

Elogio de los puentes de piedra.

Apelación a que los ingenieros los estudien

(1ª parte)



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

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.

Introducción

Leonardo da Vinci, personaje en el que se dan cita la curiosidad infinita, la entrega al trabajo y el espíritu racionalista del Renacimiento, proclamó: *Il grande amore nasce de la grande cognitione de la chosa che si ama*. Este aserto sintetiza a la perfección que ingenio y arte, técnica y emoción, no son incompatibles, sino recíprocamente potenciadores sobre la base del conocimiento, que es fruto del estudio. A eso se refiere el título de este artículo: a la exhortación para que los ingenieros estudiemos los puentes de piedra (o ladrillo). Estudiar para conocer y así amar más esos objetos. El lema de Leonardo, por cierto, entraña una simbiosis de razón y sentimiento, de racionalismo científico que se torna en amor, sentimiento difícilmente explicable en términos físico-matemáticos. El amor estimula la profundización en la materia objeto de estudio: una dualidad sinérgica formidable propia del ser humano con voluntad.

A los autores nos parece imprescindible retirar el velo de anacronismo, de artefacto viejo y superado que parece cubrir a los puentes de piedra. Tal velo ha sido tendido sin querer por los propios ingenieros que los han arrumbado de *facto*, tácita o explícitamente. Viene a cuento el aforismo de Chesterton, quien afirmaba que *la tradición es la transmisión del fuego, no la adoración de las cenizas*, porque de lo que se trata es de explicar, de prender la llama de la curiosidad por los puentes de piedra para quererlos más, con actitud activa y no meramente plañidera.

Carlos Fernández Casado, filósofo además de ingeniero, afirmó [1] certeramente que *ese grande amor legitima el fruto material de nuestra relación con las cosas*. Don Carlos, gran estudioso de los puentes, singularmente los de piedra, proyectista



Figura 1. Puente de Langa de Duero en enero de 2021, tras su restauración parcial. Foto de Javier Barrio, alcalde de Langa de Duero

de nuevos puentes y admirador de los históricos, basaba en el principio citado la justificación de sus actos. También podemos hacer lo mismo los ingenieros de hoy y, especialmente los ingenieros de mañana. A dar argumentos para conocer los puentes de piedra está dedicado, modestamente, este artículo.

Qué son los puentes de piedra

A pesar de estar ahí desde hace siglos o milenios, los puentes de piedra o ladrillo siguen siendo prácticamente desconocidos por los ingenieros, aunque se han pronunciado ya sobre ellos bastantes voces muy autorizadas [2, 3, 4]. En el plano técnico, puede resultar sorprendente que, en el s. XXI, cuando parece que las técnicas de reconocimiento y de cálculo lo pueden aparentemente todo, aún no se esté en condiciones de evaluar con garantías suficientes cuáles son los umbrales aceptables de movimiento en bóvedas, muros o pilas frente a los problemas de cimentación, o la contribución de relleños, o la capacidad de los tímpanos, etc. Cuando se trata de restaurar o de reconstruir estos puentes, siquiera parcialmente, tampoco cuentan los profesionales con el bagaje necesario de conocimientos en esta

ancestral actividad, propia de los ingenieros de caminos.

Si bien se han dado pasos muy importantes para el estudio ingenieril, no sólo histórico, de los puentes de piedra o ladrillo, detectamos que aún es necesario profundizar en el conocimiento de estos puentes. Estas obras juegan un papel fundamental en la sociedad, siendo no sólo parte integrante del paisaje, sino elementos vertebradores del territorio, sustanciado en su insuficientemente apreciado valor de uso (que se lamenta cuando se pierde). Para preservar todas las bondades que siguen ofreciendo, es indispensable tener un conocimiento profundo de estos puentes, de su historia, de su variedad tipológica, de los criterios de proyecto y construcción, así como de sus aspectos funcionales y estéticos, conjuntamente con otros valores sociales, paisajísticos o técnicos que los adornan [5].

El valor de la historia

Decíamos en [6] que *es errónea la idea de que la visión histórica es exclusivamente retrospectiva. La visión histórica es profundamente analítica e innovadora. Así, los que realizan una investigación (las tesis doctorales son paradigmáticas en este aspecto) hacen un estudio o re-*



Figura 2. De izquierda a derecha, esquema típico de las cimentaciones con pilotes y encepado de madera (tomado de Wiebeking y Perronet, Biblioteca de la ETSICCP-UPM). Extremo inferior de pilote con azuche (Museum für Geschichte, Basilea, Suiza). Maquinaria para hincas de pilotes (tomado de Perronet y Wiebeking). Detalle de emparrillado, tarima y zampeado tomado del proyecto de refuerzo del puente de Deba de 1892

visión del “estado del conocimiento”. Eso es estudiar historia: saber qué han hecho otros en el pasado, más o menos remoto, detectar sus lagunas con comprensión e indulgencia para con los errores y, por consiguiente, los resquicios por los que cabe abrir un nuevo frente de conocimiento. La historia permite estimular al alumno en la inventiva, en la capacidad de discurrir nuevas ideas, de entender conceptos que otros ya pensaron para sí y para sus sucesores. Es el caso de quienes, antes que Freyssinet, entendieron el efecto beneficioso que los pináculos dispuestos sobre los contrafuertes de las catedrales, antes de descimbrar las naves, tenían para generar un estado favorable de compresiones, o el efecto de la carga muerta en los arcos de fábrica, mucho más importante que las sobrecargas, y que “pretensa” sus directrices con relación a las sobrecargas futuras.

En efecto, con carácter general, el estudio de los aspectos históricos cobra especial importancia cuando hay que enfrentarse con el problema de analizar construcciones existentes, independientemente de la tipología (edificio, puente, instalación industrial, etc.), del material principal

(hormigón, acero, madera y, por supuesto, piedra o ladrillo). En efecto, saber de la historia de la construcción analizada es tener ya medio hecha la caracterización de la construcción, porque suelen encajar los criterios de proyecto y construcción, las características de los materiales, los detalles constructivos, etc. (figura 2) con los de la época y la ubicación geográfica de la obra. Así, de una bóveda romana se sabe que el espesor era constante, cosa que no sucede, en general, en épocas posteriores, o que el relleno rígido subía hasta la clave, cosa que no sucede en la Edad Media, o que en los puentes, a partir del Barroco, empiezan a ser más frecuentes las bóvedas carpaneles o escarzanas, con ratios documentadas en los tratados acerca de los espesores de la bóveda en clave y en arranques, etc. Por no hablar de otros avatares como voladuras, refacciones, ampliaciones, recalces, construcción de defensas, etc.

