiales en la cimbra a lo largo de la construcción de la bóveda y, en particular, al 30% y al 100% del proceso constructivo [3]. Es evidente que el arco exterior es el principal elemento portante de la cimbra, ya que transfiere la mayor parte de la carga hasta los apoyos. Las piezas radiales actúan como elementos de rigidización, conectando el arco exterior con el interior, con niveles tensionales ba-

jos. Al principio, los mayores esfuerzos se concentran en la parte más baja de las cimbras, mientras que, al final de la construcción, los mayores se alcanzan al nivel del tirante horizontal, sabiamente dispuesto. Los momentos flectores y las fuerzas cortantes son insignificantes, lo que resalta la idoneidad de la forma seleccionada de las cimbras.

Los ejemplos de Besalú (figura 9) o Almaraz (figura 10) son expresiones de la importancia de las cimbras en relación con la forma de las bóvedas. Éstas han de ser lo bastante rígidas como para poder

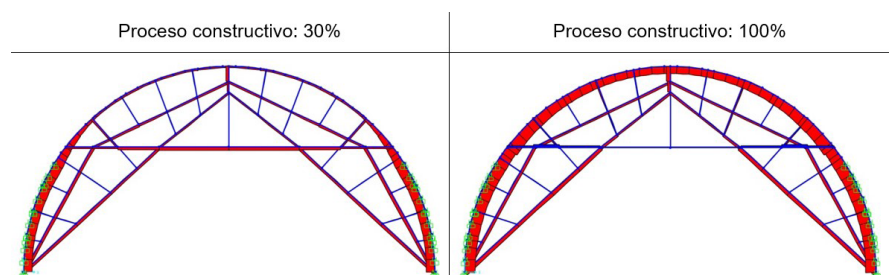


Figura 8. Distribución de esfuerzos axiales en la cimbra [3]

soportar el peso de las dovelas sin alterar la geometría final del arco. El inadecuado diseño de una cimbra excesivamente flexible o el inapropiado orden constructivo (asimetría de montaje de dovelas o ausencia de contrapesos) podrían estar detrás de la forma de falsos (indeseados) arcos góticos. Este aspecto ya fue puesto de manifiesto por Carlos Fernández Casado y casi nunca aparece en los tratados de puentes y, menos aún, en las guías turísticas.

Diseño eficiente de cimbras: los arcos de doble rosca

En el caso de grandes luces son comunes las bóvedas de doble rosca. La razón es esencialmente ingenieril, constructiva, y fue utilizada ya por los romanos. Así, si el espesor canónico de la bóveda había de ser $1/10$ de la luz libre, en el puente de Alcántara habrían resultado dovelas de casi 3 m de canto, de difícil manipulación en cantera, en la monte y también sobre la propia cimbra. Otro tanto sucede con los puentes de Ariza y de Almaraz (bóveda de la margen izquierda, que es la primitiva, pues la otra es una refacción de la primera mitad del s. XIX) (figura 10). En los Países Bajos y en el Reino Unido, donde son



Figura 9. Puente de Besalú, Girona

endémicas las bóvedas de ladrillo de varias roscas, sucede lo mismo. La idea, pues, consiste en disponer una primera rosca de tamaño más manejable y menor exigencia para la cimbra, de forma que, completado el primer anillo, el segundo actúa sobre el primero y, en menor medida, sobre la cimbra, aún dispuesta.

Séjourné [11, 5], el último gran constructor de bóvedas de piedra en Europa, utilizó sabiamente este recurso, llegando a cuantificar en un 70% el ahorro en cimbras, lo que hizo posible mantener la competitividad de los puentes de piedra unos decenios más, precisamente porque la cimbra constituía una parte muy significativa del coste to-

tal de la obra. Como es sabido, E. Torroja utilizó un sistema parecido (roscas) sobre la autocimbra en la construcción del gran arco del viaducto de Martín Gil.

Cimbras de hoy para puentes de piedra

Las consideraciones anteriores no sólo tienen valor histórico, lo que ya es justificación suficiente para tratarlos aquí. Saber de las cimbras y su relación con las bóvedas permite acometer con fundamento labores de rehabilitación, como el ensillado de bóvedas en mal estado, si los rellenos no permiten confiar exclusivamente en bóvedas y



Figura 10. Detalles de doble rosca de los puentes de Alcántara, Almaraz y Ariza

relleno rígido. En casos como el del puente de Deba (figura 11).

