

EL PUENTE DE TRIANA Y SU TIEMPO

(TRIANA BRIDGE AND ITS AGE)

José Miguel Ávila Jalvo

Fecha de recepción: 2-X-2000

ESPAÑA

560-33

RESUMEN

La labor de construir un puente sobre el Guadalquivir no debía de ser empresa fácil si consideramos que desde Córdoba a Sanlúcar 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 con un puente de barcas, explica, sin necesidad de otra justificación, lo insensato que le debía parecer a los expertos de la zona el fiarse del lecho del río. Esa misma prosperidad hizo que, gracias a nuevas técnicas y nuevos materiales, se retomara la intención de emprender la obra.

El uso industrial del hierro, su aplicación a las comunicaciones y el éxito de los primeros puentes suspendidos —con luces iguales y superiores a la que aquí se plantea—, 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. Las de fábrica, que no habían cuajado desde el XV, resurgen de la mano, como no, de Silvestre Pérez y, las de hierro (arcos o vigas), entraban en la liza, aunque ni unas ni otras resolvían el problema del suelo.

SUMMARY

Before the XIX century, nobody dare to construct a bridge on Guadalquivir river, from Córdoba to Sanlúcar. It was, really, a great venture. In Sevilla, one of the most flourishing towns by the time in Spain, this problem was solved with a boat's bridge. That means that the technicians did not trust in the river bed. But, thanks to the fact of Sevilla's prosperity and of the new technologies and new materials, they decided, finally, to undertake the work.

The industrial use of the iron concerning communications and the success of the first suspension bridges —with span alike or higher to those herewith stated—, encouraged the technicians to jump over the one hundred and fifty meters between Sevilla and Triana. The choice of the suspension bridge was taken because it was useful to introduce other options, like this of the masonry, with Silvestre Pérez not used from the XV century, and this of iron (arcs or beams). But, no one of them solved the bed problems.

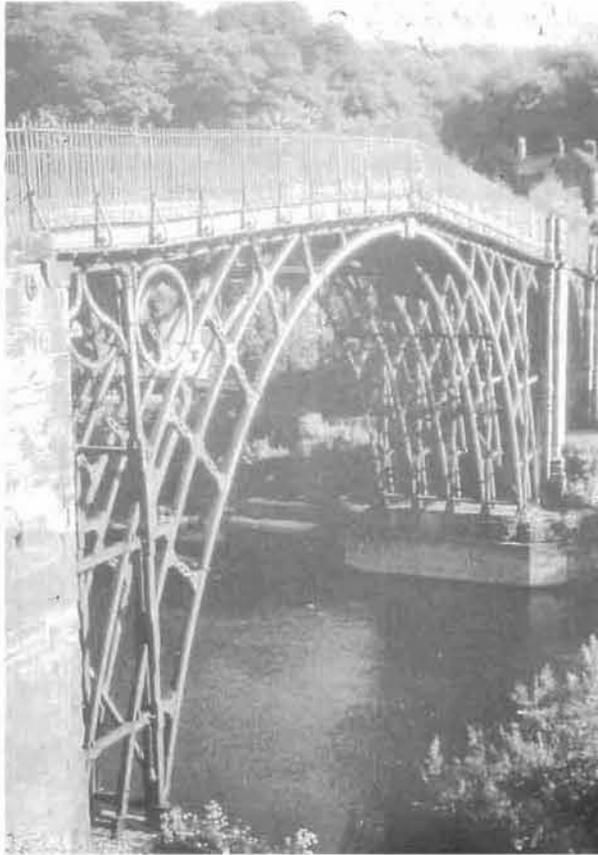


Solución pétreo apoyando en el lecho: Silvestre Pérez.



Solución con viga de hierro salvando el cauce.

Este trabajo, limitado a la parte metálica del puente, estudia las posibilidades de elección de las que se dispuso y el estado del arte de aquel tiempo. Tiempo que viene a abarcar un siglo, desde 1789⁽¹⁾ 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, habían 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, un camino similar al seguido anteriormente en las obras de fábrica o de madera; camino en el que se alcanzó un razonable dominio técnico a la espera de que gentes que estaban aún por nacer otorgaran una validación científica a diseños y dimensionados. 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. Polonceau, como se verá a través de sus comentarios sobre el diseño de su puente del Carrousel, nos hará ver hasta qué punto supieron entender los problemas constructivos que planteaba este nuevo material.