Así pues, enseñar estas cosas a los futuros ingenieros contribuirá decisivamente a cubrir un vacío práctico que, de facto, está pendiente de llenar a pesar de existir tratados que lo explican, pero que no se han estudiado y trasladado al ingeniero de

hoy en lenguaje asequible y contrastado técnicamente. El bagaje de conocimientos con que hemos de dotar a los nuevos ingenieros cubre fundamentalmente los aspectos resistentes y constructivos, aunque también cabe hacer incursiones en mundos aparentemente colaterales como el de la metáfora y el lenguaje [7].

Los estudios que abordamos en nuestro grupo investigador han tenido siempre una componente práctica, de aplicación al quehacer diario de ingenieros que han de pronunciarse sobre la capacidad de estructuras que siguen prestando un impagable servicio a la sociedad. Tal pronunciamiento, considerado normal en estructuras de acero u hormigón, es también aquí necesario. Para eso el conocimiento que los ingenieros han de tener de esos puentes pasa, ineludiblemente, por los aspectos técnicos resistentes, de durabilidad y de mecanismos de deterioro, así como por los constructivos. En esa línea impartimos en nuestra Escuela desde el curso 1999-2000 la asignatura *Análisis estructural de construcciones históricas de fábrica*, que ha dado lugar a cinco tesis doctorales sobre la materia (destacan las [8, 9, 10 y 11] y a varios trabajos de sufi-



Figura 3. Posición de las rótulas en las bóvedas 2 (izquierda) y 3 (derecha) desde aguas abajo. Se han trazado las líneas presuntamente horizontales de la imposta (roja superior) y las paralelas a ésta por la rótula más baja



Figura 4. Izquierda, rotura en compresión de intradós de B-3. Derecha, apertura de juntas en intradós de B-2



Figura 5. Despegue de sillares en tajamar de aguas arriba de P-3 y piezas rotas a compresión en tímpano sobre pila 2

ciencia investigadora, llamados así en su día, y de fin de máster, más recientemente. Siempre hemos querido que el resultado del estudio y la divulgación tengan una dimensión práctica y estimulante.

Hemos vivido en carne propia –en ello han sido muy importantes experiencias profesionales recientes– que el conocimiento de las reglas de proyecto y construcción de estas obras

es verdaderamente esencial para atinar y no especular, para sistematizar con criterio y, además, para enriquecernos intelectualmente al situar la obra en el contexto geográfico e histórico correspondiente. Sabemos de algún concurso público al que sólo se presentó un equipo de técnicos. Entre las razones que probablemente explican esta anomalía, en tiempos en los que conseguir contratos es muy problemático, está el hecho

de que hay muy pocos equipos de ingenieros capaces de satisfacer la cualificación pedida y de acreditar conocimientos y experiencia práctica. Se trata, pues, de un ámbito de trabajo en el que la investigación orientada a la práctica profesional es especialmente necesaria. Las figuras 3 a 6 pretenden ilustrar estas ideas a través del ejemplo del puente de Deba, que fue objeto de visita de prácticas con los alumnos en abril de

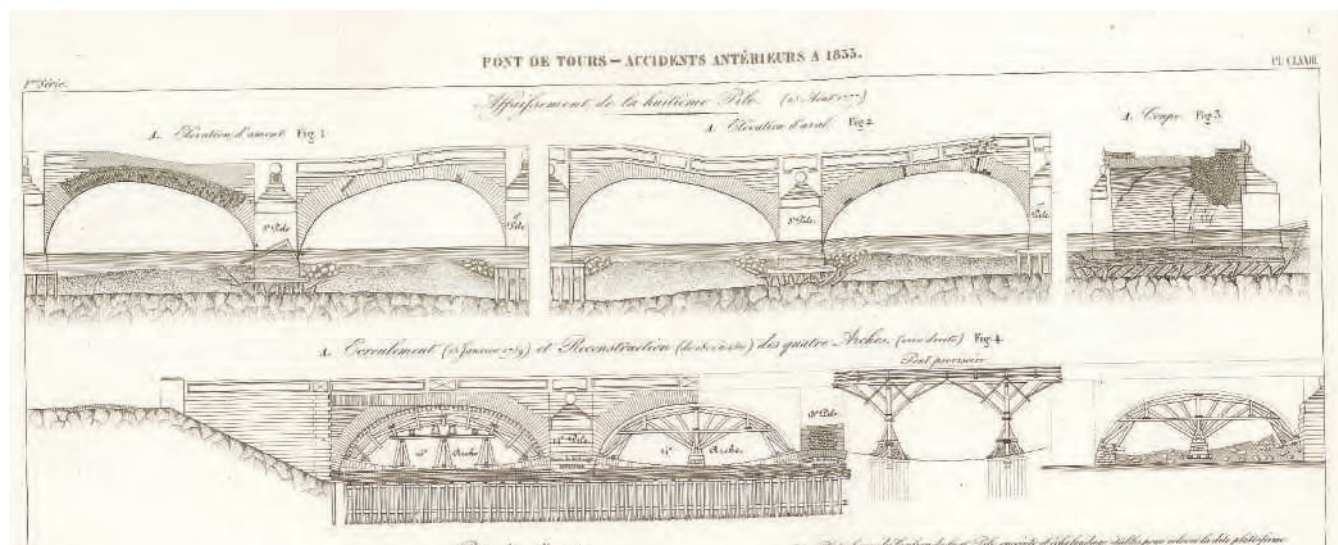


Figura 6. Puente de Tours, documentación de fallos en cimentación e intervenciones realizadas en el s XIX. Annales des Ponts et Chaussées, 1848. Biblioteca de la ETSICCP-UPM. El problema del puente de Deba, en lo que se refiere al comportamiento estructural, no es nuevo

2019. (Digamos, de paso, que en los viajes de prácticas que hacemos con los estudiantes de grado y máster, visitamos siempre puentes de piedra, ante los cuales los estudiantes experimentan una notable y desinteresada curiosidad, por cierto, porque no va a caer en los exámenes.)

Cuantitativamente, los puentes de piedra o ladrillo son muy importantes en el contexto del patrimonio que tenemos en España: cerca del 20% de los puentes de las redes españolas de carreteras y aproximadamente el 40% de los puentes de líneas ferroviarias convencionales son de piedra o ladrillo, o tienen elementos de esos materiales, como estribos y pilas. Sobre su estado, capacidad resistente y, en su caso, rehabilitación o refuerzo deben pronunciarse, ya lo hemos dicho, los ingenieros de caminos en el ámbito de sus competencias, y deben hacerlo con fundamento. Para comprender mejor la importancia de los puentes de piedra o ladrillo, piénsese, por ejemplo, que los puentes metálicos o mixtos apenas representan un 5% del total en España, mientras que el resto son de hormigón (del orden de 2/3 del total en el ámbito carretero y del 60% en el ferroviario de líneas convencionales). Para estos materiales, hormigón y acero, los

aspectos técnicos son más asequibles porque, con hormigón y acero, se siguen proyectando y construyendo puentes, cosa que no sucede con los de piedra o ladrillo, huérfanos de doctrina y de tratamiento normativo.