Por qué enseñar puentes de piedra en el s. XXI

Para que los ingenieros estudien los puentes de piedra hay dos vías: que el profesional se tenga que enfrentar a un caso real de puente de piedra al que dar respuestas; o que se enseñe en nuestras Escuelas en el contexto del programa formativo reglado, lo que facilitará la capacidad y eficacia para dar tales respuestas. La Escuela de Madrid, la primera y única de España hasta mediada la década de 1960, impartía enseñanzas para proyectar y construir puentes de piedra y ladrillo. Dejó de hacerlo a mediados del s. XX, cuando el empleo del hormigón estructural se hizo extensivo y sustitutivo de la piedra y del ladrillo (Los puentes metálicos siguieron haciendo uso, por cierto, de cimentaciones, pilas y estribos de piedra.) La consecuencia de que dejara de enseñarse la obra de piedra o ladrillo fue que los ingenieros de caminos fueron olvidando ese material estructural y, como es sabido, lo que no se enseña, no cae en los exámenes y es, en la práctica, como si no existiera. Pero existe. Lo que sucede es que los puentes de piedra o ladrillo son tan buenos, en general, tan poco necesitados de mantenimiento en comparación con los metálicos o incluso los de hormigón, que no representaron ni un problema ni una necesidad. Los viejos puentes, pertenecientes a trazados obsoletos (generalmente en carreteras, no en ferrocarriles) o estrechos, o bien fueron abandonados o bien fueron objeto de ensanches de resultado muy desigual [1].

Cuando empiezan a implantarse los primeros sistemas de gestión de puentes, con las correspondientes campañas de inventario e ins-



Figura 11. Apeo de las bóvedas del puente de Deba y aprestes dispuestos para su sujeción. Desarrollo de ULMA a partir de la propuesta de FHECOR-INJELAN. Fotos de los autores

pección, en los últimos años del s. XX, las Administraciones empiezan a darse cuenta de que hay que incluir los puentes de piedra. Así lo entiende nuestro recordado Ramón del Cuervo, presidente del Comité de Puentes de la ATC-AIPCR hasta 2001, en cuyo seno se constituye el grupo de trabajo “Puentes de Fábrica” en 1996, que empieza elaborando un glosario de términos [12], porque hasta la jerga se había olvidado. Siguieron luego otros documentos en los que tuvimos la fortuna de participar, combinándose el trabajo académico y el corporativo en ese singular grupo de trabajo [1, 13, 14].

Llegó el llamado “Plan Bolonia” que, junto a algunos inconvenientes, aportó la oportunidad de actualizar contenidos, como así ha sucedido. Desgraciadamente, en nuestra Es-

cuela sucedió que la referida asignatura, en la que se tratan muy específicamente los puentes de piedra o ladrillo, se ofrece sólo a los alumnos del Máster Universitario en Ingeniería de Estructuras, Cimentaciones y Materiales, pero no a los del Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos (habilitante para ejercer la profesión de Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos). Así, nuestro plan docente no cubre, clamorosamente, esta laguna formativa. Creemos muy firmemente que no basta con ofrecer esta formación a profesionales que proceden, en su gran mayoría, de otras disciplinas y universidades (Arquitectura o Arquitectura técnica, o Ingeniería Civil de otras Escuelas de todo el mundo). Se trata, que quede claro, de alumnos que en buen número han redactado tesis o trabajos fin de máster que han

sido merecedores de excelentes calificaciones, lo que nos ha permitido atesorar un acervo teórico-práctico muy reconocido. Pero es imprescindible que nuestros excelentes alumnos de máster de ingeniería de caminos, que en su mayoría proceden de la formación de grado, con gran nivel, tengan también la oportunidad de ver satisfecha esa formación con el reconocimiento académico correspondiente. No se trata de una veleidad, de un capricho revestido de reivindicación académica para satisfacer a unos docentes, por muy entusiasmados que estemos. Se trata de formar, en una asignatura semestral, ingenieros capaces de responder a las necesidades que se les planteen en el desempeño de su actividad profesional en relación con los puentes de piedra o ladrillo.