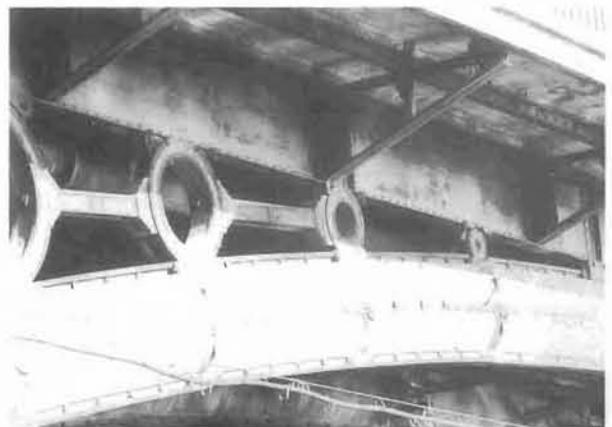
Puente de Coalbrookdale.

MATERIALES FÉRRICOS

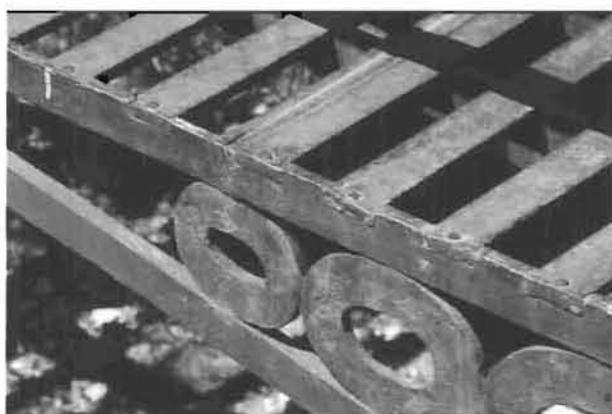
Gracias a la posibilidad de producción de calor suficiente se puede obtener masivamente un metal férico, fundido o forjado, razonablemente refinado y que va a dar lugar, desde el último tercio del XVIII, a intentos de aplicación en muchas actividades, entre ellas, las obras públicas. Pero no basta con disponer del material, hace falta el desarrollo de una técnica, hay que inventar uniones, piezas, métodos de dimensionado, formas, etc. Las uniones se deben resolver en frío ya que fuera de las ferrerías no hay forma de aportar suficiente calor y las piezas, hechas con un material cuya densidad cuadruplica a la piedra, deben desarrollar formas adecuadas para resistir con el menor peso.

La fundición⁽³⁾ lo resuelve haciendo elementos huecos pero es frágil, resiste mal la tracción y tiene serias dificultades de enlace. Su forma 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 o adornos, lo que provoca fuertes tensiones residuales que, dada la acritud del material, le facilitarían la rotura⁽⁴⁾.

El hierro se fabrica en lingotes y se forja industrialmente con la laminación para producir palastros que enlazados permitan montajes de ingenios. La frecuencia con la que en estos montajes se necesita uniones en ángulo recto lleva a inventar el angular en 1817 y, como es bueno disponer de una superficie plana inferior para resolver el apoyo de las piezas y otra superior para recibir a las cargas, nacen las secciones con forma de cajón y de doble T en 1837, sin necesidad de esperar a saber que esta forma resulta ser mecánicamente muy eficaz. El hierro forjado⁽⁵⁾ era un material más homogéneo que la fundición, 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 oxidación⁽⁷⁾ o necesidades decorativas⁽⁸⁾.



Piezas de fundición. Puente de Triana.



Forja manual (detalles). Canal de Isabel II. Pontón de la Oliva.