Conscientes de todo ello, organizamos en la Escuela, conjuntamente con la Fundación Juanelo Turriano, un curso de verano (julio de 2016) cuyas lecciones vieron la luz en forma de un bien editado libro [12]. El curso coincidió con una exposición de parte de los magníficos fondos bibliográficos que atesora nuestra Biblioteca, conjuntamente con la recientemente desaparecida Conchita García Viñuela (Directora de la Biblioteca). En realidad, fue el propio curso el que resultó ser una consecuencia de la exposición, enriquecida con algunas maquetas y con un ensayo en modelo reducido para explicar el funcionamiento mecánico de bóvedas y rellenos (figura 7).

El éxito del curso y de la exposición, junto a la rica base bibliográfica que se ha ampliado, han inspirado otra exposición en la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos sobre los antiguos tratados españoles, exhibiendo los más representativos, creando animaciones, dibujos, croquis y paneles explicati-

vos para que, de un modo divulgativo y amable, el público pueda acercarse al mundo de los puentes más representativos de nuestra historia. Desafortunadamente, se ha decidido posponer este proyecto a causa de la situación de pandemia global en la que nos encontramos. Sin embargo, el material preparado ha sido fundamental para impartir clases del curso universitario mencionado antes.

A título de anécdota, S.M. el Rey Felipe VI pudo contemplar parte de los fondos expuestos en la Sala de Profesores de nuestra Escuela (figura 8) por iniciativa de la Dirección, deteniéndose especialmente en alguno de ellos, los que mostraban, a partir de excelentes grabados, secuencias de los procesos constructivos de estos puentes. Y es que en nuestra Escuela se impartió en otro tiempo una formación de excelencia en la construcción de obras de fábrica, especialmente puentes, de lo que dan buena prueba los documentos que se custodian en nuestra sin igual Biblioteca o que están en los archivos de las distintas Administraciones. Retomar esta disciplina es dar continuidad a aquella excelente tradición adaptándola a las necesidades de hoy y a un contexto mucho más rico, lo que permitirá ofrecer a los alum-

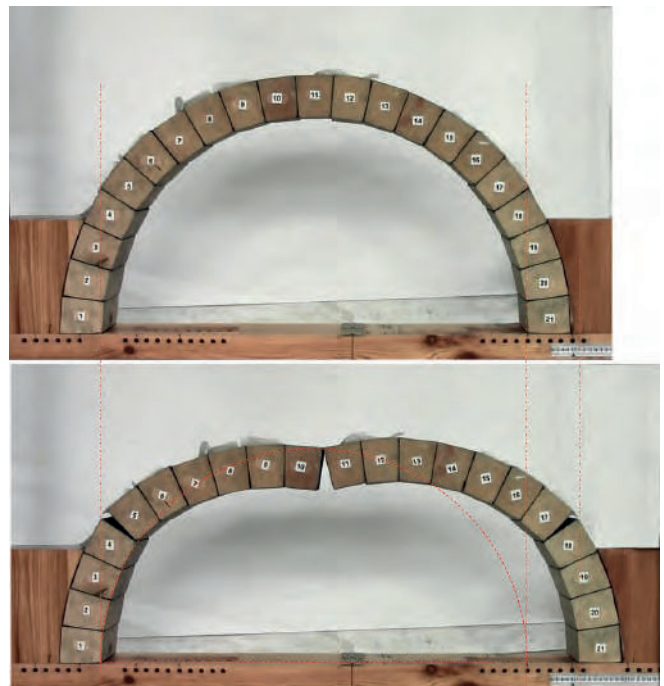
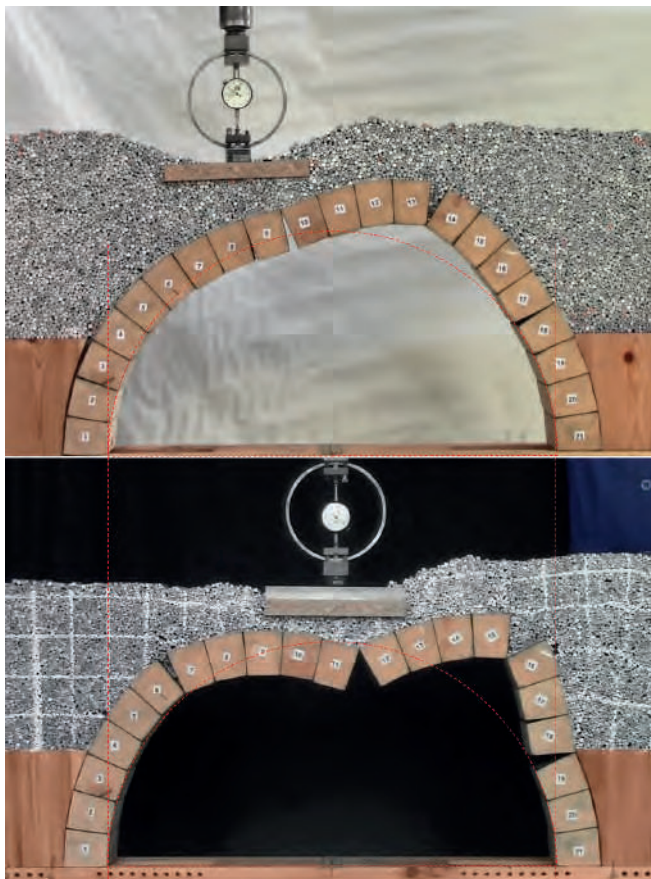


Figura 7. Ensayos en modelo reducido del comportamiento de arcos frente a cargas (a) y movimientos impuestos (b), respectivamente

nos del presente (ya lo hacemos a través de la asignatura citada) y, sobre todo, a los del próximo futuro, de nuevo esa formación de excelencia que les habilitará para entender de los puentes de piedra o ladrillo en toda su extensión técnica y cultural.