Ya hemos dicho que el número de puentes de este tipo es muy grande en España, de los más numerosos de Europa occidental. Aunque, lamentablemente, no se ha completado aún el inventario, se estima que puede haber entre 15.000 y 20.000 puentes de piedra o ladrillo. No enseñar cómo son, cómo funcionan, cómo se construyeron, qué riesgos les acechan y cómo se rehabilitan es tan absurdo como decir que deja de impartirse la materia de Estructuras y Puentes Metálicos porque el porcentaje de puentes de ese material (incluidas

las estructuras mixtas) es del orden del 5% del total, es decir, unos 5 000 puentes, en números redondos, es decir, claramente minoritario. No basta, pues, decir que los programas docentes están saturados, lo cual es cierto, como nos explican los responsables de la Escuela, que, comprendiendo este planteamiento, están haciendo un esfuerzo para enmendar la carencia denunciada. Un lustro después de que se haya implantado el nuevo Plan de Estudios es tiempo suficiente para hacer balance y, si procede, reorganizar ofertas y contenidos.

Los ingenieros de caminos, tanto los futuros como los que ya lo son pero no tuvieron la oportunidad de estudiar estos puentes, deben saber cuáles son sus puntos fuertes, entre los que están la gran capacidad frente a sobrecargas, la gran durabilidad [15] y el reducido mantenimiento asociado, y sus puntos débiles: cimentaciones, movimientos impuestos, lixiviación de rellenos. Algunas de esas debilidades se han puesto de manifiesto por la desafortunada intervención de otros ingenieros de caminos que desconocían qué se puede y qué no se debe hacer en estos puentes, ignorando los efectos de la socavación y el descalce, consintiendo empujes desiguales en pilas o reparando con morteros de cemento que son tan poco saludables para la

obra de piedra o ladrillo como la cicuta al ser humano. Todo ello por no hablar de la desidia al permitir adosar en cualquier sitio conducciones parasitarias o disponer ensanches o sistemas de contención tan agresivos visualmente como la “restauración” del Ecce Homo de Borja hace unos años.

Está arraigada la idea de que estos puentes son robustos y que están tan sobredimensionados que no es necesario hacer comprobaciones estructurales, en la línea del aforismo de Ortega y Gasset (La ciencia consiste en sustituir el saber que parecía seguro por una teoría, o sea, por algo problemático), en una frase que conviene releer antes de caer en la tentación de disentir, porque dudar es consustancial con el aprendizaje (Aristóteles afirmaba que el ignorante afirma, el sabio duda y reflexiona). Es cierto que la pervivencia de estos puentes, extendida en el tiempo durante tantos siglos, avala la idea de que su solvencia es patente, pero eso no significa que, en determinadas circunstancias, no haya que comprobar la capacidad de cimentaciones, bóvedas, o tímpanos, como es el caso del dimensionamiento de recalces o ensillados, o la aptitud frente al paso de determinados vehículos cuando, como consecuencia de movimientos en la cimentación, se advierten rótulas en sus bóvedas.



Figura 12. Descensos y giros en pila como consecuencia del deterioro progresivo de las cimentaciones profundas (pilotes) del puente de Astiñene (S. Sebastián). Fotos de los autores (2017)

En efecto, los menores conocimientos de la Mecánica de Suelos y los incomparablemente más deficientes métodos constructivos de que disponían aquellos proyectistas y constructores (en comparación con los que tenemos desde mediados del s. XX, lo que otorga aún mayor mérito a aquellos bravos ingenieros), traen consigo descensos y giros que, en el caso de puentes de piedra o ladrillo (figura 12), se traducen en desórdenes en las bóvedas con un rápido y progresivo descenso del nivel de seguridad.

Así, merece la pena señalar el poco conocido hecho de que las pilas que descienden ven aumentar la reacción vertical que gravita sobre ellas y eso, obviamente, compromete aún más su estabilidad, pues un incremento de carga suele traer consigo un aumento de los efectos provocados por ésta. En la figura 13 se esquematiza el efecto engañoso que la costumbre puede generar en el ingeniero estructural, que tiende a considerar universal el hecho de que, en sistemas rígidos como las vigas continuas, el descenso de uno de sus apoyos se traduce en una relajación de la reacción. Eso es cierto en vigas, pero opuesto en el caso de bóvedas. En efecto, puede verse que a medida que asciende un apoyo (desciende en la expresi-