Ambos materiales formaron parte conjuntamente de muchas obras colocando a cada uno en donde mejor servicio prestaba. Se elegía la fundición para elementos comprimidos (ya que, al ser huecos, su mayor inercia aleja los problemas de inestabilidad) y, la forja, para los traccionados (que al ser más resistente usa menos material). Por último, la mayor fiabilidad del cable⁽⁹⁾, gracias a que el manojó de alambres permite fallos locales de poca trascendencia (aunque tuviera problemas con la oxidación), 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⁾.

FORMAS HISTÓRICAS

El arco -la bóveda- de fábrica fue, a lo largo de la historia, el sistema empleado a la hora de construir puentes. Esta forma, que se había ido decantando durante milenios, resultaba técnica y económicamente razonable y aseguraba frecuentemente el éxito en la empresa de cruzar vados. Sobre ella, unos rellenos más o menos compactos era todo lo que necesitábamos para alcanzar la cota de calzada.

La madera desarrolló sus propios tipos: la viga, nacida de dejar caer piezas enteras entre los bordes del río 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 permitir 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 se tratara, salvo que, la dificultad de fundir formas prismáticas de aristas vivas y de apoyarlas junta contra junta como con piedra, 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 largas 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, cada arco -cada ojo- del puente se construía con muchos arcos -cuchillos- y posteriormente se redujo el número hasta sólo dos por vano⁽¹³⁾. Esta reducción era razonable -vista desde hoy- ya que aumenta la carga por arco y, en consecuencia, su sección, lo que reduce el material dedicado a evitar la inestabilidad. Visto desde ayer, disminuía el número de barras, al haber menos tímpanos (en alzado) y arriostramientos entre arcos (en planta). Así, aunque la cantidad de material fuera similar, el número de uniones y la mano de obra se redujeron notablemente. 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 estos tableros requerían cada vez más rigidez al ir aumentando la luz de los puentes, al conocer mejor la exposición a vientos laterales y al crecer la magnitud de las sobrecargas.



Pont de Les Arts. Paris.

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 es el cómo resolver el relleno. 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, cuál es su dirección correcta, si colocarlas en vertical (montantes), en horizontal (codales) o inclinadas (diagonales). 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 resaltes 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 metálico. Esta reducción de masa y el empleo de un material más resistente van a permitir aumentar el alcance y la relación entre la sobrecarga y el peso propio; pero la rigidez que proporcionaba la masa la íbamos a perder justo cuando apareció la gran novedad del XIX: el ferro-carril⁽¹⁵⁾.

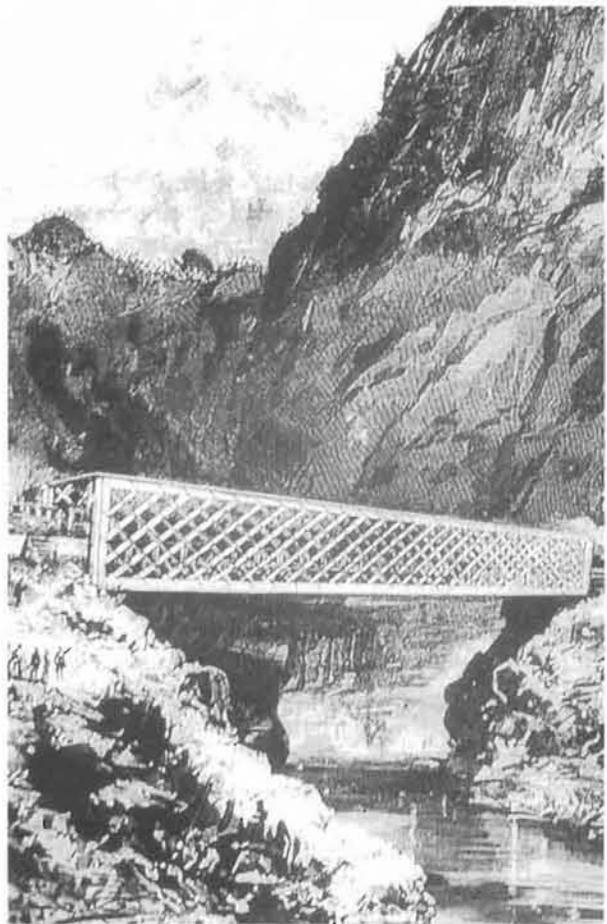
En aquellos momentos, estas vibraciones debieron producir con cierta frecuencia roturas locales de las piezas del tímpano que tuvieron entretenidos al personal de mantenimiento y a los técnicos. Las deformaciones del arco para ajustarse a la forma adecuada a las sobrecargas de cierta entidad (sin llegar 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 desperfectos. 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 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 sobrecargas gracias al reducido peso propio. Estas formas estaban hechas con piezas que genéricamente se llamaron tablones⁽¹⁹⁾, unidas con pasadores. El conjunto queda definido por un cordón superior y otro inferior⁽²⁰⁾ enlazados por un enrejado o por una celosía que le darían su nombre definitivo. Fueron inventadas por Town y consistían en dos cordones paralelos y un enrejado de diagonales en el alma. Sus posteriores variantes, en las que lo más aparente es la diferente disposición geométrica del alma, tratan de mejorar la conexión de las barras y optimizar los materiales empleados en cada familia (montantes y diagonales). Esto va a suponer el nacimiento de un mundo de patentes que dominará la contratación de las obras durante cincuenta años⁽²¹⁾.



