

El puente de Triana en Sevilla y su tiempo

José Miguel Ávila Jalvo

La labor de construir un puente sobre el Guadalquivir no debía de ser empresa fácil si consideramos que desde Córdoba hasta Sanlúcar de Barrameda nadie se atreviera a emprenderla hasta mediado el siglo XIX. Que en la Sevilla de la Casa de Contratación, una de las ciudades más prósperas de la época moderna, este salto estuviera resuelto mediante un puente de barcas, explica, sin necesidad de otra justificación, lo insensato que debía parecerle a cualquier persona experta de la zona, el apoyar la obra en el lecho del río. Esa misma prosperidad hizo que, en cuanto hubo medio de hacerlo sin apoyar en el cauce, gracias a nuevas técnicas y nuevos materiales, la Ciudad mostrara la intención de emprender la obra.

El uso industrial del hierro, y su aplicación a las comunicaciones, y el éxito de los primeros puentes suspendidos, con luces iguales y superiores a la que aquí se plantean, anima a resolver el salto de ciento cincuenta metros que, hablando en términos de distancia, separan a Sevilla de Triana. La opción de un puente colgante prospera porque salva limpiamente los problemas conocidos aunque también sirve, como es frecuente, para que entren en juego, a su rebufo, las otras alternativas disponibles. Unas, las de fábrica, que no habían cuajado desde el XV, pero que de la mano, como no, de Silvestre Pérez, resurgen con suficiente interés para intentarlo; otras, las de hierro, arcos o vigas, empezaban a tener competencia, aunque tampoco resolvían, ni los problemas de cimentación en el lecho, ni los suyos propios derivados del desconocimiento del propio material y su arte reciente.

El trabajo que presento estudia el puente metálico original empleándolo como excusa para situarlo en su tiempo. Tiempo que ocupa desde 1789¹ hasta 1874,² y en el que, ni el material, ni los métodos de cálculo, ni los perfiles que conforman las piezas, ni los sistemas de unión, ni los tipos estructurales propios, han madurado pero, durante el cual, los cuidados constructivos que se emplearon fueron suficientes para lograr, en un buen número de casos, el éxito. En ese plazo, la Historia de la Construcción volvió a recorrer a una inmensa velocidad; ahora con el hierro, un camino similar al seguido anteriormente en las obras de fábrica o de madera, camino necesario hasta alcanzar un razonable dominio de la técnica como fase previa a la validación científica de diseños y dimensionados.

Se realiza en este trabajo una visión parcial, limitada a la parte metálica del puente (cuya obra de fábrica y cimientos ha quedado ya adecuadamente estudiada en comunicación previa)³ y como respetuoso homenaje a A. R. Polonceau, una de las personas que mejor supo entender los problemas constructivos que planteaba el uso de este nuevo material.

MATERIALES FÉRRICOS

La posibilidad de emplear masivamente un material férreo gracias a una producción de calor suficiente como para obtener un metal razonablemente refinado, va a dar lugar, desde el último tercio del XVIII, a

intentos de aplicación en muchas actividades, entre ellas, las obras públicas. Para conseguirlo tiene que abrirse camino en un mundo cuyas necesidades estaban resueltas con otros materiales y desarrollar su propio arte. Habrá que inventar piezas, uniones, métodos de dimensionado, etc. Las uniones deben resolverse en frío ya que fuera de las herrerías no hay aporte de calor. Las piezas, fundidas o forjadas, hechas con un material cuya densidad cuadruplica a la piedra, deben desarrollar formas adecuadas para resistir con el menor peso: la fundición lo resuelve haciendo elementos huecos, pero es frágil, resiste mal la tracción y tiene serias dificultades de enlace con otras piezas; el hierro forjado carece en parte de esos problemas pero no cabe fundir piezas sino que es necesario inventar la laminación y la forma de las secciones para que resulten ligeras y mecánicamente adecuadas (aunque no se disponga aún de las bases teóricas para ello). Unir palastros en ángulo recto, necesarios para cualquier labor, lleva a inventar el angular en 1817 y, como es bueno disponer de una superficie plana para resolver el apoyo de las piezas y para recibir a las cargas, se va dando a las secciones de la piezas de palastros la forma de cajón o de doble T, cuyo perfil nace en 1837 sin necesidad de esperar a saber, mediante el cálculo, que resulta mecánicamente eficaz.

La forma de las piezas de fundición⁴ sometidas a fuertes esfuerzos, tenía que ser muy cuidada: lisa y sin agujeros ni nervios; ya que la velocidad de enfriamiento de este material dentro del molde se ve muy afectada por variaciones de espesor o por nervaduras y adornos, lo que provoca fuertes tensiones residuales que, dada la acritud del material, le facilitarían la rotura. La importancia de las tensiones residuales del proceso de moldeo las detectaron fácilmente al comprobar que al enfriarse una pieza de fundición de 2 a 3 m de longitud acortaba del orden del centímetro y sólo unos milímetros más cuando la pieza tenía una longitud superior a 7 m, lo que les aconsejó, dado el aumento de las tensiones residuales que debían producirse para tamaños grandes (a partir del dato anterior), limitar éste para alejarse de la rotura frágil. El hierro forjado⁵ era un material más homogéneo, lo que le daba algo más de fiabilidad para resistir tracciones y además permitió trabajar sin limitación de tamaño.⁶ Por otro lado, la fundición tenía mejor aplicación que el hierro forjado cuando había problemas de oxidación⁷ o por sus posibilidades decorativas.⁸

