

## Estructura y forma de los puentes arco metálicos



**Leonardo Fernández Troyano**

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Presidente de CFCSL

### Resumen

El arco ha sido históricamente la estructura resistente por excelencia. “El arte donde la materia se vence a sí misma” como figura en el templo del puente de Alcántara.

Los puentes arco metálicos se iniciaron a finales del siglo XVIII, con piezas de hierro fundido. En la segunda mitad del siglo XIX se empezó a utilizar el hierro forjado mediante laminación, que dio lugar a las chapas y los perfiles; posteriormente se pasó al acero que dio mayor calidad al material. Esta evolución dio lugar a un desarrollo espectacular en el siglo XIX, cuyas luces pasaron del puente de Coalbrookdale de 30 m de luz, a los 256 m del Honeymoon Bridge sobre el Niágara, que continuó en el siglo XX hasta el puente de New River Gorge de 518 m de luz, el mayor de este siglo.

### Palabras clave

Puentes arco, puentes de fundición, puentes de hierro forjado, puentes de acero, construcción de los arcos

### Abstract

*The arch has historically been held as the most perfect of supporting structures and hence the words “Art is where material overcomes itself” as inscribed on the Roman bridge of Alcántara.*

*Metal arch bridges were first introduced in the 18th century using cast iron members. In the second half of the 19th century rolled wrought iron was used and gave rise to plates and sections, before passing on to steel which provided a better quality alloy. This evolution gave rise to spectacular development over the 19th century, with bridge spans passing from the 30 m span of the Iron Bridge at Coalbrookdale to the 256 m span of the Honeymoon Bridge over the Niagara and continuing up to the 518 m span New River Gorge Bridge, the largest single-span bridge to be built in the 20th century.*

### Keywords

*Arch bridges, cast iron bridges, wrought iron bridges, steel bridges, arch construction*

### 1. Idea del puente arco

El arco es una estructura que, gracias a su forma, resiste las cargas que actúan sobre él mediante un mecanismo resistente donde predominan las compresiones. Ha sido, durante la historia, la estructura resistente por excelencia. Su resistencia se debe a su forma, o lo que es lo mismo, es geometría hecha estructura resistente. Es el primero y el mayor invento del hombre en el campo de las estructuras, y ha sido a lo largo de la Historia un elemento singular en la construcción; sus constructores han tenido siempre presente su carácter de estructura resistente, lo que no ha ocurrido con las demás. ‘*Ars ubi materia vincitur ipsa sua*’ (‘El arte donde la materia se vence a sí misma’) es la definición que figura en el frontispicio del templo del puente de Alcántara. ‘El arco nunca duerme’, un proverbio indio, igualmente ilustrativo de la presencia de la dimensión resistente en la idea del arco.

La geometría del arco admite pocas variaciones; pueden ser más o menos rebajados, pero todos son semejantes, aunque en los puentes arco hay diferencias abismales de fisonomía, desde los arcos de piedra a los grandes arcos metálicos.

En su estructura también caben pocas variaciones; pueden ser biempotrados, biarticulados o triarticulados que dan lugar a una estructura isostática. Los tres tipos se han utilizado en los arcos metálicos y han tenido importancia en el desarrollo de los puentes arco. Por ello, vamos a estudiar especialmente la influencia de la estructura en la forma de los arcos de los puentes. Pero, como veremos, no sólo ha influido en su forma la estructura adoptada, sino que en los de gran luz ha influido también el proceso de construcción, que ha dado lugar a formas que se pueden considerar contrarias a la lógica de su estructura.



Fig. 1. Puente de Coalbrookdale sobre el río Severn (Gran Bretaña). Luz 30 m. 1779. T. Pritchard. A. Darby III, J. Wilkinson

El proceso de construcción es especialmente significativo en los arcos porque al ser una estructura que resiste por forma, no puede funcionar como tal hasta que está cerrado. Por ello, durante su construcción debe utilizar formas de resistir distintas a la final, bien sea mediante una estructura auxiliar, la cimbra, bien con otro tipo de estructura resistente.