Puente de rejilla (celosía múltiple). Cobas.

Debe comprenderse que el motivo de estas patentes no es tanto registrar una forma geométrica, como resolver un modo de transmitir esfuerzos (la mitad de ellos de tracción) entre las piezas que forman la viga. Combinan hierro y madera (o madera y madera en el origen) en las dos familias que forman la celosía ya, que los materiales férricos resisten mal las tracciones mientras que la madera, que sí las resiste, tiene tantas dificultades en transmitir las a las otras piezas que confluyen en el nudo que se solía hacer trabajar a compresión⁽²²⁾. Inicialmente, predominaron las patentes con familias múltiples de diagonales y montantes para distribuir más suavemente los esfuerzos al multiplicar el número de uniones a lo largo de la longitud de la barra. Así se reduce la debilidad al desgarro a la que se veía abocada la pieza por el elevado número de agujeros de sus extremos, necesarios para permitir el paso de roblones y pasadores. Con el tiempo, la mejor mecanización y finura del material aumentaron la fiabilidad de las uniones, lo que permitió concentrarlas en los extremos de las barras y se fue derivando hacia las celosías simples. Mucho tiempo después, la mejora de la calidad del hierro y el aumento del uso del acero (fiable a tracción) 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 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.



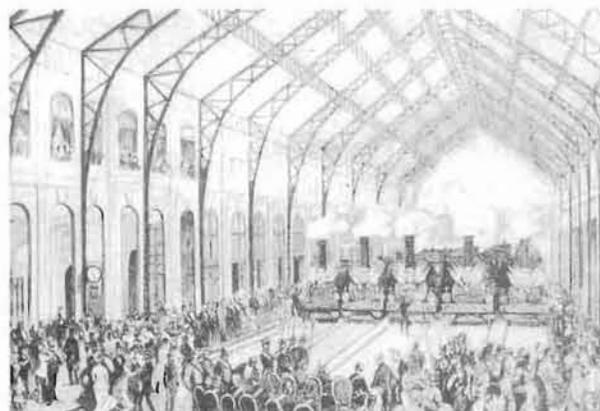
Celosía diseñada para reducir la inestabilidad. Mieres.

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 con la entrada del acero⁽²³⁾ 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 se usaron vigas de alma llena -llamadas de palastros- y que daban soluciones más rígidas que la de celosía en los ensayos realizados en aquella época (aunque hay que considerar que eso ocurría para pequeños tamaños, con



Cercha Polonceau. Ávila.



Sistema Dion. Estación de Delicias. Madrid.

una distribución no muy adecuada de los enrejados -barras del alma- y con dificultades de realización de las uniones⁽²⁵⁾. 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 -curiosamente 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 con el apoyo descendido que luego eleva para ponerlo en carga) y, no satisfecho con esas novedades, se le ocurre aprovechar el tubo para que circulen los trenes dentro de él⁽²⁶⁾.

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⁽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



Puente de cadenas. Budapest.