Ambos materiales formaban parte conjuntamente en muchas obras, colocando a cada uno en donde mejor servicio prestaba. Se elegía la fundición para elementos comprimidos (ya que al ser huecos tienen una sección aparente mayor y no suele aparecer en ellos problemas de inestabilidad y, la forja, para los traccionados (que al ser más resistente resultaba más ligera). Por último, la mayor fiabilidad del cable,⁹ gracias a que el manajo de alambres permite fallos locales de poca trascendencia, permite desarrollar tipos ya conocidos antes de la era del hierro, como los puentes colgantes, pero dotados ahora de mayor rigidez para los usos del momento.¹⁰

Cuando quienes iban a desarrollar buena parte de los conocimientos necesarios para justificar todo lo anterior estaban aún por nacer, todo lo anterior estaba ya establecido; se había resuelto el *cómo* a la espera de que llegara el *cuánto* y, para evitar el tedio, Chaley se entretuvo en ir haciendo el puente más largo, en Friburgo, acabado en 1834 y de 273 m de luz; Brunel, en 1836, termina el reconocido como de los más bellos, en Bristol, de sólo 214 m y Telford completó 1117 a lo largo de toda su vida.

FORMAS HISTÓRICAS

El arco de fábrica fue, a lo largo de la historia, el tipo constructivo que veníamos empleando a la hora de construir puentes. Esta forma, que se había ido decantando durante milenios, resultaba técnica y económicamente razonable y aseguraba el éxito en la empresa de cruzar vados con una frecuencia adecuada. La bóveda inferior y unos rellenos más o menos compactos era todo lo que necesitábamos para alcanzar la cota de calzada.

Cuando el material empleado fue la madera, a veces imitábamos los arcos que tan apropiados resultaban en fábrica, pero las peculiaridades de este material decantaron, como siempre ocurre, hacia tipos específicos: la viga, nacida de dejar caer piezas enterizas entre los apoyos empleando para ello poco más que troncos de árbol; el puente de jabalcones, obra de carpintería que reduce la luz entre apoyos usando piezas inclinadas (o sus variantes, como las realizadas con ménsulas que van volando desde los extremos hasta alcanzar una distancia similar al tamaño de las piezas disponibles) y, finalmente, los puentes colgantes, que combinan madera y cuerdas para per-

mitir el paso de cargas de poca intensidad. Salvo en zonas con abundancia de madera y carpinteros, como Suiza, el puente de madera sirvió, con mayor frecuencia, para resolver problemas de corta duración: pontones con los que cruzar ríos que se interponían en el camino de las tierras de conquista o sustituciones provisionales de tramos de puentes de fábrica destruidos por riadas en tanto se conseguía recaudar fondos para la reconstrucción del originario.

FORMAS METÁLICAS

Arcos

Los primeros puentes metálicos copiaban al arco de fábrica: hicimos dovelas de fundición huecas, que construíamos, casi como si de sillares de piedra se tratara, salvo que, la dificultad de fundir formas prismáticas de aristas vivas y de conectarlas junta contra junta, nos llevó, en seguida, a fabricar dovelas cilíndricas que daban lugar a arcos independientes en lugar de a la bóveda tradicional que ocupaba toda la anchura del puente. La importante resistencia del nuevo material evitó llenar de arcos toda esa anchura y pusimos sólo unos cuantos por puente.¹¹ Con el tiempo, parece ser que debido a que el elevado número de juntas y el aumento de las luces daba problemas, abandonamos el sistema de dovelas para pasar a fabricar piezas (siempre de fundición) que formaban, con pocas de ellas, toda la longitud del arco.¹² Más adelante, Polonceau dio un paso más al introducir madera en el interior del arco, con las ventajas que luego veremos.

Inicialmente, los puentes se construían con arcos múltiples y posteriormente se redujo el número llegando hasta tener sólo dos.¹³ Esta reducción era razonable ya que al reducir el número, aumenta la carga por arco y, en consecuencia, su sección, lo que reduce el material dedicado a evitar la inestabilidad. Con ello también disminuye el número de barras (al haber menos tímpanos) y en los arriostramientos (al haber menos entre-arcos) y, aunque el material colocado fuera el mismo, el número de uniones y la mano de obra se reducen brutalmente. Menos arcos supone más distancia entre ellos lo que lleva a un aumento de la sección de las vigas principales del tablero pero tampoco es un aumento tan claro si se considera que los tableros requerían cada vez más rigidez al ir au-

mentando la luz de los puentes con el tiempo, al conocer mejor la exposición a vientos laterales y al crecer la magnitud de las sobrecargas.

Construido el conjunto de arcos que sirven de base al puente, el tablero no introduce novedades en nuestros conocimientos previos,¹⁴ pero lo que sí va a ser una novedad técnica es el cómo resolver el relleno que una el tablero con los arcos. Hay que inventar algo que pierda su cualidad de masivo (con la de ventajas que eso tenía) para pasar a estar formado por piezas cuya forma y cuya conexión a los restantes elementos habrá que diseñar y de las que ni siquiera sabremos, hasta bastante tiempo después, cuáles es su dirección correcta, si colocarlas en vertical, en horizontal o inclinadas. En general, desde luego con arcos de fundición, estos elementos del relleno compuestos con barras rectas o curvas situadas en los tímpanos, también eran fundidos y se conectaban con los arcos generalmente en la sección situada en la unión entre dovelas o en resaltos dejados al moldearlas para esa finalidad. Para ello, los extremos de las barras del tímpano se construían con formas específicas, de modo que el mismo conjunto de pasadores que cosían a dos dovelas consecutivas pinzaban a las piezas del tímpano. Respecto de la unión con el tablero, como las vigas de éste eran de hierro forjado (no conectable al hierro colado), en la cabeza de los montantes del tímpano se construían cajas en la que se introducían los perfiles superiores.