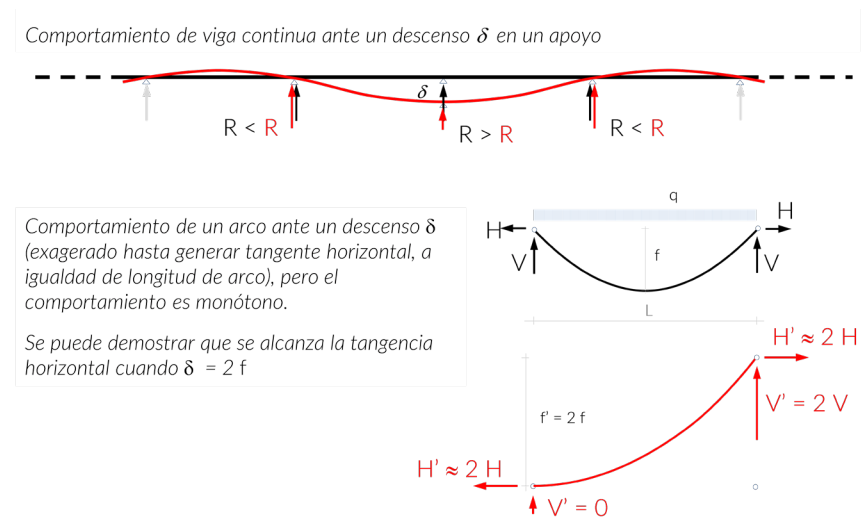


Figura 13. Contra δ : del efecto estructural generado por el descenso de un apoyo en una viga continua y en un arco o bóveda, respectivamente. Figura de los autores.

ción antifunicular) la reacción vertical aumenta hasta ser el 100% de la carga total actuante cuando la línea de presiones se hace horizontal en el apoyo que no se mueve. Si la pila descendió por deficiencias geotécnicas, el incremento de la carga vertical no contribuirá precisamente a mejorar las cosas. La conclusión es válida, por cierto, para puentes arco sea cual sea su material estructural. Obsérvese que también aumenta la reacción horizontal, lo que tenderá a desequilibrar otras pilas.

La propia evaluación estructural no es sencilla. La discontinuidad que se produce en las fábricas como consecuencia de la apertura de juntas hace que no sean aplica-

bles los principios de la Mecánica de Medios Continuos (porque ya no hay continuidad) y que los procesos se produzcan en un entorno no lineal que complica extraordinariamente los cálculos. La potencia de los medios computacionales actuales (elementos finitos, elementos de contorno, etc.) queda en entredicho cuando se tiene en cuenta la escasa homogeneidad de los sillares, más bien heterogéneos, morteros de diferente calidad, rellenos de calicanto lixiviados (o no), lo que hace inviable la utilización práctica de tales procedimientos, salvo para casos prototípicos [16, 17] relativamente sencillos. De la necesidad se ha hecho virtud: se han desarrollado pro-



Figura 14. Estados inmediatamente anterior y posterior a la reparación de una pila en el puente de Langa de Duero. Foto del equipo en una visita del curso 2020-21

cedimientos de comprobación que aún esperan avances significativos.

Al intervenir en recalces y refacciones (especialmente de bóvedas), es cuando el ingeniero se enfrenta con la realidad de su ignorancia y valora en su justa medida la profesionalidad de los ingenieros y maestros de obras del pasado (figura 14). ¿Cómo eran las cimbras? ¿Cómo se disponían? ¿Sobre qué elementos (los citados aprestes) se disponían los sillares? ¿Se hacían montajes en blanco? ¿Cómo se ponía el mortero de las juntas, especialmente en las dovelas más verticales de hombros y clave? ¿Cómo se controlaba la deformabilidad de la cimbra para garantizar la correcta forma de la directriz? ¿Cómo se tenían en cuenta las deformaciones instantáneas, tras el descimbrado, y diferidas por reajuste de morteros de endurecimiento tan lento como los de cal?

A esto, entre otras cosas, nos referimos cuando hablamos de la necesidad de estudiar y de enseñar, de analizar y de divulgar. Como se ha anticipado, no sólo se trata de dar respuestas, sino de hacerse preguntas. Se hace, además, justi-

cía a aquellos ingenieros y maestros que, en un medio hostil como es el de un río, dieron lo mejor de sí mismos en favor de una sociedad que no les valora suficientemente. La del pontífice es una más de las facetas de la labor social de los ingenieros de caminos.