En definitiva, detectamos la necesidad imperiosa de estudiar en profundidad los tratados sobre construcción de puentes de piedra o ladrillo entre los siglos XVI y primeros años del XX, lo que está siendo objeto de la tesis doctoral de la autora segunda de este artículo. También hemos participado en una exposición en la Biblioteca Nacional [13]. Se trata, por orden cronológico, de los llamados *Veinte y un libros de los Yngenios, y Maquinas de Luanelo*, que aborda multitud de temas hidráulicos, entre ellos los puentes; la obra de Fray Lorenzo de San Nicolás, de la que importa principal, pero no únicamente, a nuestros efectos, el capítulo LXV de la primera parte

(1639) del *Arte y Uso de la Arquitectura*; el extenso y completo tratado sobre puentes que el jerónimo Fray Antonio de San José (el Padre Pontones) escribió entre 1759 y 1768 (figura 12); y, finalmente, la aportación del ingeniero militar Miguel Sánchez Taramas completando el *A Treatise containing the elementary part of fortification* (1746) de John Muller. Se ha recorrido así el panorama de la inge-

niería de puentes del Renacimiento a la Ilustración a través de una serie de personajes que, no siendo únicos, son representativos de una época y un conocimiento, destacándose los aspectos técnicos que aportan estos autores a los ciudadanos del presente, particularmente a los ingenieros que tenemos que entender cómo eran, se construían y se mantenían los puentes; pero también cómo uti-



Figura 8. Visita de S.M. el Rey a la exposición de la Sala de Profesores de la Escuela (23.09.2020)

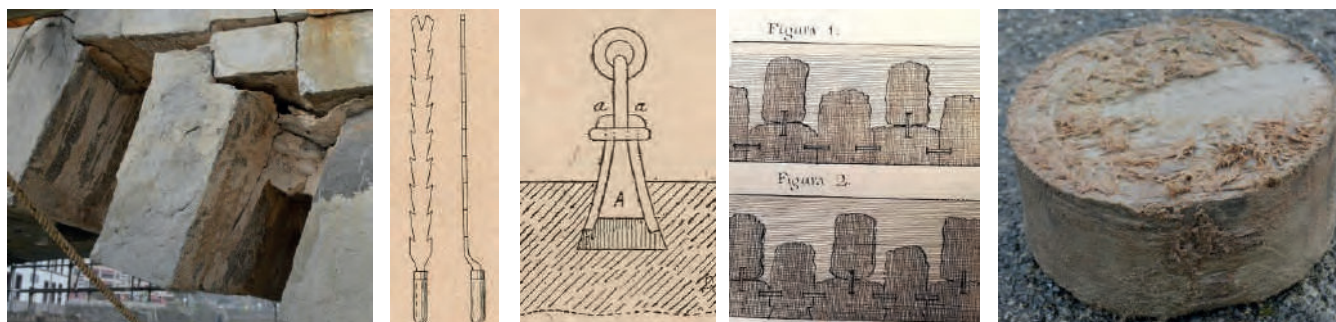


Figura 9. Configuración de dovelas y mortero (puente de Deba) útiles asociados al proceso constructivo (espátulas para disponer el mortero en las dovelas y holivelas para el izado de sillares, según Chaix, s. XIX, casi idénticos a los dispositivos encontrados en los Veintiún Libros...), grapas y pilote de madera (puente de Deba). Fotos de los autores

lizaban los tratados para transmitir estos conocimientos.

Es necesario decir que abordar ese estudio nos ha puesto frente al espejo del verdadero conocimiento, haciéndonos ver cuán lejos estábamos aún del entendimiento profundo de estos puentes, de la importancia ignorada de detalles constructivos (figura 9) y, asimismo, de la variedad tipológica y de criterios de proyecto y construcción. Tal análisis no se detiene en elementos meramente estructurales. Se adentra también en aspectos funcionales y estéticos, haciendo verdad el planteamiento vitruviano del inefable y deseado equilibrio entre la *Utilitas* (funcionalidad), la no tan obvia *Firmitas* (capacidad resistente y durabilidad) y la necesaria *Venustas*, la irrenunciable aspiración a la belleza. Entendemos que nuestra profesión, de la mano de nuestras Escuelas, ha de ir en pos de ese equilibrio cognitivo y de sensibilidad: se ha detectado la necesidad de conocer a fondo los puentes de piedra o ladrillo, en todas sus facetas, incluida la histórica, y dedicarle tantas investigaciones como requiera la profesión y que sus esencias se proyecten en los planes de estudios de los ingenieros.

Ámbitos de estudio

Catálogo de fuentes bibliográficas sobre la materia que, partiendo de las más conocidas, amplía el

círculo a documentos a buen seguro menos conocidos o ignorados por completo. En ese sentido, la experiencia adquirida es que algunos tratados, de menor valor relativo desde un punto de vista histórico o libresco, contienen información de enorme interés técnico. La base de conocimiento que atesora la Biblioteca de la Escuela es excelente, pero hay mucho material también en la Fundación Juanelo Turriano, el CEHOPU, el Colegio de Ingenieros de Caminos, el Ministerio de Transportes, la Biblioteca Nacional, etc. El hecho de que muchos arquitectos fueran también pontífices, como Juan de Herrera o Vandelvira (puente de Ariza, p.e.), añade un territorio de búsqueda que abre las puertas, precisamente a partir del s. XVI, a los

autores de tratados de estereotomía, por citar un ejemplo. Fuente de información adicional de gran valor es la que pueden aportar los ingenieros militares, que se organizaron antes que los ingenieros civiles (de ahí la denominación distintiva), y que tiene en España el referente, entre otros, del ya citado Sánchez Taramas (s. XVIII). Cabe añadir que esas fuentes bibliográficas son muy poco conocidas entre los ingenieros, si bien han sido algo más estudiadas por historiadores, detectándose la necesidad de coordinar la labor de ambos grupos de profesionales, pues hay documentos de gran valor técnico que no han sido tan apreciados por los investigadores de la Historia, y documentos técnicos cuyo valor histórico ha sido ignorado por la Ingeniería.

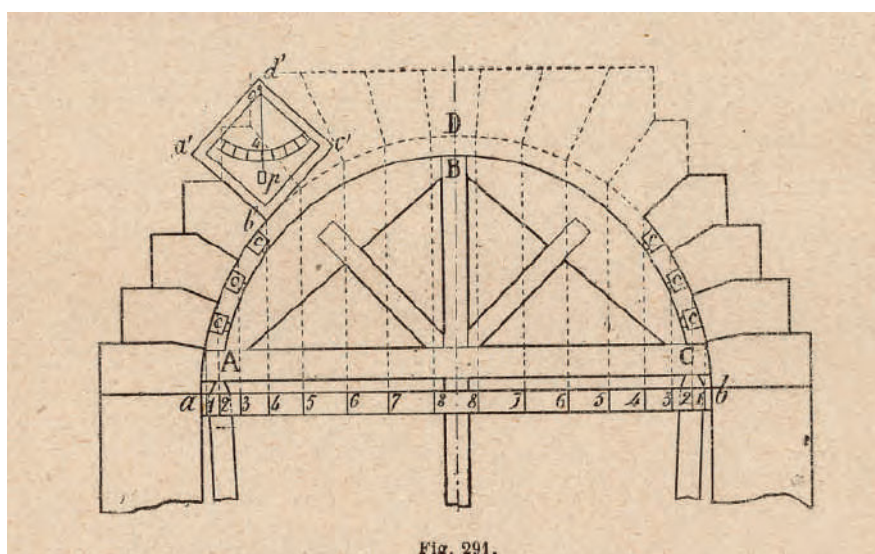


Fig. 291.

