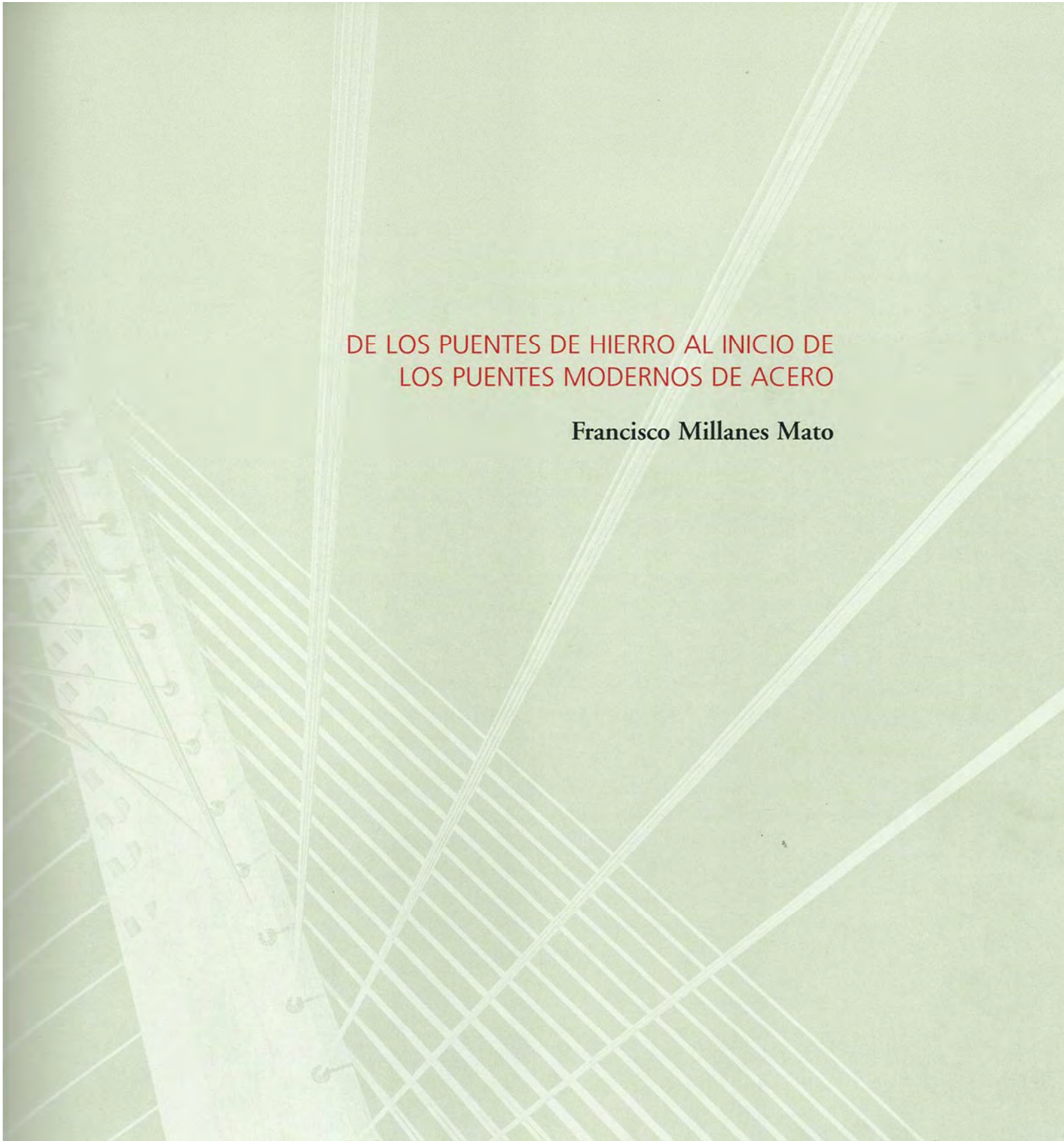




DE LOS PUENTES DE HIERRO AL INICIO DE LOS PUENTES MODERNOS DE ACERO

Francisco Millanes Mato

DE LOS PUENTES DE PIEDRA A LOS PUENTES DE HIERRO

Podría decirse que con la aparición de los primeros puentes de hierro, a finales del siglo XVIII, se inicia la edad moderna del proyecto y construcción de puentes, coincidiendo con el comienzo de la Revolución Industrial.

En muchas ciudades europeas cruzadas por ríos de cierta entidad suele encontrarse un puente antiguo, muchas veces conocido como 'Puente de Piedra', coexistiendo en la proximidad de otro más moderno, también frecuentemente llamado 'Puente de Hierro'. La propia toponimia local señala lo que, para muchos autores, constituye un criterio claramente identificador de la irrupción de la modernidad en el ámbito de la construcción de puentes. Los primeros, los puentes de piedra, utilizaban sin apenas transformación materiales extraídos directamente de la naturaleza, y aplicaron a lo largo de su dilatada historia –sin transformaciones realmente significativas desde la época romana– sistemas constructivos y configuraciones estructurales casi invariables, en arcos y bóvedas de bloques de piedra, que ya desde sus inicios permitieron solucionar –mediante obras de gran seguridad, robustez y durabilidad– el salto de calles y carreteras sobre cauces de río de gran entidad; desplazaron así a los puentes de madera al ámbito de las obras provisionales y de menor importancia, por su vulnerabilidad y rápida degradación.