A los argumentos esgrimidos cabe añadir que no debe descartarse el que se construyan nuevos puentes de piedra o ladrillo. Con las innovaciones que la industria y la experiencia adquirida en el ámbito de la prefabricación, por ejemplo, vayan introduciendo (ver capítulo de J. Romo en [5] y [18]). Estos materiales tienen menor huella de carbono (son más sostenibles), una gran durabilidad, acumulan razones para sacudirse un infundado velo de anacronismo y, tras algunas experiencias, de falta de competitividad.

Añádase finalmente una razón extra-técnica. Los puentes de piedra son piezas arraigadas en el paisaje y en la sociedad, de creciente sensibilidad y exigencia. Hay que conocerlos para amarlos y predicar entre los conciudadanos su valor

arquitectónico, paisajístico, cultural, técnico,... como de todos los puentes [19].

Cómo y a quién enseñar

Sin renegar de las vías de divulgación que hoy están a disposición de cualquiera, en opinión de los autores es necesario encauzar la docencia y la investigación en su ámbito habitual y eterno: la Universidad. Además del cauce natural que es la asignatura antedicha, en el contexto de los Másteres enunciados, cabe plantear cursos de postgrado y formación adicional como la que se ha dado ya, en años recientes, en el Ministerio de Fomento.

Los contenidos formativos deben abarcar los materiales (piedra, ladrillo y mortero), el funcionamiento mecánico de cada componente y el trabajo conjunto como obra aparejada frente a diferentes tipos de sollicitación, así como los mecanismos de deterioro. Deben estudiarse también sus componentes, tipologías y ratios típicas, asociadas a distintas épocas, los procesos constructivos, el porqué de sus emplazamientos y



Figura 15. Modelos reducidos y físicos, válidos para entender el comportamiento de las construcciones de piedra (CEHOPU, equipo investigador, abadía de Arthous, y puente de Deba. Las tres últimas, fotos de los autores)

configuraciones. Uno de los objetivos es que los ingenieros sepamos distinguir un puente medieval de uno romano o del s. XVIII con la misma soltura con la que otros profesionales y aficionados saben identificar los edificios románicos, los neoclásicos o los eclécticos del s. XIX. Es algo que se debe esperar de los ingenieros de caminos que saben de puentes.

En nuestra opinión, es esencial explicar a través de modelos o maquetas, porque, como se ha anticipado igualmente, es necesario despertar en el alumno (y en los ingenieros consagrados) la sensibilidad que requiere la comprensión de la forma en que trabajan estas nobles construcciones, desprovistos del corsé que puede suponer (lo hemos explicado con el ejemplo de la pila que descende) el esquema tipo “viga” o estructura de pórticos al que estamos más acostumbrados. Sentir el empuje de las bóvedas que resisten flexiones (figura 15) si el axil es suficiente y está dentro de la directriz, que la estabilidad depende de la geometría (inicial y deformada, especialmente si hay movimientos impuestos en sus arranques), adivinar la cinemática del comportamiento son virtudes de los modelos físicos que no siempre se perciben en recreaciones virtuales, cada vez de mejor calidad, ciertamente. Todo eso está en la línea del monumental libro que Javier Rui-Wamba [20] acaba de publicar y en el que afirma, precisamente, *que las estructuras no se calculan, se sienten*.

Merece la pena resaltar el papel que juegan las maquetas, que ayudan sobremedida a tener una visión global de obras antiguas y de sus métodos de proyecto y construcción. Con ellas se pueden visualizar clara e inmediatamente el proceso de construcción de un puente, detalles constructivos o las técnicas empleadas. Buen ejemplo de ello es la ma-