Figura 10. Procesos de replanteo de dovelas sobre los apoyos (piezas C) dispuestas sobre las bóvedas con la ayuda de un transportador. Tomado de J. Chaix. *Traité de coupe des pierres* (stéréotomie). Biblioteca de la ETSICCP-UPM

Situar en el contexto europeo el panorama de los tratados de puentes.

Si bien el ámbito que cubre el estudio realizado es el geográfico español y el temporal aludido (siglos XVI a XX), es forzoso mencionar en qué contexto se sitúan esos tratados en comparación con las aportaciones de Vitruvio o de los coetáneos del propio Juan de Herrera; o de los franceses Gautier, Bélidor, Perronet, Boistard, Morandière, Chaix (figura 10) o Séjourné; británicos como Gregory, Muller o Heyman; italianos como Castigliano, da Vinci; o alemanes como Wiebeking, por citar sólo algunos. Nos ha llamado la atención que la interrelación y el flujo de conocimientos era mayor y más intenso de lo que se supone, a pesar de que se trate de épocas consideradas casi remotas, al menos en el ámbito de la Ingeniería [14, 15].

Elaborar un glosario de términos que ayude a los técnicos de hoy a entender la jerga de aquellos tratadistas, con las explicaciones correspondientes, es importante. Ya lo fue el glosario publicado en 1996 [16] pero hemos detectado la necesidad de ampliarlo y actualizarlo. Cumplir ese objetivo es especialmente importante, dado que hace ya muchas décadas (principios del s. XX) que se dejaron de proyectar y construir estas nobles estructuras, con procedimientos y lenguaje propios, muchos de ellos comunes con la Arquitectura, que es necesario recuperar para entender más fácilmente los contenidos de aquellos tratados, y para reutilizarlos modernamente porque los salmeres, los cintreles (ver figura 14) o transportadores (figura 10), los cornijales o los aprestes, por citar sólo unos ejemplos, siguen siendo lo que eran y a ellos hay que referirse con el vocablo adecuado.

Recopilar y sistematizar las reglas relativas a la búsqueda de los mejores emplazamientos para el puente, a cuya decisión quedaba su-

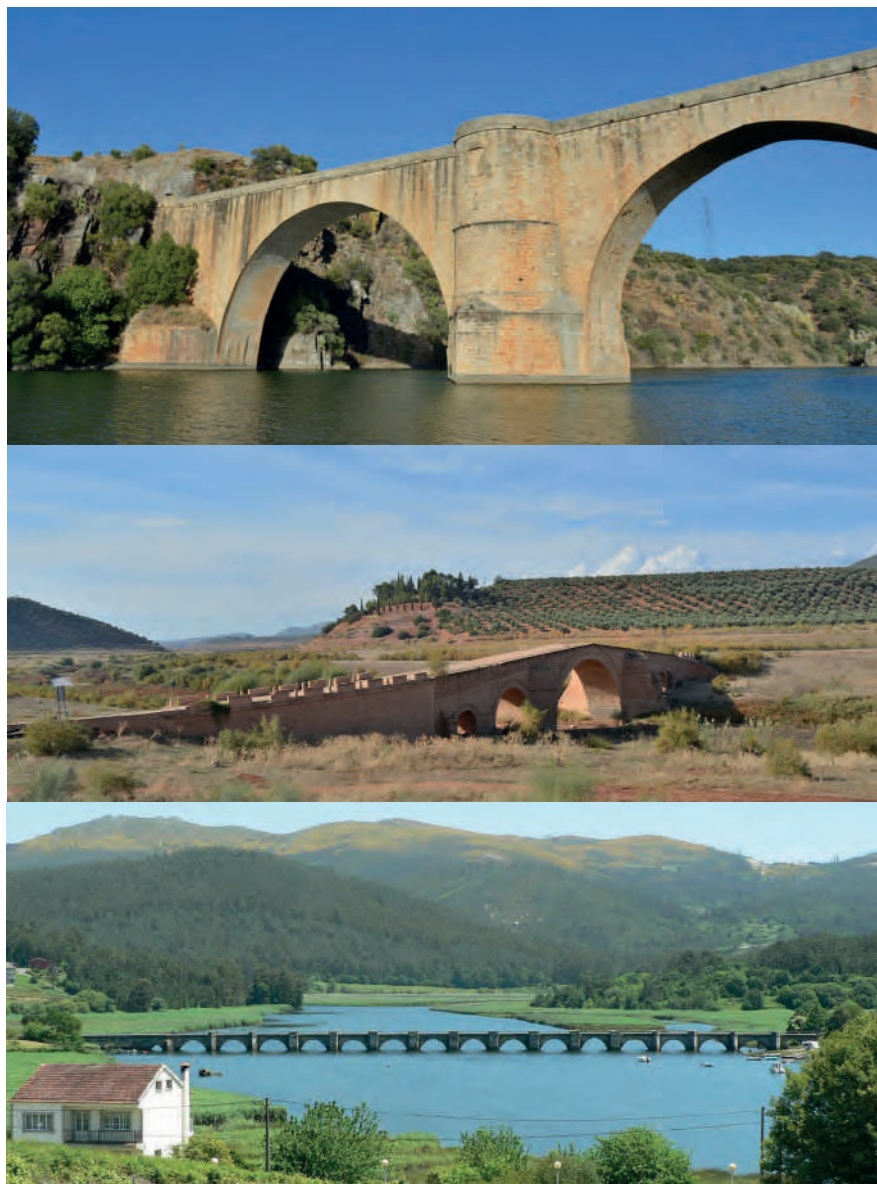


Figura 11. Puentes de Almaraz (Cáceres), Ariza (Jaén) y Nafonso (La Coruña). Fotos de los autores

reditado el trazado del camino y no al revés, como sucede a partir del s. XIX con el ferrocarril, reconocimiento del terreno en ambas márgenes y en el propio cauce, medición de caudales y dinámica fluvial, criterios para elegir la cota de la rasante y el número y luces de los vanos, etc. También, cuando proceda, los criterios urbanos y de deliberado protagonismo urbano (puentes de Segovia o de Toledo, en Madrid) o no, como los puentes de Almaraz, Jaraicejo, el ya citado de Ariza, o el de Nafonso (La Coruña) en pleno campo (figura 11), pero con la intención de que el puente sea un objeto arquitectónico

útil, solvente y bello, adjetivos que ya utilizamos más arriba. Lo relacionado con el emplazamiento es un aspecto importante pues la cimentación de estas estructuras se construyó sin los conocimientos que hoy se tienen de la Geotecnia y sin los medios constructivos de exploración y construcción de ahora. Eso hacía especialmente importante elegir cuidadosamente el emplazamiento del puente, cuestión hoy de importancia casi secundaria.