Maqueta puente colgante. Exposición Agustín de Betancourt.

para pasar en seguida 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 hacen 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 solo 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), podrían 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, que trabajaba de inspector de puentes y calzadas de Francia, dedica un capítulo especial para comparar estos puentes con los de arcos:

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 se va debilitando 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 cables 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.

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, al no resistir bien las tracciones, 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 la junta y es claro que ese contacto irregular produce concentraciones de tensión, giros locales y deformaciones globales⁽³¹⁾.

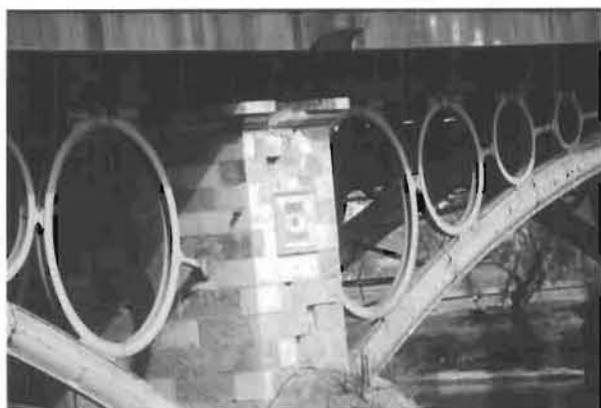
Polonceau estaba seriamente preocupado por conseguir un adecuado ajuste entre estas piezas y, para resolverlo, tenía pensado inicialmente introducir, una vez colocadas las piezas en su lugar, finas lamina de hierro en las holguras, ligeramente cuneiformes, que luego se serrarían para dejarlas ocultas. 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⁾:

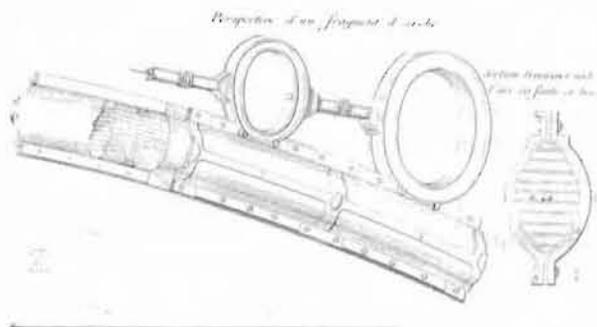
- Facilita la puesta en obra de las piezas de fundición, ya que van haciendo al arco algo autoportante según se va construyendo (aunque se necesitarán algunos apeos).
- Una vez el puente en uso permite sustituir piezas dañadas, ya que la madera interior sirve de obra auxiliar sin necesidad de mayores 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.
- 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, esto resuelto, pasa a describir el proceso a seguir con la colocación de la madera:

Los arcos se rellenan con 9 grandes listones de pino del Norte⁽³³⁾ 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



Detalle de conexión: anillos, arco y pilas. Puente de Triana.



Piezas de fundición. Proyecto del puente de Carrousel.

vayan empalmado en secciones distantes, de modo que en cada sección siempre hay, al menos, 8 tablones resistentes. Es como un arco de madera ya que al estar envuelto por el hierro funciona como una sola 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, pero entonces no se les habría dado la forma del arco tan fácilmente⁽³⁴⁾.

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 flecha 8 mm

El cilindro de fundición dulce:

1.080 kg flecha 10 mm

y el mismo, con madera:

1.450 kg flecha 12 mm

Siendo insuficiente experiencia para conclusiones generales, el experimento muestra que la colocación de madera dentro es muy beneficiosa para la resistencia⁽³⁵⁾.