La nueva era de los puentes que podríamos llamar modernos surge con la comercialización y desarrollo de nuevos materiales artificiales, el hierro y posteriormente, unos cien años más tarde, el hormigón, obtenidos mediante transformaciones más o menos complejas de materias primas naturales que, durante el proceso de elaboración, experimentan mejoras sustanciales de sus propiedades físicas y características mecánicas.

Son precisamente dichas mejoras las que permitieron ampliar el horizonte, hasta entonces muy limitado, de las configuraciones y tipologías estructurales (sistemas arco, pórtico, viga, celosías, suspensión con cables, etc.) y procesos constructivos aplicables al ámbito del proyecto y construcción de puentes. La gran rapidez de la evolución de este nuevo escenario se explica, lógicamente, por las transformaciones que, casi en paralelo, se estaban produciendo con la irrupción de la modernidad en otros ámbitos. Por un lado, la revolución técnica en el campo de la resistencia de materiales y de las teorías estructurales, que supuso la aparición de la ingeniería, como profesión independiente de la arquitectura, bajo el impulso de las escuelas de ingeniería que se fundaron en los países industrializados tras la estela de la precursora École de Ponts et Chaussées de París, fundada en 1747 bajo la dirección de J. R. Perronet; así se inició un proceso de articulación del desarrollo teórico de métodos matemáticos de cálculo y de la transmisión sistematizada de los mismos. Por otro lado, la Revolución Industrial potenció la innovación en la maquinaria y medios auxiliares, lo que, junto con la mayor ligereza, mejores propiedades mecánicas y versatilidad de los nuevos materiales, multiplicó las posibilidades de plantear sistemas constructivos adaptados al desarrollo de las nuevas tipologías estructurales, revolucionando el panorama, rígido y casi invariable, de la construcción de los arcos y bóvedas de piedra del período anterior.

LOS PRECURSORES

Los primeros puentes metálicos datan de finales del siglo XVIII y se construyeron en fundición, un material de color grisáceo, fácil de moldear y con buena resistencia a compresión pero, al igual que la piedra, demasiado frágil y quebradizo para hacer frente a solicitaciones de flexión y tracción. El primero de ellos fue el puente arco de Coalbrookdale, sobre el río Severn en Inglaterra, construido en 1779 por Abraham Darby sobre planos de Thomas F. Pritchard y John Wilkinson. Se trata de un arco de medio punto, de 30,50 metros de luz, con tímpanos aligerados con anillos circulares similares a los utilizados en el puente de Triana en Sevilla. Su concepción estructural resulta algo confusa, consecuencia de la extrapolación al nuevo material de esquemas y detalles de los arcos de piedra y, principalmente, de las estructuras de madera (imagen 1). Como bien apuntó Eduardo Torroja, “si, cuando aparece un nuevo material, la técnica tarda en crear tipologías estructurales apropiadas a sus características, la sensibilidad artística tarda aún más en aceptar su evolución”.

Hasta 30 nuevos puentes de fundición se construyeron en Inglaterra antes de 1830, encontrándose también realizaciones muy notables fuera de dicho país, como la bellísima pasarela conocida como Pont des Arts sobre el río Sena en París, primer puente metálico francés, que data de 1800 (imagen 2).

La fragilidad del material de fundición, en el origen de numerosos accidentes acaecidos a esta primera generación de puentes metálicos —principalmente a consecuencia de su mala respuesta a fenómenos de tipo vibratorio— constituía asimismo un freno a las esperanzas inicialmente suscitadas tras la aparición de este nuevo material; sus limitadas prestaciones no permitían avances significativos en las tipologías, procedimientos constructivos y luces a salvar respecto a los arcos de piedra que, por otra parte, habían experimentado un significativo desarrollo y modernización, apoyándose en los avances teóricos sobre los mecanismos resistentes de las bóvedas, impulsados por las cada vez más numerosas escuelas de ingeniería, como queda patente en las magníficas realizaciones de ingenieros tales como Perronet y, posteriormente, Sejourné.

El desarrollo del ferrocarril, asociado al propio desarrollo de la siderurgia, impulsó al mismo tiempo el de los puentes metálicos que, en el siglo XIX, experimentaron un enorme impulso y transformación para satisfacer, principalmente, la exigencias de los muchos puentes y viaductos ferroviarios que resultaba necesario construir, pero que necesitaban un material que garantizara unas prestaciones adecuadas frente a las vibraciones repetidas al paso de los pesados convoyes, requisito que la fundición no cumplía.

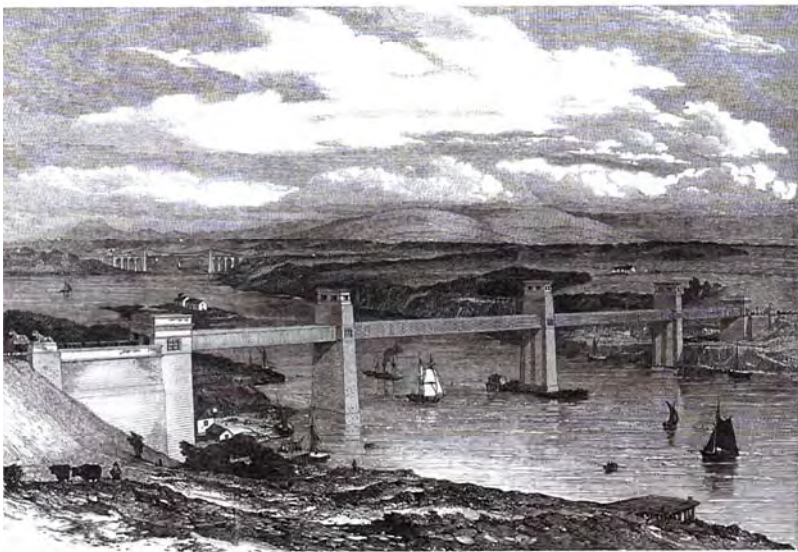
El hierro forjado, ya desde inicios del siglo XIX, vino a dar respuesta a estas nuevas exigencias. Mediante un tratamiento —inicialmente a base de golpeo o prensas hidráulicas y, posteriormente, mediante la laminación en caliente de chapas y perfiles— se obtenía un material dúctil, igualmente resistente a compresión que a tracción y, por ende, apto para hacer frente adecuadamente a solicitaciones de flexión. Se rompía así la barrera que hasta entonces limitaba los esquemas estructurales a aquellos solicitados fundamentalmente a compresión (arcos) abriéndose al amplio espectro de tipologías resistentes que actualmente conocemos.