Discriminar los criterios de proyecto y los métodos constructivos de todos los componentes de los

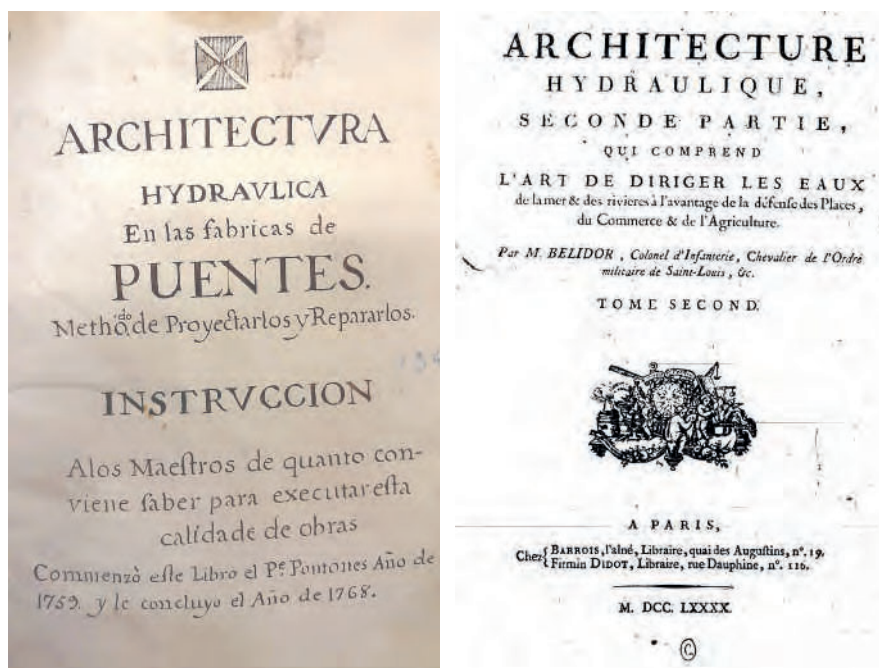


Figura 12. Portadas del manuscrito del P. Pontones (izquierda) y del tratado de Bélidor

puentes: pozos, zapatas, plintos, zampeados, pilotes, muros, tímpanos, bóvedas, rellenos, tajamares, desagües,... Especialmente significativo es el caso de la cimentación, terreno fronterizo todavía hoy (o quizás especialmente hoy) con los especialistas en geotecnia y de los trabajos bajo tierra o bajo el agua. Se trata, quizás, de uno de los hechos diferenciales más claros entre la construcción de edificios y la de puentes (de ahí el título del tratado del P. Ponto-

nes, dado que en los puentes siempre había que lidiar con el agua, o de Bélidor, figura 12). Con excepciones como la de Venecia, entre otras no menores, las cimentaciones de las grandes catedrales no resultaban tan complejas y llenas de incertidumbres de todo tipo como las de los puentes, especialmente en ríos caudalosos. Conocer los criterios de proyecto y de construcción tiene importancia histórica y técnica, fundada ésta en aquélla, con visión recíprocamente

enriquecedora. Tal beneficio se plasmará en un **mejor conocimiento de las cimentaciones** (figura 13) que son, hay que subrayarlo, el talón de Aquiles de los puentes de piedra o ladrillo, por lo demás extraordinariamente competentes.

Del dimensionamiento (acción de otorgar dimensiones) de los elementos de un puente hay reglas, como las que sintetizara Gaztelu [17], recogidas también en [18]. Lo que hemos podido cotejar hasta ahora es la validez de las reglas de proyecto de los ingenieros del pasado con los resultados de nuestros propios análisis, partiendo de la base de que una cosa era proyectar, para lo que se utilizaban reglas simplificadas sancionadas por la praxis y por la aplicación progresiva de los principios de la Mecánica y de la Resistencia de Materiales; y otra cosa bien distinta es comprobar el estado de un puente y emitir dictamen, con criterio fundado, acerca de la capacidad que ofrece, de los aspectos críticos, etc.

Fruto especialmente valioso del trabajo ha sido el **estudio de las cimbras** [19] que se utilizaron para la construcción de las bóvedas y los arcos, como se ha señalado más arriba (figura 10) o se muestra en

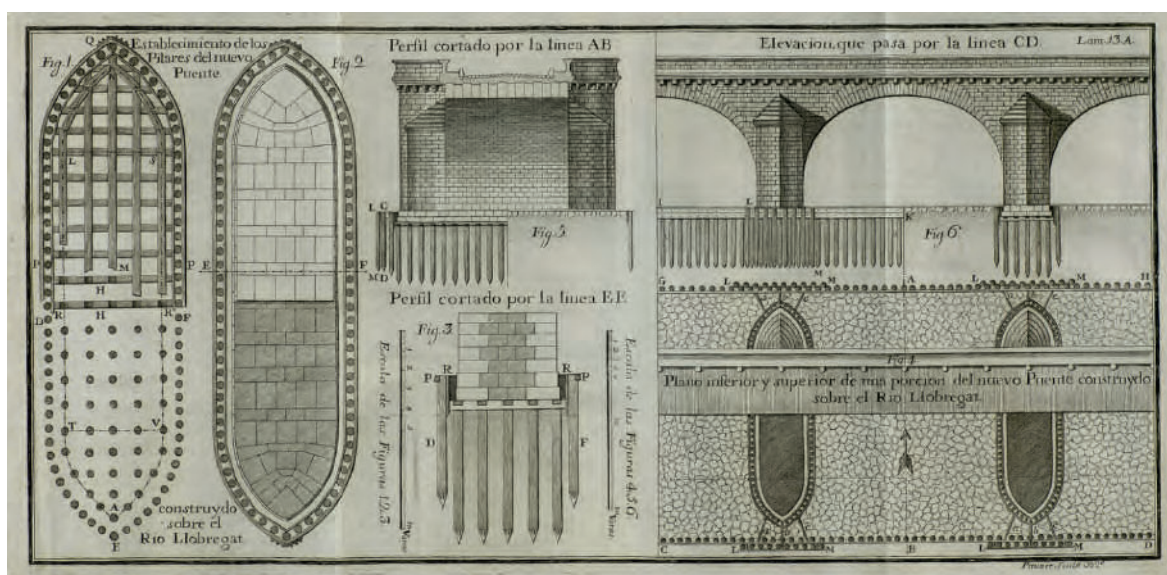


Figura 13. Recintos tablestacados y pilotes hincados de madera en la construcción de pilas en el cauce del río Llobregat (puente de Molins de Rei. Tratado de Sánchez Taramas