Los tímpanos

Aquí Polonceau vuelve a reestudiar lo construido hasta el momento. Ya se habían hecho puentes cuyos tímpanos estaban formados por aros pero, dentro de esa fisonomía,

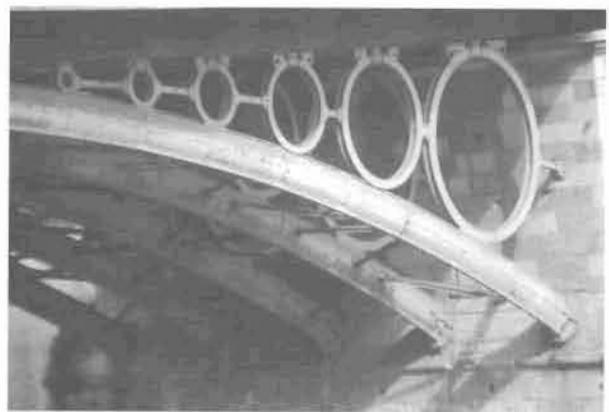
que elige -dice- porque la forma circular es la más perfecta y resistente y, además, porque la forma de anillo es la más adecuada para la misión del tímpano, que es la de amortiguar las vibraciones del tablero producidas por las cargas móviles, la distribución de aros y su diseño queda modificada con 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 aros 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 aros tampoco son tangentes 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⁽³⁶⁾.

Puede que eso ocurriera en París, pero no en Sevilla donde esas distancias no son constantes por lo que pudo quedarse en una buena intención que no se llevara a cabo en ninguno de los dos sitios. En Sevilla se había especificado que el tablero fuera distinto al de París, para evitar el uso de la madera -manteniendo nuestro ancestral cariño hacia este material-, por lo que se hizo un entrevigado de palastros que servían de fondillo a un relleno sentado con yeso y cuyo conjunto estaba completamente corroído -como cabía esperar- pocos años después⁽³⁷⁾.

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 la técnicas del hierro. Las miradas se fijan en los puentes colgantes que, en el caso de esta ciudad, tenía



Timpano del puente de Triana.

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⁽³⁸⁾. 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 explícitamente aún en este trabajo: repetitividad, empleo de elementos seriados e, incluso, la venta por catálogo⁽³⁹⁾. Ya no hay que confiar en que nuestro artífice preferido mantenga el estilo que nos hizo contratarlo sino que podemos comprar su obra directamente, la que más nos guste, darnos un capricho sin correr el riesgo de aguantarle, puesto que tampoco hay que traerle como se hacía cuando los edificios eran de fábrica. El hierro había creado otros hábitos también en esto (además, hubiera sido difícil contar con la colaboración directa de Polonceau, ya de avanzada edad, y que muere en 1847). Los autores tenían, por su lado, la salvaguarda de las patentes, ya mencionadas, para defenderse de la copia de sus trabajos⁽⁴⁰⁾ y cabe suponer que, al igual que hizo en

otros casos, Polonceau registrase su puente en su momento. Volviendo al encargo, cuando los duques de Montpensier, con residencia en Sevilla, conocen el puente de París y se encaprichan de él y convencen al Cabildo para que lo incluya como opción y ésta resulta ganadora, no es extraño que se haga tan parecido al del Carrousel -para lo que basta el abono de la licencia de la patente-. Lo que extraña es que no sea igual, siéndolo, casi, la longitud a cruzar.

De modo que en Sevilla se hizo una obra de hierro aplicando las posibilidades técnicas y de mercado del momento. La ciudad no quiso correr riesgos y compró lo que le gustaba (y debió gustarle mucho a juzgar por el empeño de su población en mantenerlo). Su capricho lo disfrutamos hoy gracias a esa constancia ciudadana y a una acertada intervención, rehabilitadora por un lado y conservadora por otro, que mantuvo arcos y tímpanos originales a cambio del bajo precio estético que supuso sustituir la enésima versión del tablero para mantener el puente en condiciones actuales de uso. Y, lo demás, ya está dicho.

"Las referencias que aparecen en el texto y en las NOTAS son generalmente un resumen de los originales cuyos números entre paréntesis hacen referencia al indicado en la bibliografía".

NOTAS

(1) Cuando se termina de construir el puente de Coalbrookdale sobre el Severn por Pritchard, Wilkinson y Darby y considerada como la 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 (10).

(3) Cuyas tensiones admisibles estaban en 5 kN/cm^2 a compresión y en 1 kN/cm^2 a tracción.