Una vez el puente construido y en uso, al paso por él de sobrecargas móviles, vibraba, lo que era una novedad que nos tenía reservada el hierro ya que el cambio más trascendente que se está produciendo en esta nueva forma de construir es la diferencia entre el descomunal peso del puente de fábrica y la liviandad del puente de hierro. Novedad cuya importancia no estuvo tanto en sí misma como en que no supimos que lo era. Esta reducción de masa y el empleo de un material más resistente van a permitir aumentar el alcance y la sobrecarga pero la rigidez que proporcionaba el peso propio la hemos perdido justo cuando además va a aparecer la nueva gran sobrecarga del XIX: el ferro-carril.¹⁵

En aquellos momentos, estas vibraciones debieron producir con cierta frecuencia roturas locales de las piezas del tímpano que tuvieron entretenidos al personal de mantenimiento y, a los técnicos, en busca de solución. Las deformaciones del arco, para ajustarse a la forma adecuada a las sobrecargas de cierta enti-

dad (sin llegar a los trenes, valen tranvías y carros) parecen suficiente causa para producir la rotura frágil de alguna de las débiles barras de fundición del tímpano o de los arriostramientos lo que, unido a razones estéticas, llevó, a veces, a colocar aros cuya flexibilidad parece que redujo el número de roturas. En dirección contraria, también se optó por un diseño rígido del tímpano, ya que solidarizaba arcos y tablero, cuya rigidez conjunta reducía las vibraciones.¹⁶ Con el tiempo, del dominio de la fundición se fue pasando al del hierro forjado, tanto en arcos como en tímpanos para aprovechar las ventajas de la ductilidad.¹⁷

Muchas ventajas de los puentes de arcos se perdían si eran de varios tramos ya que, a diferencia de las obras de fábrica, se disponía ahora de la alternativa de los puentes rectos que en general eran más económicos para luces cortas y para labores de reparación y recalce.¹⁸

Puentes rectos o vigas

La inmensa dificultad que supone realizar las uniones con las que enlazar las piezas al usar un material intratable una vez que sale de los hornos, unido a tener que construir nuevos caminos a la velocidad que demanda el ferrocarril, va a producir nuevos tipos de puentes de madera que salven luces importantes y trasladen grandes cargas. Estas formas son vigas hechas con piezas que genéricamente se llamaron tablones,¹⁹ unidas con pasadores y cuyo conjunto queda definido por un cordón superior y otro inferior,²⁰ generalmente paralelos, unidos entre sí por un enrejado o por una celosía, que le acabaría dando su nombre definitivo. Fueron inventadas por Town y consistían en dos cordones paralelos y un enrejado de diagonales en el alma. Sus posteriores variantes, desarrolladas precisamente por la distinta resolución de las uniones y los distintos materiales empleados en cada familia (aunque lo más aparente sea la diferencia en la disposición geométrica de las barras), va a producir el nacimiento en el terreno de la construcción de un mundo de patentes que dominará la contratación de las obras durante cincuenta años.²¹

Debe comprenderse que el motivo de estas patentes no es tanto registrar una forma geométrica como un modo de transmitir esfuerzos (la mitad de ellos de tracción) entre las piezas y nudos que forman la viga y cuyos materiales férricos resisten mal

las tracciones mientras que la madera, que sí la resiste, tiene serias dificultades en transmitir las a las otras piezas que confluyen en el nudo.²² Para conseguirlo combinan hierro y madera, (o madera y madera en el origen) en las dos familias que forman la celosía y así se reduce, de paso, la debilidad que produce el elevado número de agujeros de los extremos de las piezas a la hora de conformar el nudo y que son necesarios para permitir el paso de roblones y pasadores. Inicialmente, predominaron las patentes con familias múltiples de diagonales y montantes para aprovechar la longitud de la barra para distribuir más suavemente los esfuerzos al multiplicar el número de uniones. La mejora de la calidad del hierro supuso subir las tensiones de trabajo y reducir las secciones, lo que unido al aumento de la luz y, consecuentemente del canto, volvió a hacer aparecer los elementos múltiples en el alma para reducir la inestabilidad de las barras comprimidas.

Hablando de patentes, vuelve a surgir Polonceau en 1837 con la más famosa de las suyas, la armadura de cubierta, que aclara aquí bastantes de los problemas de la obra metálica y explica mejor que en los casos recién comentados, la diferencia entre el problema geométrico y el problema constructivo. Lo que Polonceau consigue con su estructura no es una forma más o menos afortunada, que lo es, sino construir una cercha con el menor número de piezas diferentes y cuyas uniones son tan elementales que sólo requieren dejar un agujero hecho en los extremos de cada barra a la hora de fabricarlas. En la versión más simple sólo se necesita la pieza que hace de par, las dos manguetas comprimidas situadas en el centro de los pares y las cinco barras que trabajan a tracción y que son, sean diagonales, tornapuntas o tirante, todas iguales. Resolvió de un plumazo todos los problemas estructurales y constructivos de las cubiertas de luces medias y grandes por lo que no es de extrañar que, hasta que De Dion inventa el pórtico triarticulado a finales de siglo, todo se resolviera con esa forma.