la figura 14. Un arco o una bóveda construidos se comportan como ya es bastante sabido por quienes nos dedicamos a esto, pero no son nada, sino mera carga sobre su soporte, que es la cimbra, hasta que se pone la dovela de clave y se retira esa cimbra. Hemos aprendido que la configuración final de las bóvedas depende también en buena medida de las cimbras que se pudieron utilizar, de dónde se apoyaban éstas, de cuál habría de ser la geometría que se otorgase a esas estructuras ("ingeniería efímera" en palabras de nuestro reconocido Julio Sánchez) para que el acabado final fuera formalmente el deseado. Por no hablar de cómo labrar las piezas, situarlas ordenadamente en su posición con ayuda de cintreles o transportadores de ángulos, o disponer el mortero en sus juntas (figuras 10 y 14). El estudio no ha hecho más que abrir las posibilidades de investigación en ese terreno. Sus consecuencias prácticas no sólo se cifran en mejorar el conocimiento histórico; sirven para orientar mejor las actuaciones de reparación, refuerzo o reconstrucción, como sucede en el citado puente de Deba o en el de Mantible (figura 15, a la que nos referiremos), y también para plantear, por qué no, la construcción de nuevos puentes de piedra.



Figura 14. Empleo de cimbras para la construcción de un puente sobre el río Tera (Zamora) (Foto Laurent, mediados del s. XIX)

Documentar asimismo los criterios relativos a los acabados:

pavimentos, balconillos, impostas, hornillos, caces, sumideros, gárgolas, pretils, guarda-ruedas, etc., todo ello para entender mejor aspectos tan importantes como las pendientes, los pavimentos y los enlosados inmediatamente situados bajo éstos, las impostas, albardillas, contra-bóvedas, rastrillos o los más ornamentales como escudos, florones, pináculos, hornacinas, etc. Especialmente importantes e ignorados son el sistema de drenaje, los pretils y sus protecciones (guarda-ruedas, dispuestos para impedir que el impacto de los carros dañara a los

pretils) (figuras 16 y 17). Algunos componentes no son estrictamente estructurales (los pretils sí lo son, por ejemplo, aunque no lo parezca), pero están vinculados a la vida del puente y a su ornamentación. Además, sus fallos pueden llevar a daños relevantes a los usuarios, aunque no estén relacionados a un colapso global de la estructura, como es el caso de los tímpanos. Experiencias recientes, como la restauración del puente medieval de Langa de Duero (Soria, figura 1), ponen de manifiesto la sabiduría de los maestros del pasado, que aseguraron un drenaje longitudinal del puente muy eficaz, discurriendo incluso bajo un hermo-



Figura 15. Puente Mantible (Logroño). Fotos de este equipo, cuando emitió un informe *motu proprio* remitido al Ayuntamiento para advertir del riesgo de colapso (noviembre de 2019). El texto recibió el informe favorable de la Comisión de Monumentos de la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando y se convocó concurso para la restauración



Figura 16. Puente del P. Pontones sobre el río Zapardiel, en S. Vicente, cerca de Go-meznarro (Valladolid). Se aprecian el pavimento (zahorra compactada) y los guarda-ruedas. Foto de los autores



Figura 17. Enlosado hallado bajo el pavimento del puente de Langa de Duero (Soria) en septiembre de 2020 (foto de José Vicente García)



Figura 18. Placa en el puente de Puente del Obispo (Jaén), sobre el Guadalquivir. Foto del equipo. El texto reza así: Este puente se llama del Obispo. Hízola toda a su costa D. Alonso de la Fuente del Sauce, Obispo que fue de Mondoñedo y después de Lugo y en el año 1500, de Jahen. Y dejó el paso libre de ella. Y es libre de todos, sin pagar tributo alguno. Comenzada el año mil y quinientos y cinco, y acabada el año mil y quinientos y ocho. Y concede a los que pasaran y rezaren un Ave-María, quarenta días de Perdón.

so enlosado destinado, sin embargo, sólo a dar soporte firme a una capa de rodadura más cómoda para personas, carruajes y ganados.

Enlazado con lo anterior debe hacerse referencia a **los trabajos de mantenimiento** bebiendo de las fuentes originales, que ya explicaban lo que se debía hacer en el contexto del mantenimiento ordinario, especialmente en lo relativo al drenaje, la limpieza de los cauces y la orientación de las corrientes, como la construcción de manguardias y espigas (otros conceptos que actualizar con el léxico). Los curatores romanos, los funcionarios árabes o los fabri-queros (o mayordomos) de las cate-drales son precedentes que invocar para indagar qué criterios semejan-tes se aplicaban a los puentes. Estas construcciones no han llegado hasta nosotros por milagro, sino gracias al desvelo escasamente reconocido de mantenedores y restauradores. Ejem-plos de ello son las placas de los puentes de Alcántara (Toledo) o del Puente del Obispo (Jaén, figura 18).

Finalmente, **documentar la re-lación de medios auxiliares** para cada uno de los aspectos indicados anteriormente, fijando la atención en los medios para la construcción de cimentaciones (pilotes, pantallas, etc.), pasarelas de acceso, además de las ya citadas cimbras para las bóvedas. De entrada, se identifican los dispositivos de reconocimiento del terreno, de medición de cauda-les, grúas, norias, bombas, cabres-tantes, polipastos, etc. (figura 19).

La motivación de este estudio ha nacido de la exigencia, sentida por los autores y por un número cre-ciente de ingenieros profesionales y responsables de la conservación del patrimonio de puentes, de contar con un conocimiento más profundo de los puentes de fábrica, con particular in-terés en aquellos pertenecientes al patrimonio español.