Puede considerarse que el primer ingeniero proyectista de puentes de ferrocarril metálicos fue Robert Stephenson, hijo de George Stephenson, inventor de la “Rocket”, la primera locomotora a vapor. Si bien el

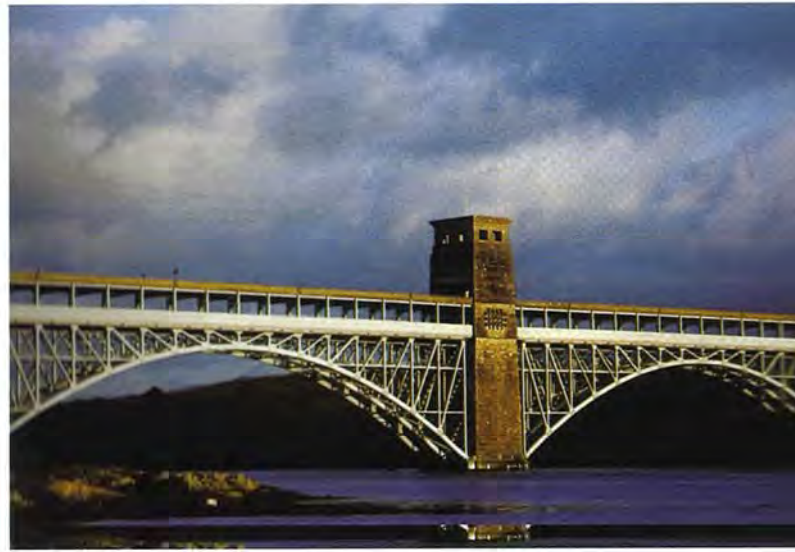


propio George había ya proyectado varios sencillos puentes viga de hierro fundido para la línea Liverpool-Manchester, hacia 1830, es a Robert al que cabe el honor de la autoría de los puentes de Conway y de Britannia, terminados respectivamente en 1848 y 1850 sobre el estrecho de Menai, en Gales, próximos al famoso puente colgante carretero de Telford. Ambas, sin duda, pueden incluirse entre las obras más innovadoras, espectaculares y fundamentales de la historia de los puentes. Se trata de dos grandes puentes de ferrocarril en viga cajón de enormes dimensiones, con una viga única simplemente apoyada de 125 metros de luz en el caso del puente de Conway y con cuatro vanos en viga continua de 70+2 x 140+70 metros de luz en el puente Britannia, cuya sección estaba constituida por tubos de chapas de hierro forjado, rigidizadas, de 9

1. Puente de Coalbrookdale
(Fotografía: Alsa)



4. El puente Britannia, en el siglo XIX y en la actualidad, reconstruido y reforzado con arcos de acero. En el grabado se ve también, al fondo, el puente de Telford



de presolicitud propias de la época del pretensado. Un desgraciado incendio del tejado de madera del tablero, acaecido en 1970, si bien no derrumbó el puente, obligó a demolerlo ya que los tubos quedaron con flechas remanentes superiores a los 50 centímetros. Todavía puede considerarse más lamentable, si cabe, la actuación de reconstrucción realizada, mediante unos desafortunados arcos de acero (imagen 4).

Cualquier texto dedicado a los ingenieros precursores en el ámbito de los puentes metálicos no puede obviar una obligada referencia a Thomas Telford y su obra culminante: el puente colgante sobre el estrecho de Menai, en Gales (figura 5). Telford construye entre 1818 y 1826 el primer puente colgante de Europa, con una luz libre de 176 metros y un tablero suspendido por cadenas de hierro forjado de unas bellísimas pilas de piedra. Casi simultáneamente, algunos kilómetros más lejos, construye el puente colgante de Conway, de 100 metros de luz. La técnica de montaje de las cadenas mediante plataformas de trabajo de madera siguiendo el propio perfil del funicular de los cables definitivos, conocida con el nombre de *catwalk*, sería años más tarde utilizada en puentes colgantes tan representativos como el de Brooklyn o el Golden Gate.

Esta primera generación de obras, precursora de los puentes colgantes modernos, se inspiró sin duda en los numerosos puentes colgados contruidos en Estados Unidos con tableros de celosía de madera, según la patente Finley, a finales del siglo XVIII. Junto a los puentes de Telford no deberíamos olvidar el puente colgante de Union Bridge, sobre el río Tweed, con 152 metros de luz —terminado en 1820 por Samuel Brown— uno de los más antiguos de Europa, o el puente de Clifton sobre el río Avon, de 190 metros de luz, cuya construcción se prolongó entre 1830 y 1865, terminándose después de la muerte de su autor, el ingeniero I. K. Brunel.