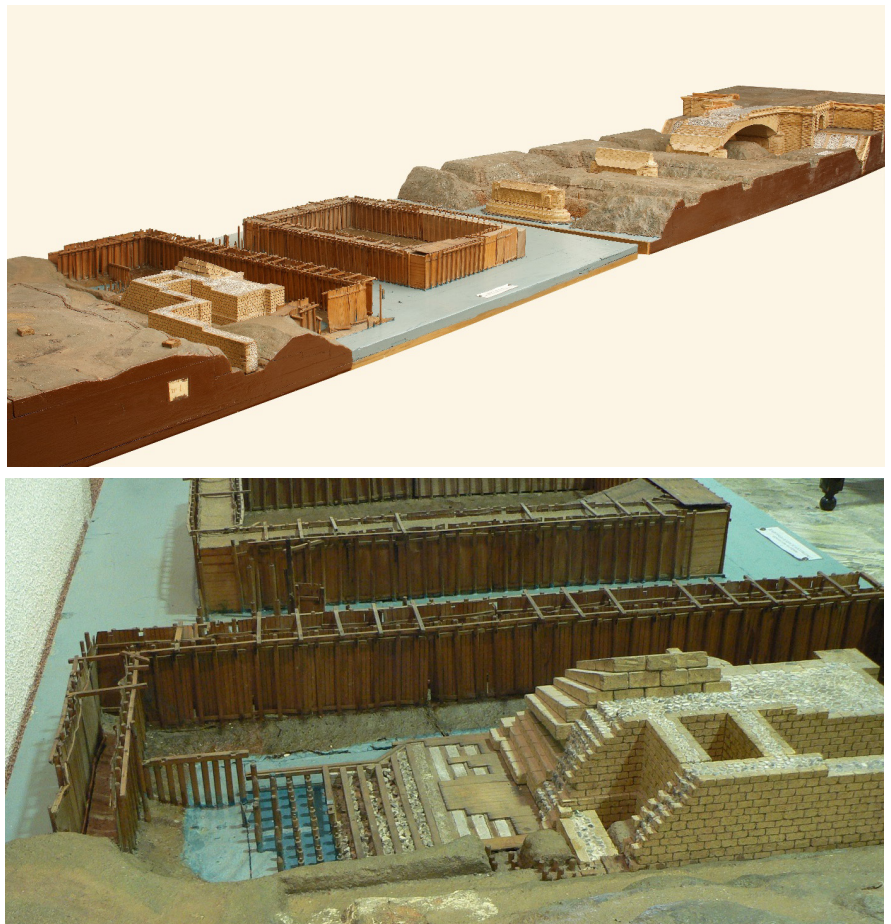


Figura 16. Maqueta del puente de Neuilly. Academia de Ingenieros del Ejército. Hoyo de Manzanares). Fotos de la Fundación Juanelo Turriano [36] y de los autores

queta del puente de Neuilly (trabajo de P. Navascués en [5, 21], o los múltiples modelos a escala reducida que se pueden encontrar en el libro de Bert Heinrich [22]) (figura 16). En este sentido, los modelos a escala reducida son también indispensables para documentar estructuras que ya no existen.

También las maquetas enseñan detalles importantísimos relacionados con el drenaje. Esto último se ejemplifica en un caso recientemente vivido por los autores en el puente de Langa de Duero, en el que se descubrió el enlosado que se hallaba bajo el pavimento aglomerado (figura 17 de la primera parte de este artículo). La lectura del tratado del Padre Pontones [8], quien trabajó en ese puente, nos permitió comprobar que en puentes de una cierta anchura y con pendiente longitudinal,

se proponía un drenaje longitudinal centrado, sin gárgolas laterales ni en clave de bóvedas, sino un canal central bajo el enlosado, guarnecido de buena mezcla de cal a modo de estuco bien bruñido:

Este canal se rellena de guijarros muy juntos y limpios, sobre ellos y demás pavimento del puente sienta el empedrado o embaldosado, con inclinación al medio pare el arroyo que causen la aguas de las lluvias y sólo para eso se dará un corto descenso desde el medio del Puente a los lados en esta disposición se libertan las bóvedas de los arcos del perjuicio sordo que padecen sin esta prevención por las aguas que se introducen. Añade que los otros conductos que se suelen hacer se ciegan pronto. (El texto en cursiva es transcripción directa del manuscrito.)