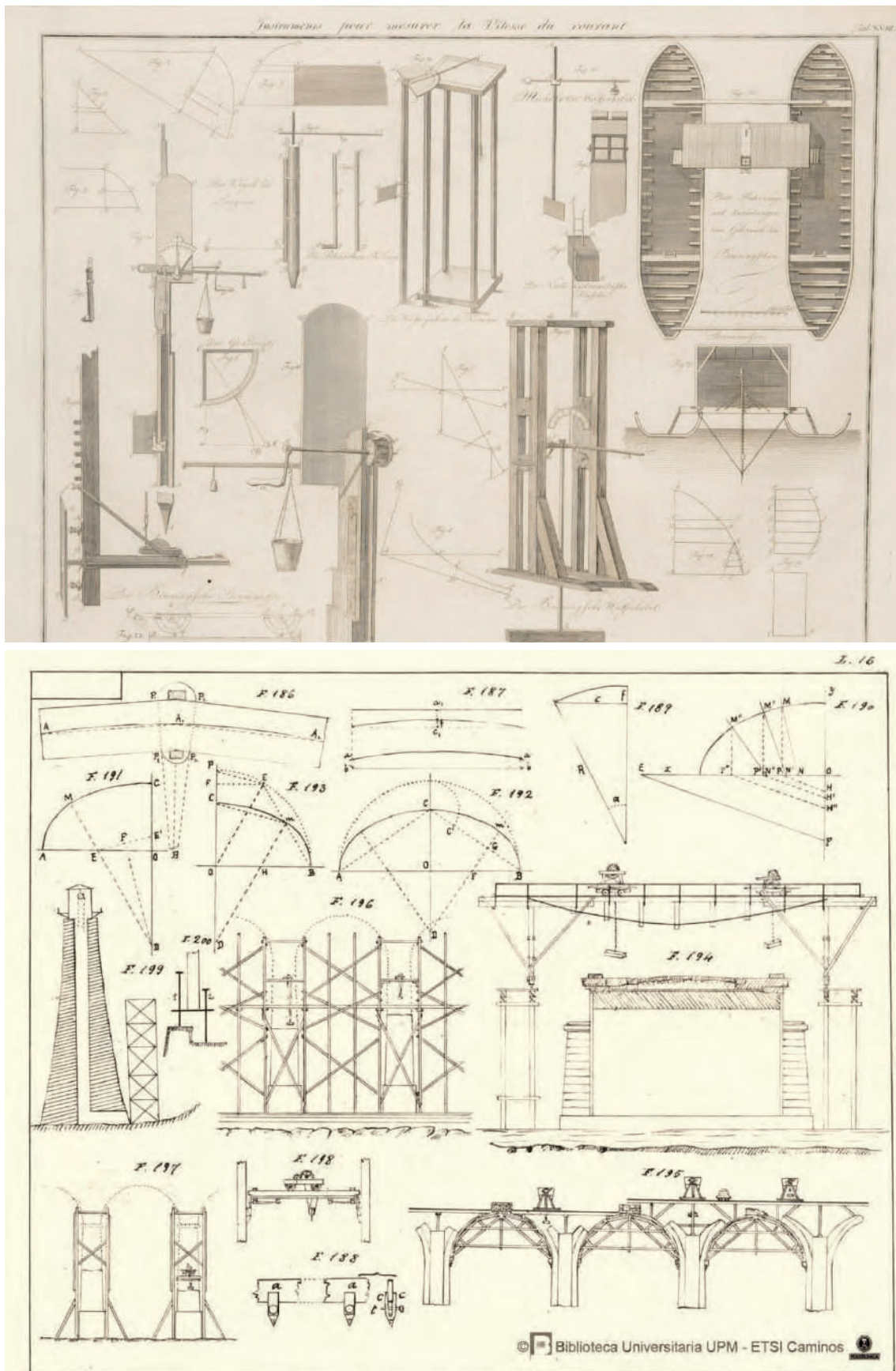


Figura 19. Arriba, instrumental utilizado para medir calados y velocidades de corriente. Wiebeking, Tab XVIII. Abajo, Procesos de construcción de bóvedas según Luis Gaztelu (s. XIX), catedrático de Puentes de la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid. Ambos, en la Biblioteca de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid

Referencias

- [1] C. Fernández Casado. *Estética de las artes del ingeniero. Discurso de ingreso en la Real Academia de Bellas Artes de San Fernando*. Noviembre, 1976.
- [2] L. Fernández Troyano. *Tierra sobre el agua: visión histórica universal de los puentes*. Colección Ciencias, Humanidades e Ingeniería. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 1999.
- [3] J.J. Arenas. *Caminos en el aire: los puentes*. Colección Ciencias, Humanidades e Ingeniería. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. 2003.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] J. León. A. Pérez, H. Corres. *Reflexiones sobre el valor pedagógico de la historia del hormigón estructural*. Actas de las II Jornadas de Enseñanza del Hormigón Estructural. ACHE. Noviembre de 2007.
- [7] E. Bauder. *Las edades del puente de fábrica. Terminología y metáfora*. Tesis doctoral dirigida por J. León y G. Aguado de Cea. UPM, 2007.
- [8] J.A. Martín-Caro. *Análisis estructural de puentes arco de fábrica. Criterios de comprobación*. Tesis doctoral dirigida por J. León. ETSICCP-UPM, 2001.
- [9] J.L. Martínez. *Determinación teórica y experimental de diagramas de interacción de esfuerzos en estructuras de fábrica y aplicación al análisis de construcciones históricas*. Tesis doctoral dirigida por J. León. ETSICCP-UPM, 2003.
- [10] A. Ramos. *Caracterización estructural de los rellenos situados en el trasdós de bóvedas de edificios históricos*. Tesis doctoral dirigida por J. León. ETSICCP-UPM, 2015.
- [11] M. Tena. *Fundamentos para la gestión del envejecimiento y conservación sostenible de las estructuras del patrimonio arquitectónico*. Tesis doctoral, dirigida por J. León. ETSICCP-UPM. 2019.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] D. Crespo. *Preservar los puentes. Historia de la conservación patrimonial de la ingeniería civil en España (siglo XVI - 1936)*. Fundación Juanelo Turriano. Colección "Lecciones Juanelo Turriano de historia de la ingeniería". Madrid, 2017.
- [15] D. Crespo. *Sueño e Ingenio. Libros de ingeniería civil en España*, catálogo de la exposición homónima en la Biblioteca Nacional, cuyo comisario fue el autor. Fundación Juanelo Turriano y Biblioteca Nacional. 2020.
- [16] 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.
- [17] L. Gaztelu. *Práctica usual de los cálculos de estabilidad de los puentes*, Madrid, 1896.
- [18] Comité de Puentes de carretera de la ATC-AIPCR. Grupo de trabajo "Puentes de fábrica". Criterios de intervención en puentes de fábrica. 2014.
- [19] 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. ❖