El rápido desarrollo de esta tipología de puentes colgantes experimentó una sensible aceleración en la segunda mitad del siglo XIX, lo que supuso la entrada en el ámbito de las grandes luces, entre los 300 y los 500 metros, al mismo tiempo que la desaparición progresiva de su competitividad en el rango de las luces cortas y medias. Estas primeras obras precursoras sufrieron numerosos accidentes, generalmente por rotura de los sistemas de suspensión pero, principalmente, por su mala respuesta frente a fenómenos vibratorios como consecuencia de la ausencia de rigidez con la que se proyectaban los tableros, al confiarse exclusivamente la capacidad resistente del sistema al esquema de funicularidad de los cables. La flexibilidad extrema de los tableros de esta primera generación de puentes colgantes, al mismo tiempo que impedía su utiliza-

ción en el ámbito ferroviario, generaba problemas de inestabilidad al paso de sobrecargas móviles o, principalmente, bajo efectos aerodinámicos, anticipando ya los síntomas de las catástrofe del puente de Tacoma, en 1940.

Desde los primeros puentes de hierro en arco, con dovelas de fundición en vez de sillares de piedra, de finales del siglo XVIII, a las vigas tubulares de hierro forjado de los puentes de ferrocarril de Stephenson, o a los puentes colgantes suspendidos de cadenas de hierro forjado de Telford, se había dado un gran paso. En la segunda mitad del siglo XIX, el definitivo impulso de la Revolución Industrial, tras la guerra civil ameri-

5. El puente de Telford (Fotografía: Adam Woolfitt / Corbis)



cana, fomentó los avances en las tecnologías industriales, con los convertidores Bessemer, Siemens-Martin y Thomas, que permitieron reducir el contenido en carbono de las aleaciones metálicas por debajo del 2 por ciento y desarrollar la fabricación comercial del acero, producto ya con unas prestaciones mecánicas (resistencia, tenacidad y ductilidad) y aptitud para el soldeo no muy alejadas de las que hoy conocemos.

Se habían establecido ya, por tanto, las bases para el vertiginoso desarrollo de la tecnología de los puentes en la segunda mitad del siglo XIX, quizás la época más brillante en la historia de los mismos, en la que se proyectaron y construyeron obras con prácticamente todas las tipologías estructurales básicas vigentes hoy en día.

INGENIEROS CONSTRUCTORES DE PUENTES PIONEROS DE ACERO

La producción industrial de acero experimentó una expansión vertiginosa a partir de los años 1870; esto, unido a la mejora de sus propiedades mecánicas y a la brusca reducción de sus costes de producción, puso en el mercado de la construcción un producto muy competitivo, justo en un momento de creciente demanda de obra pública, tanto de carreteras como de ferrocarriles. La eclosión de nuevas obras de las más variadas tipologías (arcos, puentes colgantes, celosías, etc.) fue espectacular, tanto como la rapidez con la que se batían sucesivos récords de luz, proyectándose vanos que en la actualidad se clasificarían, sin duda, en el ámbito de las luces medias-altas y altas. Baste con señalar que entre la construcción del puente arco de Coalbrookdale, en 1779, de 30 metros de luz, y la del puente celosía para ferrocarril del Firth of Forth, con sus dos vanos de 521 metros, solo habían transcurrido 111 años, y ya 7 años antes el puente colgante de Brooklyn en Nueva York había llegado a los 486 metros de luz en su vano central.

La descripción pormenorizada de esta evolución, sin duda espectacular, queda fuera del alcance de un trabajo como el que nos ocupa. Nos limitaremos, por tanto, a trazar una pincelada concentrándonos en cuatro obras paradigmáticas sobre las que existe un consenso casi generalizado entre la mayor parte de los autores para considerarlas como símbolos de una época de la ingeniería, de finales del siglo XIX, casi épica, muy alejada de los derroteros por los que, quizás inevitablemente, discurre hoy en día nuestra profesión. Estas cuatro obras no pueden en modo alguno considerarse ajenas a la fuerte personalidad de los ilustres ingenieros que las concibieron, que, como era frecuente en aquellos tiempos, fueron los responsables directos de su ejecución; ingenieros pioneros en los que se confundía su perfil proyectista y constructor como el capitán James B. Eads; los Roebling, John A., padre, y Washington A., hijo; Sir Benjamin Baker y Sir John Fowler o, finalmente, Gustavo Eiffel.