Volviendo a las vigas de celosía, la enorme eficacia mecánica de estos puentes, que comenzaron siendo de madera, les lleva a un profundo desarrollo según avanzan las técnicas constructivas y la fiabilidad del hierro trabajando a tracción o la entrada del acero²³ y, aunque pasaron por una racha de desastres, hay que reconocer que se les pidió mucho, para ser unos recién nacidos, cuando se les hizo enfrentarse con la terrible sobrecarga del ferrocarril.²⁴

A la vez que se desarrollan diversos tipos de celosías, nacidas como derivación de la obra de madera, se dispone, dentro de este tipo, de la viga de alma llena o de palastros, que nace directamente de la aplicación del hierro forjado y sus descendientes (pudelado y acero) y que siempre daba soluciones más rígidas que la de celosía en los ensayos de aquella época, aunque hay que considerar que eso ocurría para pequeños tamaños, una distribución no muy adecuada de los enrejados y dificultades de realización de las uniones.²⁵ En todo caso, no sólo se atendía a cuestiones mecánicas a la hora de decidirse por un tipo de puente. Las guerras afectaban la decisión en función de la facilidad de destrucción.²⁶

Entre los tipos de alma llena merece una especial mención el puente formado por vigas celulares, aunque sólo fuera para mencionar el puente Britannia construido en 1850 por Robert Stephenson, que sin embargo era hijo de George, (el inventor de la locomotora), y que se adelanta a su tiempo al introducir rigidizadores de alma, vanos continuos de hasta 142 m, ideando un modo de establecer la continuidad al construir el refuerzo negativo de los cordones superiores con el apoyo descendido que luego lo eleva para ponerlo en carga y circulación interior de los trenes por el interior del tubo.²⁷

Puentes suspendidos o colgantes

Su empleo comienza muy pronto, ya que es la forma natural de saltar vados con un material que se creía que resistía bien la tracción. Comenzaron siendo de cadenas para pasar enseguida a ser de cables o de elementos más complejos debido a la reducción de costo y de peso.²⁸

Son muy económicos, por lo que a pesar de las catástrofes, siguieron en auge ya que a veces fueron la única opción posible. La poca relevancia del peso propio y la fuerte luz hace que la catenaria cambie de forma ostensiblemente con sobrecargas locales además de con el viento, lo que sumado a las vibraciones, los convirtió en elementos muy criticados. Un resumen de una de estas críticas nos enseña cuales eran los criterios de diseño empleados en aquel momento:

Si las péndolas se colocaran inclinadas y en dos familias la sobrecarga concentrada que se encuentre en el

tablero ascendería afectando a una longitud mayor de la catenaria en lugar de hacerlo en un sólo punto y, consecuentemente, produciendo menos deformación en el cable y menos vibración. Del mismo modo, las vigas del suelo del tablero también deberían ir cruzándose como enrejado múltiple para repartir la sobrecarga en varias péndolas en lugar de a una. Si además, en lugar de una catenaria arriba hubiera también otra invertida abajo, de modo que las péndolas siguieran desde la de arriba hasta la de abajo pasando por el tablero, se acortarían las vibraciones al tener siempre barras traccionadas. Una vez que el elevado empleo del hierro laminado ha eliminado buena cantidad de las prevenciones que había contra él (ya que asegura una buena fiabilidad a tracción), podría emplearse palastros unidos con roblones en lugar de cables, que se deforman mucho. También, sería conveniente aumentar la altura de la catenaria ya que se construyen muy tendidas. Finalmente, mucha de la culpa de las caídas de estos puentes se debe a haber desestimado el gran principio que aconseja emplear al mayor número de elementos en el traslado de las cargas.²⁹

Polonceau también dedica un capítulo especial para comparar estos puentes con los de arcos inferiores al tablero:

Los de arco presentan más seguridad porque se limitan a empujar contra los estribos mientras que los suspendidos, con su continuo tirar, tienden constantemente a arrancar las amarras. Los arcos son múltiples por lo que el tablero, que a causa de la humedad y el paso del tiempo va debilitándose y deformando, sólo tiene como consecuencia el que apoyará más en unos que en otros, mientras que en los colgantes, los tableros apoyan en las péndolas sólo por sus dos extremos, por lo que la rotura de cualquier unión lleva al desastre. Al menos en Inglaterra, cuando hay doble circulación se obliga a colocar catenarias centrales, como en Menai. Es incomprensible que se deje apoyar sólo en los extremos a puentes colgados de 7 m de ancho y que cuando el puente se hace con arcos inferiores de hierro o madera se obligue a disponerlos a distancias menores de 3 m. Los puentes colgados de cable son más económicos que los de cadenas, pero menos estables y duraderos, ya que los hilos se oxidan. Los colgantes, en todo caso, cubren una banda que no resuelven los demás: terrenos escarpados o falta de gálibo inferior pero deberían tener al menos tres catenarias.

En su texto se evidencia una cierta defensa de los puentes de arco y, como persona que trabajaba de inspector de puentes y calzadas de Francia, debe en-

tenderse que esta defensa es debida más al tipo de problemas que tuvo que atender que a una defensa subjetiva de quien ha hecho un puente de arcos. Alguna de sus afirmaciones, como la de que las amarras se arrancan la he trascrito porque creo que no debe ser interpretada como algo que haya visto y que cita anecdóticamente o con cualquier intención propagandística, sino como algo que ocurre en puentes que, por su ocupación, ha comprobado de acuerdo a los conocimientos de su tiempo y se encuentra con que se ha producido un fallo a pesar de la corrección técnica según el arte de aquel momento.

EL PUENTE DEL CARROUSEL

La unión entre las piezas de fundición para formar los arcos

Los arcos hay que construirlos con muchas piezas de hierro colado que deben conectarse entre sí para trabajar solidariamente. Para asegurar que esto es así no basta con enlazarlas mediante pasadores ya que las tensiones se concentrarían en esos puntos contra un material que admite muy mal los esfuerzos concentrados. Además, los pasadores y los roblones tienen holguras a su paso por el taladro que producen una entrada en carga irregular y contra la que se luchó con primitivas mezclas.³⁰ Las imperfecciones del proceso de fundido no debían asegurar entonces una planeidad de estos bordes y es claro que aumentar al máximo la superficie de contacto es vital para reducir tensiones, evitando pues el contacto irregular que, además de producir concentraciones de tensión, desarrolla deformaciones globales en la geometría.³¹