(4) Las tensiones residuales que producía el proceso de moldeo fueron detectadas al comprobar que una pieza de fundición de 2 m de longitud acortaba al enfriar del orden del centímetro, mientras otra de 6 m sólo lo hacía unos milímetros más (en lugar de los tres centímetros esperados), luego ésta se enfriaba antes de recuperar su longitud de reposo y daba lugar a tensiones residuales tanto mayores cuanto más larga fuera. Esto limitó el tamaño de las barras para alejar la rotura frágil.

(5) Cuyas tensiones admisibles estaban en 6 kN/cm^2 a compresión y entre 2 y 6 kN/cm^2 a tracción.

(6) De (8).

(7) Una pieza expuesta a la humedad pierde 0,87 mm en 100 años y 5,5 mm en ambiente marino (18).

(8) La fundición se acomoda más en puentes urbanos, por ser más fácil su decoración, aunque da lugar a puentes más caros, posiblemente por tener que asignarles menores tensiones que a los de hierro dulce (18).



Tablero independiente de la obra original. Puente de Triana.

(9) Que admitía 15 kN/cm² a tracción.

(10) De (18).

(11) Dos puentes de dovelas de fundición, a imitación de sillares de piedra, son: el puente de Sunderland fabricado y patentado por Paine (y montado por Burdon), sobre el Wear, de 1796 con 70 m de luz y, ese mismo año, el de Buildwas, de Telford, sobre el Severn de 40 m de luz (2).

(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: por un lado, la ferrería estaba en el mismo lugar de construcción (lo que reduce el problema de transporte) y, por otro, 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 daba lugar a los puentes llamados de bastidores) por piezas de fundición que tenían 6 m de longitud, 2 m de grueso y 9 cm de espesor (16).

(13) El modelo de George Martin consiste en colocar 2 cuchillos en lugar de 4 ó 5 de forma que las vigas principales del tablero están formadas por un vano (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, las diferentes condiciones de deformación hacen que en cada uno cargue una cantidad incierta (18).

(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) Que era como lo escribían entonces.

(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 de la forma circular (8).

(17) Aunque el precio unitario del hierro forjado era mayor, los puentes de arco fueron sustituyendo a los de fundición por diversos motivos: la deformación ante sobrecargas de uso era sensiblemente menor, lo que reducía la necesidad de poner carga muerta como se venía 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 cargas 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 (18).

(18) Los puentes de varios vanos no conviene que sean de arcos porque obligan a las pilas a resistir como estribos (por si quiebra algún tramo). Si a pesar de esto, 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 (8).

Sin considerar el ahorro que supone el que las pilas no tengan empuje sino sólo el propio peso del puente, y fijándonos en la obra metálica, los puentes rectos pesan menos (81 a 92% para luces de 25 m y 50 m) 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 (18).

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 costosa (8).

(19) Motivo por el que estos puentes se llamaron de tableros en Norteamérica (y vigas americanas en Europa).

(20) Que se llamaron largueros o fajas (14).

(21) En 1938, Warren y Morzani patentan en Inglaterra la viga de madera realizada con dos familias de diagonales isósceles o de la misma inclinación y formadas con piezas simples (sin cruzarse varias 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 y con variantes (celosías dobles, simples, múltiples,...). Fue muy extendida mientras mantuvo los dos materiales, pero desapareció su uso al quedar sólo el hierro. En 1844, Pratt, americano especializado en caminos ferroviarios, patenta la de montantes comprimidos de madera y diagonales de hierro (inicialmente múltiples y luego lo dejó en una por recuadro). También sobrevivió hasta hoy (10).

(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 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, pasarlas por una taladradora para hacer los pasos de los roblones, trasladarla a obra de manera bastante eficaz dada la uniformidad de las piezas y montarla; muchas veces con poco andamiaje, gracias a la suficiente rigidez que va adquiriendo la propia obra, aunque esté a medio terminar, ante las cargas de montaje (14).

(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 (14) [*Las torsiones a las que da lugar esa combinación de sobrecargas deben estar aún vagando por aquellos montes sin encontrar por donde escapar*].

(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 (8). Se ensayaron vigas de luz 1'1" y canto 1'1" con cordones iguales, pero variando las celosías entre enrejados y alma llena, flectando el doble la de celosía (14).