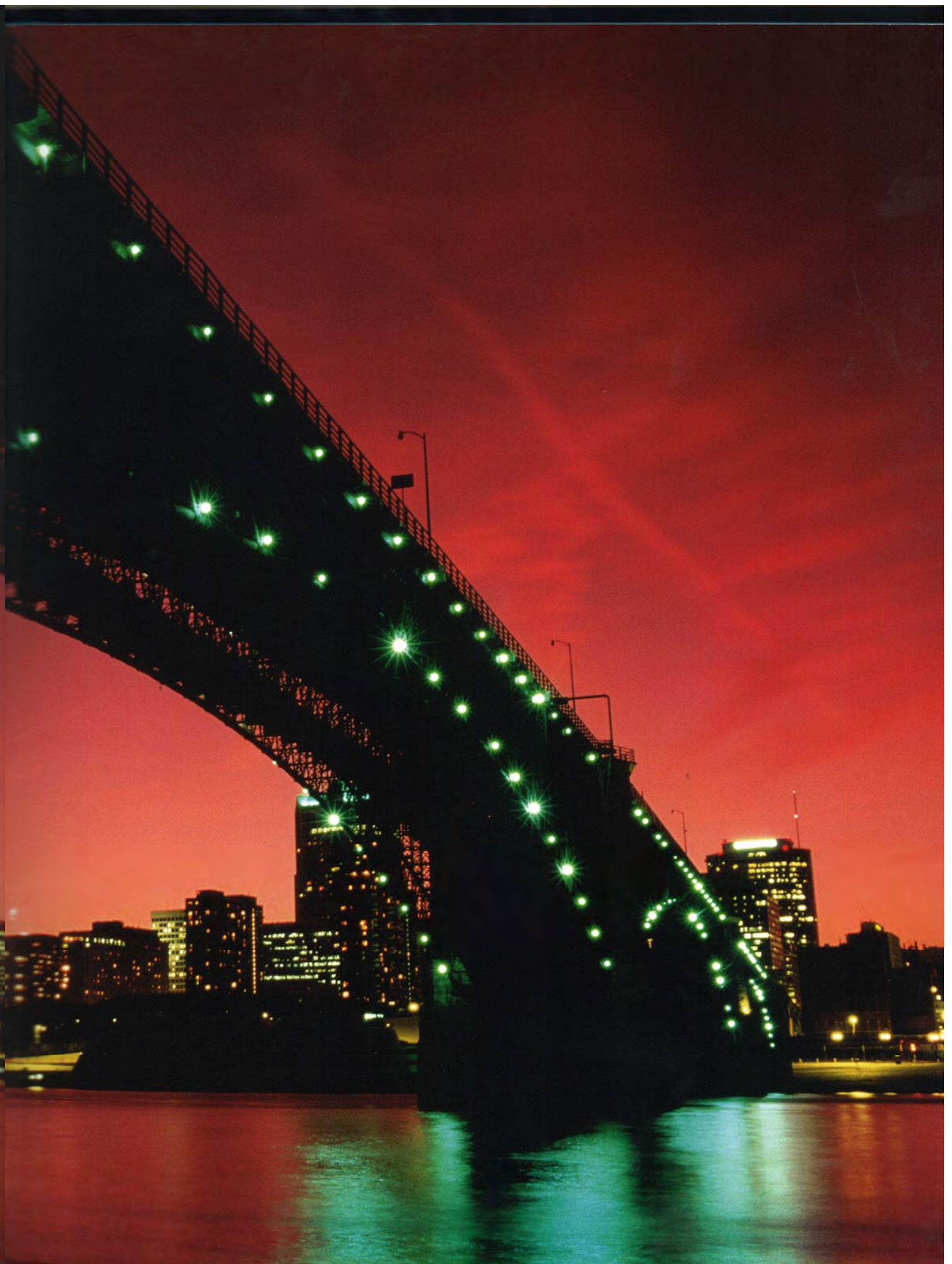
Para todos aquellos interesados en la historia de la Ingeniería aconsejamos encarecidamente la lectura, casi novelesca, de la concepción y construcción de estas grandes obras en el clásico de David J. Steinman y Sara R. Watson *Puentes y sus constructores*, cuya traducción ha sido incluida, con gran acierto, en la colección Ciencias, Humanidades e Ingeniería de nuestro Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.



El primer gran puente arco en acero es el puente de Saint Louis (imagen 6) sobre el río Mississippi, inaugurado en 1874, con 3 arcos en celosía tubular de luces 153 + 159 + 153 metros, obra histórica no solo por ser el más grande y atrevido arco de su tiempo, o por ser el primero construido íntegramente en acero, sino por el gran número de novedades técnicas que se aplicaron en su construcción. Las cimentaciones profundas, aproximadamente 30 metros bajo el nivel de las aguas del caudaloso Mississippi, exigieron la puesta a punto de sistema de cajones de aire comprimido para poder trabajar en seco, sistema que años más tarde se utilizaría también en el puente de Brooklyn en Nueva York. Este sistema se convirtió en una técnica habitual de ejecución de cimentaciones profundas hasta bien avanzado el siglo XX, cuando el desarrollo de las técnicas de pilotaje permitió desechar este procedimiento constructivo de alto riesgo debido a los peligros de inundación, suministro de aire y patologías derivadas por el trabajo bajo presiones superiores a la atmosférica, lo que conducía inevitablemente a asumir frecuentes accidentes y muertes, principalmente en las primeras épocas, como en el caso del puente de Saint Louis. Los arcos eran empotrados en sus arranques, con los consiguientes problemas, para los medios disponibles en la época, de cálculo de esfuerzos hiperestáticos y de ajustes de montaje. El montaje de los arcos se realizó, por primera vez, en ausencia de cimbra, dada la imposibilidad de su implantación en medio del río Mississippi, para lo que Eads concibió un sistema de avance de los arcos por voladizos sucesivos compensados a ambos lados de cada pila (imagen 7); esta técnica fue posteriormente utilizada por Eiffel en los arcos de Gabarit y Maria Pía y, como bien sabemos, sigue siendo universalmente aplicada hoy día para el montaje de estructuras de puentes de muy diversas tipologías. De la calidad del proyecto y construcción del puente de Eads da testimonio el hecho de que sigue todavía hoy día en servicio, soportando adecuadamente un intenso tráfico tanto rodado como de ferrocarril. El puente de San Louis ha sido, sin duda, pionero del impresionante desarrollo de los grandes arcos metálicos, hasta alcanzar los 518 m del New River Gorge (1976), en un camino jalonado por los no menos simbólicos Hell

6-7, El puente de Saint Louis en dos grabados de época

Página siguiente:
El puente de Saint Louis en la actualidad
(Fotografía: Kelly-Mooney / Corbis)





Gate en Nueva York (1917), con 298 metros de luz, y los casi análogos puentes de Bayona sobre el Kill Van Kull de Nueva York (1931) y de Sydney (1932), con 503 y 504 metros de luz respectivamente.