Polonceau estaba seriamente preocupado por conseguir un adecuado ajuste entre estas piezas y, para resolverlo tenía pensado inicialmente introducir, una vez colocadas las piezas en su lugar, finas lamas de hierro en las holguras, ligeramente cuneiformes, que luego se serrarían para dejarlas ocultas. Posteriormente planteó dejar en las piezas unos entalles que permitieran la introducción de cuñas de mayor entidad en varios puntos a lo largo de la línea de contacto de las piezas consecutivas. Finalmente, este hombre, que afirma tener poca experiencia en la ejecución de obras de fundición, optó por una solución realmente excepcional: rellenar, de forma mecánicamente activa, el interior de los arcos con listones

de madera embreados. Solución con la que resolvía muchas más cosas y que él mismo va enumerando:³²

- Facilita la puesta en obra de las piezas de fundición ya que van haciendo al arco algo autoportante según se va construyendo (aunque se necesitarán algunos apeos)
- Una vez el puente en uso permite sustituir piezas de fundición dañadas ya que la madera interior sirve de obra auxiliar sin necesidad de mayores gastos en sustentación
- Aumenta la resistencia del arco respecto de la que tendría el tubo vacío
- Mejora la resistencia al choque de la fundición evitando que en muchas ocasiones se produzca la rotura por acciones accidentales de este tipo
- Mejora la resistencia a flexión del arco ya que la fundición casi no vale para ello, lo que permite que admita mejor las sobrecargas localizadas sin necesidad de aumentar el peso propio para mitigarlas
- Disminuye las vibraciones. Es bien conocido que los cilindros llenos de mortero, arena, yeso o betún vibran menos que vacíos y, puestos a rellenar con un material mecánicamente inerte, mejor resistente
- Algunas personas, aceptando las ventajas iniciales del relleno de madera, dudan de su durabilidad ya que el betún fermenta y pudre la madera. Sería una opinión fundada si la madera estuviera húmeda, con savia, o si hubiera huecos de aire entre ella y la fundición que no se rellenaran.

De este modo, su preocupación acerca de la conexión entre las piezas del arco dio lugar a esta mejora técnica y pasa a describir al proceso a seguir con la colocación de la madera:

Los arcos se rellenan con 9 grandes listones de pino del Norte de entre 10 y 20 m de longitud y de 55 mm de grueso que se embetunan por todas sus caras. Con esta longitud se tiene asegurada la conexión entre varias piezas de fundición así como el que tales listones se vayan empalmando en secciones distantes, de modo que en cada sección siempre hay al menos 8 tablones resistentes. Es como tener un arco de madera que al estar envuelto por el hierro es como si fuera de una pieza. En realidad, mejor, ya que suponiendo que se encontrara algo de ese tamaño habría que curvarlo (lo que gastaría tensiones que aquí no se gastan), no tendría la misma regularidad de las fibras y no se podrían evitar nudos y otros defectos naturales. Si los listones de madera se hubieran colocado en vertical su eficacia hubiera sido mayor, comenta, pero entonces no se les habría dado la forma del arco tan fácilmente.³³

Hace también, como era costumbre, unos ensayos previos: rompe varias piezas cilíndricas pequeñas de fundición llenas y vacías para medir la variación de resistencia que supone la introducción de la madera:

Para conocer el aumento de resistencia que se puede conseguir con cilindros de fundición, rellenando su interior con madera, he probado 4 tubos: 2 de fundición dura y 2, dulce. Cada uno de 1 m de longitud, 6 cm de diámetro exterior y 5 mm de espesor. Inserté, en dos de ellos, unos cilindros de madera previamente embetunados aunque su conexión con la fundición ha sido muy imperfecta por las irregularidades del interior. El ensayo consistió en romper estas piezas trabajándolas como viga aislada sobre dos apoyos con una carga concentrada en el centro y obtuve los siguientes resultados:

El cilindro de fundición dura rompió con	680 kg	flecha	6 mm
El mismo, con madera dentro	1.040 kg		8 mm
El cilindro de fundición dulce	1.080 kg		10 mm
y, el mismo con madera	1.450 kg		12 mm

Siendo insuficiente experiencia para conclusiones generales, el experimento muestra que la colocación de madera dentro es muy beneficiosa para la resistencia.³⁴

Los tímpanos

Aquí Polonceau vuelve a reestudiar lo construido hasta el momento. Ya se habían hecho puentes cuyos tímpanos estaban formados por arcos pero, dentro de esa fisonomía, que elige, dice, porque la forma circular es la más perfecta y resistente y, además, porque la forma de anillo es la más adecuada para la misión del tímpano, que es la de amortiguar las vibraciones del tablero producidas por las cargas móviles, la distribución de arcos y su diseño queda modificada con respecto de lo hecho hasta entonces y ampliamente mejorada por él:

Los tímpanos se rellenan con anillos similares a otros puentes, pero a diferencia de ellos, cuyos arcos necesitaban un elemento intermedio de conexión al arco también de fundición, aquí cada aro está formado por tres: dos exteriores y uno central de diámetro menor, de modo que el rehundido central hace de acanaladura en la que se introduce la protuberancia que forman las

piezas fundidas del arco. Los arcos tampoco son tan rígidos entre sí como en los otros puentes porque sólo son necesarios debajo de las vigas de apoyo del tablero, de modo que se colocan separados a esa distancia y, entre ellos, he dispuesto un codal que los une para reducir la deformación que tendría cada aro si fuera independiente. Esto ahorra material.³⁵

Puede que eso ocurriera en París, pero no en Sevilla donde esas distancias no son uniformes. Quizá fuera una buena intención que no se llevó a cabo en ninguno de los dos sitios o sólo en Sevilla, donde se había especificado que el tablero fuera distinto, para evitar el uso de la madera, manteniendo nuestro ancestral cariño hacia este material (que se sustituyó por un entrevigado de palastros que servían de fondillo a un relleno sentado con yeso y que lógicamente estaba corroído unos años después),³⁶ y que eso produjera una alteración del diseño.