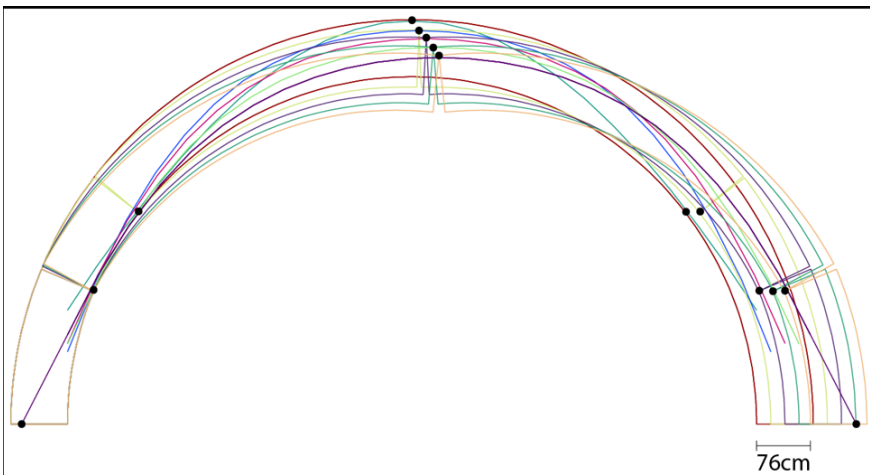


Figura 17. Estado del puente tras el colapso (foto publicada en La Rioja el 25 de enero de 2021) y análisis estructural realizado por los autores en el contexto de un trabajo fin de máster [23] y aportada al informe remitido en su día

Hay que añadir que, contrariamente al estereotipo extendido, el enlosado no constituía el pavimento sobre el que pasasen personas, carros y ganados, con las incomodidades que eso genera, sino el soporte firme de la cobertura superior de arena o macadam recebado al que se ha hecho referencia más arriba. La lección, de tipo aparentemente arqueológico o histórico, es que antes de proceder a un vaciado de senos para acometer un ensillado, por ejemplo, se efectúen calcatas de reconocimiento. No bastan los sondeos al uso, con los que no se puede detectar tan claramente el pavimento. Una vez más se pone de manifiesto que la mejor

pedagogía se hace desde la experiencia vivida.

Un desahogo final. Cuando ya habíamos terminado de escribir este artículo nos llegó la noticia del hundimiento de la bóveda del puente Mantible, del que dimos cuenta en la figura 15 de la primera parte de este artículo. No puede decirse que lo sucedido sea el resultado de la mala suerte, sino de la indolencia y la inacción de una administración (o de varias) en lo que se refiere a los puentes. El puente, Bien de Interés Cultural desde 1983, que es la máxima figura de protección del Patrimonio, ha perdido la bóveda sobre cuya precariedad muchos

nos habíamos pronunciado. Catalogado de romano por D. Carlos Fernández Casado, no parecía reunir todas las características propias de esos puentes, pero la figura 35, que muestra lo que queda del arranque de la bóveda, con espesor constante, podría dar la razón a aquel gran ingeniero que tanto trabajó por el patrimonio. Esta desgracia es también el resultado de una consideración menor de los puentes con relación a otros elementos del patrimonio y, quizás, el resultado de un razonamiento equivocado si se pensó que, después de muchos años en equilibrio, más o menos precario, podría seguir así aún un tiempo más. Lamentablemente, se hace patente la necesidad de educar tal y como reclamamos en este texto.

Cabe hacer mención al mantenimiento, especialmente por lo que se acaba de exponer. Los puentes de piedra duran mucho, pero eso no exonera a sus responsables de una política de conservación que no es fruto de la modernidad. Baste recordar la advertencia que hiciera Fray Lorenzo de San Nicolás, uno de los tratadistas a los que hemos aludido [24], acerca de la inspección de las pilas frente a una amenaza crítica como es la socavación. Tras recomendar, para prevenirla, que las cimentaciones deben profundizar todo lo posible, señala que *por esto convendrá que los señores de las puentes en los veranos hagan que los Maestros recorran las cepas, si en el invierno han sido robadas, para recibirlas, que eso se hace con facilidad, y el hacerla después de caída es difícil* (pág. 123 de su tratado, con texto actualizado ortográficamente). Los autores sentimos que se hace verdad la exhortación de san Juan de la Cruz: *Buscad leyendo y hallaréis meditando*.