El puente de Brooklyn (imagen 8), como el de Saint Louis, es algo más que una estructura singular para salvar un río; ambos constituyen auténticos hitos en la evolución de la ingeniería, gracias al talento, esfuerzo y singular personalidad de sus autores, ingenieros que se adelantaron varias décadas a su época. Fue el último de los grandes puentes del siglo XIX y puede considerarse el primero de los puentes colgantes modernos.

Ya en 1849 Charles Ellet había terminado la construcción de su puente colgante Wheeling, sobre el río Ohio, cuyo vano central de 308 metros de luz era el mayor construido hasta entonces y en el que las cadenas de hierro forjado de los puentes colgantes de la generación anterior se sustituyeron por cables con alambres paralelos. El puente de Ohio fue destruido por una tormenta apenas cinco años después de su inauguración.

El puente de Brooklyn, comenzado en 1869 y concluido en 1883 fue el tercer gran puente colgante de John A. Roebling, que anteriormente había proyectado y construido los puentes de Niágara en 1855, para ferrocarril, con 250 metros de luz, y el de Cincinnati sobre el río Ohio, en 1867, con 322 metros de luz, que ya había sido récord del mundo. En Brooklyn, además del gran salto de luz que supuso alcanzar los 487 metros, se consolidaron y perfeccionaron algunas de las innovaciones que Roebling había ido ya incorporando en sus obras anteriores: el incremento drástico de la rigidez del puente, que ya no quedaba confiada exclusivamente a la insuficiente rigidez del esquema funicular de los cables principales. Los tableros, desde el Niágara, se proyectaron ya con vigas en celosía de acero de canto no despreciable, a lo que Roebling añadía un sistema de tirantes inclinados en la zona próxima a las torres, configurando con el conjunto de los cables principales y péndolas un doble sistema que aumentaba considerablemente la rigidez del conjunto. Los alambres de hilos paralelos se sustituyeron por torones de alambres de acero trenzados helicoidalmente, que tendían a cerrarse bajo tensión, aumentando su durabilidad y facilitando la puesta en carga más uniforme de los distintos alambres, problema al que en aquella época no lograba darse una solución satisfactoria en los sistemas de alambres paralelos. Posteriormente, el francés Arnodin (constructor del puente colgante de Portugalte) mejoró el sistema mediante la técnica del trenzado a torsión de los alambres de signo alternativo en capas concéntricas. Roebling también impulsó el desarrollo de las técnicas de devanado y tendido de los alambres en los grandes cables principales. El método que lleva su nombre fue utilizado, sólo con ligeras variantes, en puentes contemporáneos como el Golden Gate y el Humber. Las torres de los puentes colgantes de Roebling seguían siendo de piedra, con diferentes inspiraciones arquitectónicas, aunque ya desde inicios del siglo XX la mayoría de dichas torres se proyectaban metálicas.

John A. Roebling murió cuando se estaban iniciando las obras de su puente, en 1869, siendo su hijo Washington A. el que se hizo cargo de ellas hasta su inauguración 14 años más tarde. La épica del puente de Brooklyn aumentó su leyenda cuando Washington A. Roebling se vio obligado a acabar dirigiendo la mayor parte de la obra desde su casa, parálítico, a consecuencia del excesivo tiempo que, debido a un incendio, se vio obligado a permanecer en el interior de los cajones de aire comprimido, análogos a los utilizados por Eads en Saint Louis, sobre los que se estaba cimentando el puente.

El puente de Brooklyn, quizás el puente más famoso del mundo, asociado magistralmente por Woody Allen a la isla de Manhattan, inició el gran asalto de los puentes colgantes al campo de las grandes y muy grandes luces. Fue récord del mundo a su terminación, hasta que fue superado en 35 metros por el puente del Firth of Forth, en 1890, con la solución de celosías tubulares *cantilever* que arrebató temporalmente la supremacía a los puentes colgantes, y la mantuvo acrecentada con los 549 metros del puente *cantilever* de Québec hasta que, en 1929, la recuperó para los puentes colgantes el puente Ambassador, sobre el río Detroit, de 564 metros de luz. Desde entonces hasta hoy día, la distancia ha ido aumentando rápida y progresivamente respecto a todas las demás tipologías, incluyendo las soluciones atirantadas, de más reciente aparición. La cifra mágica de los 1.000 metros fue sobrepasada en 68 más, en 1938, por el George Washington, sobre el Hudson en Nueva York. Los distintos jalones que nos conducen hasta hoy día son sobradamente conocidos por todos: Golden Gate en San Francisco (1937) con 1.281 metros; Verrazzano en Nueva York (1969) con 1.298 metros; Humber en Inglaterra (1981) con 1.410; Akashi-Kaikyo (1998) con unos impresionantes, a la vez que chocantes, 1.990 metros, uniendo las islas Onshur y Shikoku en Japón, precursor de una serie esperable e ininterrumpida de obras gigantescas que se están ya proyectando y construyendo en Extremo Oriente.