EL PUENTE DE TRIANA

El interés mantenido por Sevilla en la construcción de un puente que sustituyera al de barcas cobra vigor gracias al desarrollo de las técnicas del hierro. Las miradas se fijan en los puentes colgantes que, en el caso de esta ciudad, tenía la ventaja de evitar el apoyo en el río que tanto preocupaba y el inconveniente de la cantidad de edificios que debían expropiarse y demolerse para permitir el anclaje de los cables en el terreno cuyas amarras se situarían lógicamente lejos del cauce.³⁷ Aparecen además, como quedó dicho, partidarios y proyectos de varios puentes de piedra y, finalmente, entra en juego la posibilidad de construir uno formado por arcos metálicos imitando a otro que recientemente se había inaugurado en París. Una réplica.

Las nuevas obras de hierro tienen otras peculiaridades no citadas aún en este trabajo: repetitividad, empleo de elementos seriados e, incluso se llega a la venta por catálogo.³⁸ Ya no hay que confiar en que el artífice mantenga el estilo que te hizo contratarle sino que te puedes comprar directamente lo que de él te guste, darte un capricho sin correr riesgos. Ni hay que traerlo para que haga algo distinto, como se hacía con las obras de piedra, porque el hierro había creado otros hábitos también en ésto. Además, hubiera sido difícil contar con la colaboración directa de Polonceau que tenía ya una elevada edad y que de hecho muere en

1847, cuatro años antes de concluir el puente de Isabel II. Por otro lado, para la defensa de los autores estaban las patentes, ya mencionadas, y que cobran protagonismo ante este estado de cosas.³⁹ Es de suponer que, al igual que hizo con otros trabajos, Polonceau registraría su puente en su momento y, por otro lado, los duques de Montpensier, con residencia en Sevilla, conocen el de París y se encaprichan de él, convencen al Cabildo para que lo incluya como opción y ésta resulta ganadora. No es de extrañar pues, que el puente de Triana sea tan parecido al del Carrousel, para lo que basta el abono de la licencia de la patente correspondiente, lo que es extraño es que no fuera igual, siéndolo casi la longitud a cruzar. De modo que en Sevilla se hizo una obra de hierro aplicando de él todas las posibilidades técnicas y de mercado. La ciudad no quiso correr riesgos y compró lo que le gustaba y debió gustarle mucho a juzgar por el elevado empeño de su población en mantenerlo, por lo que gracias a ella y a una muy acertada obra de conservación de los arcos y tímpanos, a cambio de sustituir el tablero para mantener el puente en uso, lo disfrutamos.

NOTAS

1. Cuando se termina de construir el puente de Coalbrookdale sobre el Severn por Pritchard, Wilkinson y Darby, considerada primera obra completa de hierro.
2. Aunque hay muchas fechas posibles, se podría indicar ésta como la del nacimiento del cálculo técnico de estructuras con la publicación de los trabajos de Mohr (Vid. Ortiz Herrera, Jesús e Hierro Sureda, Jesús: *El desarrollo histórico de la Construcción metálica. Intervención en estructuras metálicas*. Curso de análisis estructural e intervención en los edificios (dir. por J. M. Ávila Jalvo). C.O.A.M., 2000).
3. Graciani García, A.: «La construcción del puente de Isabel II de Sevilla. Los problemas de cimentación». *Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Madrid, 1996, pp. 265 y ss.
4. Sus tensiones admisibles estaban en 5 kN/cm² a compresión y 1 kN/cm² a tracción.
5. Sus tensiones admisibles estaban en 6 kN/cm² a compresión y de 2 a 6 kN/cm² a tracción.
6. Molinos, L.: «Consideraciones que pueden servir de guía en la elección de un sistema de puentes», *Revista de Obras Públicas* Tomo 1855. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1855 pp. 54 y 71.
7. Una pieza expuesta a la humedad pierde 0,87 mm. en 100 años y 5,5 mm. en ambiente marino («Los puentes de fundición comparados con los de hierro forjado», *Revista de Obras Públicas* Tomo 1859. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1880, pp. 188, 201, 223, 235).
8. La fundición se acomoda más en puentes urbanos por ser más fácil su decoración aunque los puentes de fundición son más caros, posiblemente por tener que asignarles menores tensiones que a los de hierro dulce (Ut supra).
9. Admitía 15 kN/cm² a tracción.
10. «Los puentes de fundición comparados con los de hierro forjado»... Op. cit.
11. Dos puentes de dovelas de fundición, a imitación de sillares de piedra son el puente de Sunderland sobre el Wear, fabricado y patentado por Paine y montado por Burdon, de 1796 y con 70 m. de luz, y el de Buildwas, de Telford, sobre el Severn, de 40 m. de luz (Benévolo, L.: *Historia de la Arquitectura Moderna*. Gustavo Gili. 6ª ed. ampliada. Barcelona, 1987, capítulo I).
12. Cada arco del puente de Coalbrookdale (aunque sea anterior a los citados) está hecho de sólo dos piezas unidas en la clave debido a dos circunstancias: la ferrería estaba en el mismo lugar de construcción, lo que reducía el problema del transporte, y la imaginación de Wilkinson formaba parte de la empresa. Rennie, en 1818, en Southwark, con arcos de 75 m. de luz, cambia las dovelas (que daban lugar a los puentes llamados *de bastidores*) por piezas de fundición que tenían 6 m. de longitud, 2 m. de grosor y 9 cm. de espesor («Los puentes de hierro», *Revista de Obras Públicas* Tomo 1861. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1861, p. 37).
13. El modelo de George Martín consiste en colocar dos cuchillos en lugar de cuatro o cinco, de modo que las vigas principales del tablero están formadas por un tramo, entre los dos arcos, y dos vuelos, lo que asegura que la carga permanente se reparte entre ambos, cosa que no ocurre cuando son muchos, en cuyo caso, por sus diferentes condiciones, cada uno carga una cantidad incierta («Los puentes de fundición comparados...»), op. cit.
14. Habría que decir que lo que aparece de nuevo aquí es el empleo del término *tablero*, adecuado a estos nuevos puentes y que viene a sustituir al de calzada, seguramente más adecuado para los masivos.
15. Era así como se escribía antes.
16. Las vibraciones de los arcos de fundición se reducían al unirlos al tablero mediante tímpanos hechos con piezas cruzadas o elementos macizos. A veces, se ha propuesto rellenar los tubos con hormigón o betún para reducir el problema al aumentar la masa. La forma elíptica dada por Polonceau a sus tubos mejora la rigidez respecto a la forma circular (Molinos, L.: «Consideraciones que pueden servir de guía en la elección de un sistema de puentes», op. cit.)
17. Aunque el precio unitario del hierro forjado era mayor, los puentes de arco fueron sustituyendo a los de fundi-