Referencias

- [1] Comité de Puentes de carretera de la ATC-AIPCR. Grupo de trabajo "Puentes de fábrica". Criterios de intervención en puentes de fábrica. 2014.
- [2] E. González Redondo and R. Aroca Hernández-Ros, Cimbrado y descimbrado de puentes en el s. XVIII: Perronet. Actas del Cuarto Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Cádiz, 27-29 de enero de 2005.
- [3] B. Orfeo, L. Todisco, J. León, Construction process of vaults in masonry bridges: the importance of centrings. International Journal of Architectural Heritage. Conservation, Analysis and Restoration, 2021, doi: 10.1080/15583058.2020.1861389.
- [4] M. Sánchez Taramas. Tratado de fortificación ó arte de construir los edificios militares y civiles. Escrito en inglés por Juan Muller. Barcelona, 1769.
- [5] F.J. León y J. M. Goicolea (coord.). Los puentes de piedra (o ladrillo) antaño y hogaño. Fundación Juanelo Turriano. Colección "Lecciones Juanelo Turriano de historia de la ingeniería". Madrid, 2017.
- [6] J.-R. Perronet. Construire des Ponts au XVIII siècle. 1987.
- [7] M. R. Morandière. Traité de la construction des ponts et vauducs en pierre, en charpente et en métal pour routes, canaux et chemins de fer avec un appendice pour la construction des souterrains. Paris, 1874.
- [8] Padre Pontones. Arquitectura Hydraulica en las fabricas de puentes. Methodo de proyectarlos y repararlos. 1768.
- [9] C. F. Wiebeking, Theoretisch-Practische Wasserbaukunst. Darmstadt, 1805.
- [10] M. Durán Fuentes. La utilidad de antiguos conocimientos constructivos en las obras de restauración de puentes históricos. Actas del Quinto Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Burgos, 7 - 9 de junio de 2007. [Online]. Available: http://www.sedhc.es/biblioteca/actas/CNHC5_026-M.Dur__n.pdf.
- [11] P. Séjourné. Grandes voûtes. Bourges, 1916.
- [12] Comité de Puentes de carretera de la ATC-AIPCR. Grupo de trabajo "Puentes de fábrica". Primer glosario de términos empleados en puentes de fábrica. Separata del número 70 de RUTAS. Enero-febrero, 1999.
- [13] Comité de Puentes de carretera de la ATC-AIPCR. Grupo de trabajo "Puentes de fábrica". Ensilado de bóvedas. 2002.
- [14] Comité de Puentes de carretera de la ATC-AIPCR. Grupo de trabajo "Puentes de fábrica". Cimentaciones de fábrica en puentes. 2008.
- [15] M. Tena, L. Todisco, J. León. Calibration of the ageing process of masonry bridges based on field inspections and construction quality. Structural Engineering International (SEI), vol.28, no. 3 pp. 325-337. 2018.
- [16] L. Mutiloa, A. Guamán, J. León, L. Todisco. Desplazamiento horizontal límite en arcos de fábrica. Informes de la Construcción. Pendiente de publicación.
- [17] E. Stagnitta. Modeling of a masonry arch using the discrete element method. Trabajo de Fin de Máster, dirigido por J.M. Goicolea. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UPM, 2019.
- [18] L. Todisco, E. Stocks, J. León, H. Corres. Enhancing the structural performance of masonry structures by post-tensioning. Nexus Network Journal. 20 - 3, pp. 671 - 691. 2018.
- [19] Comité de Puentes de carretera de la ATC-AIPCR. Grupo de trabajo sobre "Valor patrimonial de los puentes". Recomendaciones para caracterizar el valor patrimonial de los puentes. 2020. Pendiente de publicación y presentación.
- [20] J. Rui-Wamba. Teoría unificada de estructuras y cimientos. Una mirada transversal. Reverté, 2000.
- [21] P. Navascués Palacio et al., Maquetas y Modelos históricos - Ingeniería y construcción. Madrid, 2017.
- [22] B. Heinrich. Brücken: Vom Balken zum Bogen. Kulturgeschichte der Naturwissenschaften und der Technik. Deutsches Museum München. Hamburg, Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH. 1983.
- [23] A. Guamán. Desarrollo de una herramienta para deducir el desplazamiento límite en arcos de fábrica. Trabajo fin de máster dirigido por J. León y L. Todisco. Noviembre, 2019. ETSICCP-UPM
- [24] J. León. Construcción y reparación de puentes según cuatro tratadistas españoles de la Edad Moderna. Capítulo del libro Sueño e Ingenio. Libros de ingeniería civil en España, catálogo de la exposición homónima en la Biblioteca Nacional, cuyo comisario fue el historiador Daniel Crespo. Fundación Juanelo Turriano y Biblioteca Nacional. 2020. ❖