El puente de ferrocarril del Firth of Forth (imagen 9), proyecto de los ingenieros John Fowler y Benjamín Baker, terminado en 1890, cerró el siglo XIX como récord del mundo con sus 521 metros de luz. A pesar de su extraña forma, corresponde a una tipología tipo viga, con un esquema estático en *cantilever* convencional. El proyecto fue, como los anteriormente tratados, revolucionario e innovador, dando un salto gigantesco en las dimensiones de los puentes viga, doblando prácticamente la luz del puente de Sukkur, en la India, que se había terminado el año anterior, y en cerca de 3 veces los 157 metros del puente de Cincinnati construido sólo 13 años antes. Se trata de una estructura que no dudamos en calificar de colosal, imponente en su inserción en las aguas y el paisaje del estrecho de Forth en Escocia. Es una estructura en celosía tubular de acero, con uniones roblonadas en nudos rígidos y tubos de gran diámetro rigidizados interiormente con rigidizadores longitudinales y transversales según esquemas análogos a los utilizados actualmente para rigidizar las chapas de fondos comprimidos de cajones metálicos.

Su irrupción en la historia de los puentes podría considerarse en cierto modo casual, permitiendo abrir, como ya hemos visto, un paréntesis anómalo de cerca de 30 años en la supremacía que los puentes colgantes han mantenido ininterrumpidamente desde su aparición hasta hoy día, hasta que el puente colgante Ambassador superó con sus 564 metros los 548 del puente celosía *cantilever* de Québec, con un vano más largo que el del Firth of Forth, pero de mucho menor interés.

Estaba reciente el desastre del puente en celosía para ferrocarril del Firth of Tay, cerca de Dundee en Escocia, una de las catástrofes con más víctimas de la historia al producirse el hundimiento bajo el paso de un tren repleto de pasajeros durante una tormenta con fuertes vientos. T. Bouch, autor del proyecto del Tay, que había presentado una solución de puente colgante para el Firth of Forth, quedó lógicamente desacreditado. Los puentes colgantes, por otra parte, no habían solucionado todavía los problemas de rigidez que los



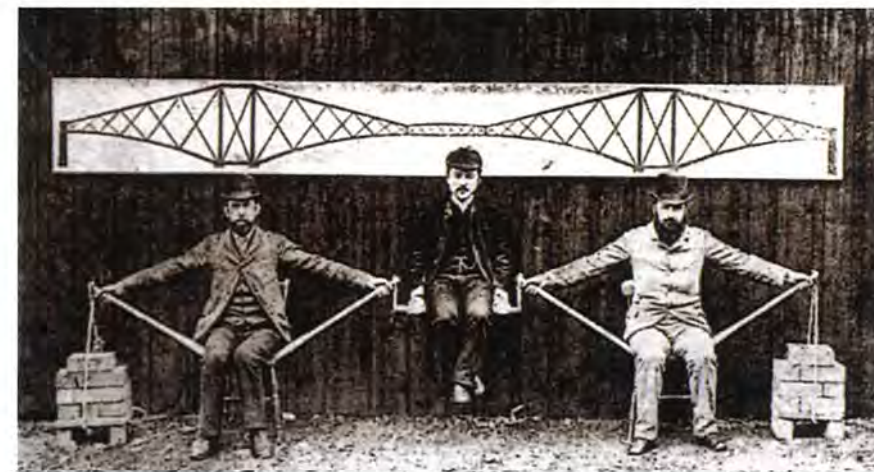
9. Puente de Firth of Forth
(Fotografía: Charles E. Rotkin / Corbis)

hacían poco aptos para soportar el tráfico ferroviario hasta que Roebling, como hemos visto, incorporó las mejoras de rigidez ya descritas en el puente colgante de ferrocarril del Niágara. En dicho contexto, el proyecto de Fowler y Baker ofrecía una imagen y sensación de robustez difícilmente superables y logró ganarse la confianza de la compañía propietaria del nuevo puente y de los múltiples intereses puestos en juego, tal y como describe Steinman en su libro. Muy conocida resulta la fotografía de los propios proyectistas explicando, de forma muy gráfica y convincente, la sencillez y seguridad del innovador esquema estructural concebido para su proyecto (imagen 10). Hoy en día, tras superar un intenso bombardeo alemán durante la segunda guerra mundial, el puente del Forth es todo un símbolo para los escoceses, habiendo silenciado, con su impresionante presencia en el paraje escocés, las dudas que inicialmente pudo haber suscitado la estética de un diseño tan poco convencional.

Hemos incluido en este capítulo dedicado a ingenieros constructores de obras pioneras de finales del siglo XIX a Gustavo Eiffel, pues la importancia de su personalidad y sus obras así lo reclama, aunque, curiosamente y a diferencia de los casos antes tratados, sus obras más notables se construyeron en hierro forjado y no en acero como en los casos precedentes. La torre Eiffel, terminada en 1889, casi al mismo tiempo que el Firth of Forth, puede bien considerarse la última obra importante de ingeniería en hierro forjado. Francia, un país cartesiano y por tanto de respuesta más lenta que los americanos para lanzarse a profundas innovaciones, mantuvo hasta finales del siglo XIX ciertas reticencias sobre las mejoras de las prestaciones mecánicas del nuevo material, al que algunos consideraron durante cierto tiempo como más frágil que el hierro forjado, debido principalmente a las irregularidades y falta de garantías de fabricación en los primeros años de puesta a punto del nuevo sistema de convertidores.