- ción por diversos motivos; la deformación ante sobrecargas de uso era sensiblemente menor, lo que reducía la necesidad de poner carga muerta como se venían haciendo en los de fundición para lograr el mismo objetivo, la mayor resistencia a tracción permitía un mayor trabajo a flexión del arco ante estas caras variables, con lo que los tímpanos y el propio arco pueden aligerarse. Se han estudiado arcos de 25 a 50 m., obteniéndose un costo relativo del 65-70% del hierro forjado contra el colado («Los puentes de fundición comprados...», op. cit.).
18. Los puentes de varios vanos no conviene que sean de arcos porque obligan a las pilas a resistir como estribos (por si algún tramo quebrara). Si a pesar de ésto se hace, no conviene que las pilas sean de fundición sino de fábrica, para evitar que transmitan vibraciones de unos arcos a otros, como ocurre en el de Les Arts (Molinos: op. cit.).
- Sin considerar el ahorro que supone el que las pilas no tengan empuje sino sólo el del propio puente, y fijándonos en la obra metálica, los puentes rectos pesan menos (81 a 92 % para luces de 25 cm. y 50 cm.) que los de arco, si se trata de tramos independientes y (79 a 88 % con esas mismas luces), en tramos continuos. Para luces mayores, el arco cobra ventaja («Los puentes de fundición comparados...», op. cit.).
- Si una pila asienta en el terreno más de lo debido, la reparación de un puente recto es elemental y la de uno de arco puede ser grave (Molinos: op. cit.).
19. Motivo por el que esos puentes se llamaron *de tablonos* en Norteamérica (y vigas americanas en Europa).
20. Se llamaron largueros o fajas (Saavedra, E.: «Vigas de celosía», *Revista de Obras Públicas* Tomo 1859. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 1859, p. 117).
21. En 1938, Warren y Morzani patentan en Inglaterra la viga de madera realizada con dos familias e diagonales isósceles de la misma inclinación y formadas con piezas simples sin cruzarse arias familias dentro del alma) y que posteriormente pasaría a ser toda metálica perviviendo hasta hoy. En 1840, Howe patenta la viga de madera con montantes traccionados de hierro con variantes celosías dobles, simples, múltiples,...). Fue muy extendida, mientras mantuvo los dos materiales, pero desapareció su uso al quedar sólo el de hierro. En 1844, Pratt, americano especializado en caminos ferroviarios, patenta la de montantes comprimidos de madera y diagonales de hierro (inicialmente múltiples luego o dejó en una por recuadro). También sobre vivió hasta hoy (Ortiz Herrera et al.: Op. cit.).
22. Los ensambles tradicionales de la carpintería de armar traducen cualquier esfuerzo de las piezas a las que une, al de compresión (no hay otra posibilidad duradera si se quiere aprovechar a favor de la merma de la madera)
23. La obra de estos puentes era unitariamente más económica que los de arco ya que su construcción sólo exigía cortar las piezas a la longitud determinada, asarlas por una taladradora para hacer los pasos e los roblones, trasladarla a obra de manera bastante eficaz dada la uniformidad de las piezas desmontadas montarlas, muchas veces con poco andamiaje, gracias a la suficiente rigidez que va adquiriendo a propia obra, aunque esté a medio terminar, ante las cargas de montaje (Saavedra: op.cit.).
24. El puente de Richmond, Virginia, proyectado por Robinson, viga continua de 12 tramos de 50 m. cada uno se consideró un fracaso porque, proyectado para doble vía, se deformaba excesivamente al paso de dos trenes en sentido contrario y a la vez (Ut supra: *Las torsiones a las que da lugar esa combinación de sobrecargas deben estar aún vagando por aquellos montes sin encontrar por donde escarpar*).
25. Se han hecho ensayos comparativos a escala 1/8 entre vigas de palastro y vigas tipo Town, resultando que para la misma cantidad de material, la carga admitida por la de alma llena es 1,92 veces superior, aunque el precio unitario de la segunda es 0,67 el de la primera, de lo que resulta una mejor relación para la viga de palastro de 1,28. La rotura de las primeras se producía en la zona más solicitada de los cordones, mientras que las segundas fracasaban por fallo de la celosía en la zona del apoyo. Se harán más ensayos distribuyendo la celosía más adecuadamente, ya que la facilidad de montaje y de transporte están aumentando el uso de éstas (Molinos: op. cit.).
- Se ensayaron vigas de luz 11' y canto 1'1'' con cordones iguales pero variando las celosías entre enrejados y alma llena flectando el doble la de celosía (Saavedra: op. cit.).
26. Prestan servicios militares por la rapidez de montaje. Para su ruina sólo es necesario quitarle algunas articulaciones, lo que evita el riesgo de la pólvora (Molinos: op. cit.).
27. Ortiz Herrera et al.: op. cit.
28. El primer puente de cables de alambres de hierro se empezó a construir en Filadelfia en 1815, con una luz de 122 m. y 0,60 m. de ancho. Consistía en dos cables de tres alambres de 1 cm. de diámetro cada uno. El de Charley, sobre el Sarine, en Friburgo, es de 1830, tiene 265 m. y consta de cuatro cables de 1.056 alambres de 3 mm. de diámetro. En 1826, Telford termina el de Menai, de 176 m. con 4 filas de cadenas de eslabones («Los puentes de hierro», *Revista de Obras Públicas* Tomo 1861. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1861, p. 37).
29. Molinos: op. cit.
30. En las uniones se usa una mezcla de sal de amoníaco, azufre, agua y limaduras de hierro que producen una rigidez casi perfecta y evitan las holguras de los pasadores... (al respecto, vid.: «Los puentes de fundición comparados...», op. cit.).