(26) Resumido de (10).

(27) 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 (8).

(28) El primer puente de cable de alambres de hierro se empieza a construir en Filadelfia, en 1815, con una luz de 122 m y 0,60 m de ancho. Consistía en dos cables de 3 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 4 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 (16).

(29) Resumen de (8).

(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...(18).

(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"* (16).

(32) Resumen de (12).

(33) Hasta tal punto el puente de Isabel II es una réplica del de París que en la memoria del proyecto se repite esta denominación de madera de pino del Norte.

(34) Lejos de apuntarse la autoría de lo contenido en esta frase, en la que dicho sea de paso, se están inventando los principios de la madera laminada, indica 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 (12).

(35) De (12).

(36) Resumen de (12).

(37) De (17).

(38) En 1842 el Ayuntamiento clige un proyecto de puente colgante de Jules Seguin (6).

(39) Véase en (1).

(40) "En 1786, Tom Paine diseña un puente de fundición sobre el río Schuykill y va a Inglaterra a patentarlo y a encargar la construcción de sus piezas..." (2).

BIBLIOGRAFÍA

- (1) AGUILAR CIVERA, I.: *Patrimonio Arquitectónico industrial*. Cuadernos de Restauración. Instituto Juan de Herrera. E. T. S. de Arquitectura. Madrid, 1999.
- (2) BENÉVOLO, L.: *Historia de la Arquitectura Moderna*. Gustavo Gili. 6ª ed. ampliada. Barcelona, 1987. Capítulo I.
- (3) ELSKES, E.: "Rotura de puentes metálicos", *Revista de Obras Públicas* Núm 43. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 1895, pág. 109 y 116.
- (4) 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. Pág. 265 y ss.
- (5) KERSTEN, C.: *Empleo del hierro en la construcción*. Canosa, 1929.
- (6) 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.
- (7) LOHSE, M. H. y WEIDTMANN, M.: "Experiencias relativas a los puentes de celosía", *Revista de Obras Públicas* Tomo 1858. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 1858, pág. 178.
- (8) MOLINOS, L.: "Consideraciones que pueden servir de guía en la elección de un sistema de puentes", *Revista de Obras Públicas* Tomo 1855. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 1855, págs. 54 y 71.
- (9) NAVASCUÉS PALACIO, P.: "La arquitectura del hierro en España durante el siglo XIX". *CAU*. Núm 65, 1980.
- (10) ORTIZ HERRERA, J.; HIERRO SUREDA, J.: *El desarrollo histórico de la construcción metálica. Intervención en estructuras metálicas*. Curso de análisis estructural e intervención en los edificios. (Director José Miguel Ávila Jalvo). C.O.A.M. 2000.
- (11) ORÚS ASSO, F.: *Materiales de Construcción*. Dossat. Madrid, 1963.
- (12) POLONCEAU, A. R.: *Notice sur le nouveau système de ponts en fonte, suivi dans la construction du pont Carrousel*. Fain et Thunot. París, 1839.
- (13) PRUSMANN: "Comparación entre los puentes de palastro del sistema ordinario y del de Town.", *Revista de Obras Públicas*, Tomo 1855. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 1855, pág. 75.
- (14) SAAVEDRA, E.: "Vigas de celosía.", *Revista de Obras Públicas* Tomo 1859. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 1859, pág. 117.
- (15) "Puentes de hierro.-Vigas triangulares. Patente Warren y Kennard", *Revista de Obras Públicas*, Tomo 1859. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 1859, pág. 82.
- (16) "Los puentes de hierro.", *Revista de Obras Públicas*, Tomo 1861. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 1861, pág. 37.
- (17) VÁZQUEZ ORELLANA, R.: *El puente de Triana (II) en Los puentes sobre el Guadalquivir en Sevilla*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 1999.
- (18) "Los puentes de fundición comparados con los de hierro forjado", *Revista de Obras Públicas*, Tomo 1880. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 1880, págs. 188, 201, 223 y 235.
- (19) "Puentes de acero", *Revista de Obras Públicas* Núm 14. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid. 1896, pág. 8.