Eiffel adquirió notoriedad mundial por la maestría y los avances que impulsó en la técnica de las celosías metálicas, no solo aplicada a tableros de puente tipo viga, sino también a los arcos y a las torres, mástiles e incluso pilonos, de puentes de carretera o ferrocarril. Los proyectos de Eiffel, y de los múltiples discípulos que inspiró su obra, inundaron toda Europa. Podríamos hablar de una verdadera escuela del proyecto de estructuras en celosía, que se prolongó durante toda la primera mitad del siglo XX; algunos de sus ejemplares, ciertamente relevantes, pueden encontrarse en nuestro país.

Quizás los puentes más notables de Eiffel son los arcos biarticulados de María Pía (imagen 11), sobre el río Douro en Oporto –terminado en 1877, y con 160 metros de luz– y el muy parecido viaducto de Gabarit –cinco metros más largo y terminado cinco años más tarde– quizás algo más célebre y conocido por estar ubicado en el propio país de Eiffel.



10. Los proyectistas del puente de Firth of Forth explicando su funcionamiento

11. Puente de María Pía, en la actualidad
(Fotografía: Millanes)



12. Puente de María Pía, en construcción
(Fotografía: Millanes)



La maestría en el diseño de detalles y formas geométricas, de gran ligereza y calidad arquitectónicas, son quizás las virtudes más reconocidas en Eiffel, lo que muchas veces relega a segundo plano sus cualidades como industrial —creador de una empresa que construyó múltiples obras en toda Europa— y constructor, impulsando y perfeccionando las técnicas de avance por voladizos atirantados en los viaductos de Gabarit y María Pía, por ejemplo (imagen 12).

ALGO MÁS DE UN SIGLO MÁS TARDE

A lo largo del siglo XX la ingeniería ha experimentado y alcanzado un dominio casi completo de las diferentes técnicas, de métodos de cálculo, procesos constructivos, tipologías estructurales, propiedades, fabricación y puesta en obra de materiales, etc. Pero, si bien el desarrollo ha sido espectacular, las bases del mismo ya estaban asentadas a finales del siglo XIX, donde se produjeron realmente los saltos y avances cualitativamente más innovadores, germen de la ingeniería contemporánea, como dan testimonio las obras y los ingenieros a los que hemos dedicado este trabajo.

A inicios del siglo XXI el acero sigue siendo el material referente de construcción, junto con el hormigón, cuyo nacimiento también puede situarse a finales del XIX.

La evolución de tipologías y competencia entre ambos materiales a lo largo del pasado siglo XX, donde discurrían en paralelo, en continua concurrencia entre escuelas —tanto a nivel académico como en el ámbito del proyecto y de las propias empresas constructoras—, con el sector dividido entre especialistas de uno u otro material, ha confluído en el último tercio del siglo pasado en la aparición y desarrollo espectacular de los sistemas mixtos. Estos se utilizan tanto para edificación como para puentes, y se han afirmado como el punto de encuentro entre ambas tecnologías, lo que nos hace esperar un futuro de síntesis y mestizaje —quizás signo de los tiempos—, en el que las tipologías estructurales y esquemas resistentes resulten cada vez más independientes, como realmente lo son, del material: hormigón in situ, prefabricado, armado y pretensado, acero o sistemas mixtos, y pueda hablarse solamente del “hormigón y acero estructurales”. Así el perfil final en cada obra dependería de la mayor o menor adaptación a cada una de las circunstancias concretas de cada proyecto —influidas cada vez más, entendemos, por los condicionantes de ejecución y medios auxiliares de montaje que por las diferentes resistencias de cada material— o de la simbiosis de ambos en los sistemas mixtos.

El magnífico e impresionante viaducto de Millau (imagen 13), quizás la obra más simbólica y paradigmática de la ingeniería en los albores del siglo XXI, parece mostrarnos el camino: concebido inicialmente en hormigón por el arquitecto Norman Foster, muchas de las mejores ingenierías y constructoras del mundo estuvieron durante años estudiando diferentes alternativas. La solución finalmente retenida ha proyectado las pilas en hormigón de alta resistencia, el tablero y los pilonos metálicos, los cables de tirantes con torones de acero de pretensar. Pequeñas variaciones en las condiciones concretas del entorno hubieran podi-

13. Página siguiente:
viaducto de Millau
(Fotografía: Jean-Pierre
Lescourret / Corbis)



do, análogamente, aconsejar tableros de hormigón o mixtos; metálicos con losa ortótropa en centro de vano y con doble acción mixta en apoyos; pilonos de hormigón o mixtos, etc. El acero y el hormigón, lejos de continuar la carrera de concurrencia excluyente del pasado siglo, están inexorablemente llamados a entenderse y combinarse, en soluciones cada vez más híbridas, o mejor mestizas, que aprovechen en cada momento las mejores cualidades inherentes a cada material dentro de una concepción global de la obra, su diseño y ejecución.

Esperamos que los inicios del siglo XXI nos permitan contemplar –al igual que pasó con los sistemas mixtos a finales del siglo XX– cómo la poco enriquecedora concurrencia y controversia surgida con la irrupción de los arquitectos en el ámbito del diseño y proyecto de puentes –quizás respondiendo a una demanda cada vez más exigente de la sociedad, o de los intereses políticos o los medios de comunicación, sobre las cualidades estéticas de las obras públicas– confluya en la integración de ambas profesiones en equipos mixtos, que se enriquezcan con el mestizaje de las sensibilidades y formación de ambas profesiones, ‘tendiendo puentes’ –al igual que se ha producido en el caso del hormigón y del acero– en la brecha surgida por la separación entre arquitectos e ingenieros a finales del siglo XVIII, justo coincidiendo con el primer puente de fundición, el arco Coalbrookdale...