31. *Todavía faltaban algunos años para que Eduardo Saavedra afirmara: «La perfección a que han llegado las máquinas de cepillar el hierro han permitido hacer apoyar las dovelas en toda la longitud de las juntas» («Los puentes de hierro», *Revista de Obras Públicas* Tomo 1861. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1861, p. 37).*
32. Polonceau, A. R.: *Notice sur le nouveau système de ponts en fonte, suivi dans la construction du pont Carrousel*. Fain et Thunot. París, 1839.
33. Lejos de apuntarse el estar inventando los principios de la madera laminada, indica a pie de página que este procedimiento lo ha visto hacer a M. Emy, coronel y experimentado constructor, que *ha hecho una obra de madera cuyos arcos estaban formados por tablas y por idéntico motivo* (ut supra).
34. *Ibidem*.
35. *Ibidem*.
36. Vázquez Orellana, Rodrigo: *El puente de Triana (II)* en *Los puentes sobre el Guadalquivir en Sevilla*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1999.
37. En 1842, el Ayuntamiento elige un proyecto de puente colgante de Jules Seguin (Lefler Pino, J.: *El puente de Triana (I)* en *Los puentes sobre el Guadalquivir en Sevilla*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1999).
38. Vid. Aguilar Civera, I.: *Patrimonio Arquitectónico industrial*. Cuadernos de Restauración. Instituto Juan de Herrera. E.T.S. de Arquitectura. Madrid, 1999.
39. «En 1786, Tom Pine diseña un puente de fundición sobre el río Schuykill y se va a Inglaterra a patentarlo y a encargar la construcción de sus piezas» (Benévolo, L.: op. cit.).
- mer Congreso Nacional de Historia de la Construcción*. Madrid, 1996, pp. 265 y ss.
- Kersten C. *Empleo del hierro en la construcción*. Canosa, 1929.
- Lefler Pino, J.: *El puente de Triana (I)* en *Los puentes sobre el Guadalquivir en Sevilla*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1999.
- Lohse, M. H. y Weidtmann, M.: Experiencias relativas a los puentes de celosía, *Revista de Obras Públicas* Tomo 1858. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1858, p. 178.
- Molinos, L.: «Consideraciones que pueden servir de guía en la elección de un sistema de puentes», *Revista de Obras Públicas* Tomo 1855. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1855, pp 54 y 71.
- Navascués Palacio, P.: La arquitectura del hierro en España durante el siglo XIX. *CAU*, núm 65. 1980.
- Ortiz Herrera, Jesús e Hierro Sureda, Jesús: *El desarrollo histórico de la Construcción metálica. Intervención en estructuras metálicas*. Curso de análisis estructural e intervención en los edificios (dir. por J. M. Ávila Jalvo). C.O.A.M., 2000.
- Orús Asso, Asso, Félix: *Materiales de Construcción*. Dosat. Madrid, 1963.
- Polonceau, A. R.: *Notice sur le nouveau système de ponts en fonte, suivi dans la construction du pont Carrousel*. Fain et Thunot. París, 1839.
- Prusmann: «Comparación entre los puentes de palastro del sistema ordinario y del de Town», *Revista de Obras Públicas* Tomo 1855. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1855, p. 75.
- Saavedra, E.: «Vigas de celosía», *Revista de Obras Públicas* Tomo 1859. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1859, p. 117.
- «Puentes de hierro.- Vigas triangulares. Patente Warren y Kennard», *Revista de Obras Públicas* Tomo 1859. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1859, p. 82
- «Los puentes de hierro», *Revista de Obras Públicas* Tomo 1861. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1861, p. 37.
- Vázquez Orellana, Rodrigo: *El puente de Triana (II)* en *Los puentes sobre el Guadalquivir en Sevilla*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1999.
- «Los puentes de fundición comparados con los de hierro forjado», *Revista de Obras Públicas* Tomo 1859. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1880, pp. 188, 201, 223, 235.
- «Puentes de acero», *Revista de Obras Públicas*, núm. 14. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1896, p. 8.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar Civera, I.: *Patrimonio Arquitectónico industrial*. Cuadernos de Restauración. Instituto Juan de Herrera. E.T.S. de Arquitectura. Madrid, 1999.
- Benévolo, L.: *Historia de la Arquitectura Moderna*. Gustavo Gili. 6 ed. ampliada. Barcelona, 1987, capítulo I.
- Elskes, E.: Rotura de puentes metálicos, *Revista de Obras Públicas*, núm. 43. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 1895, pp. 9 y 116.
- Graciani García, A.: La construcción del puente de Isabel II de Sevilla. Los problemas de cimentación. *Actas del Pri-*