## 2. Los puentes arco metálicos de fundición

Cuando a finales del siglo XVIII se iniciaron los puentes metálicos, el arco era la estructura que mejor conocían los ingenieros de ese momento, tanto en los de piedra como en los de madera porque la mayoría de los puentes grandes de este material también eran arcos o pórticos.

En el año 1779 se terminó el primer puente arco metálico, el de Coalbrookdale sobre el río Severn, en Gran Bretaña. Es un arco de medio punto de 30 m de luz con una idea poco clara de su estructura. Influidos por los puentes de piedra, se trató de reproducir los tímpanos mediante un entramado de piezas radiales y concéntricas al arco que define el intradós, que no tiene una sección metálica significativamente mayor que el resto de las piezas del entramado. El último hueco que queda entre las barras circunferenciales y el tablero

se rellena con una circunferencia, solución que se utilizó posteriormente en muchos puentes para conectar el arco y el tablero. Las uniones entre las piezas de fundición son análogas a las que se usaban en las estructuras de madera.

Esta solución de reproducir los tímpanos mediante un entramado se repitió en varios puentes. Thomas Paine, un ingeniero norteamericano, fabricó en Inglaterra unas piezas que consistían en un entramado en tres dimensiones de piezas ortogonales que una vez unidas formaban arcos de anillos concéntricos unidos por barras radiales y transversales. Fabricó las piezas para construir un puente en su país. Pero, además de constructor de puentes, fue un político revolucionario; se marchó a París para conocer directamente la revolución francesa y abandonó las piezas ya fabricadas, que vendió el fundidor para construir el puente de Sunderland, de 72 m de luz, terminado en 1796.

La misma solución de reproducir los tímpanos mediante un entramado se utilizó en el puente de Chepstow, construido en 1816, de cinco arcos de luces decrecientes del central a los extremos, con un entramado de arcos de distinto radio para cubrir el tímpano completo y barras radiales que completan la cuadrícula.



Fig. 2. Puente de Craigelachie sobre el río Spey. Escocia. Luz 45 m. 1815. T. Telford

El mismo año que el puente de Sunderland, 1796, se terminó el puente Builwas, sobre el río Severn, obra del escocés Thomas Telford, uno de los ingenieros más brillantes de la historia de los puentes. Este puente, igual que el de Coalbrookdale, tenía una estructura poco clara, en este caso basada en los puentes de madera, según sus propios escritos. Utilizó el esquema de los arcos biarticulados: mediante dos anillos de distinta directriz que se cruzan en el alzado del puente y, por tanto, las teóricas articulaciones están en la intersección de los anillos; en la zona de arranques, éstos se enlazan mediante una triangulación en cruces de San Andrés con montantes, pero en la zona central se enlazan mediante montantes verticales lo que no es una unión eficaz para trabajar conjuntamente. El tablero se apoya en el anillo inferior mediante tímpanos ciegos y por tanto el puente debía funcionar más como un arco tímpano que como un arco biarticulado. Lamentablemente, el puente de Builwas no se conserva; se sustituyó en 1906 por un tablero de vigas metálicas.

En 1802, Thomas Telford construyó el puente de Bonar en Escocia, un arco de 45,5 metros de luz, con una concepción de su estructura mucho más correcta que las anteriores;

fue un paso adelante fundamental en la organización de la estructura de los puentes arco metálicos. El arco está claramente definido por dos barras principales unidas por cruces de San Andrés y montantes, lo que le da una rigidez a flexión que los primeros arcos no tenían; el enlace del arco y el tablero se consigue mediante una celosía abierta de mucho menos entidad que la del arco. El puente de Bonar no se conserva porque lo destruyó una tormenta antes de 1900, pero se conservan varios de la serie que construyó Telford análogos a éste: el puente de Craigelachie sobre el río Spey, construido en 1815, con 45 metros de luz, que sigue en servicio después de la reparación hecha en 1963, donde se sustituyeron las cruces de San Andrés de fundición de la unión arco-tablero por perfiles metálicos; el puente Mythe sobre el río Severn, de 52 metros de luz, construido en 1826, que se reforzó con una losa de hormigón armado en 1923; el puente Holt Fleet, también sobre el Severn, de 45,5 metros de luz, construido en 1827; y el puente de Galton sobre un canal en Smethwick, en el área metropolitana de Manchester, con una luz de 45 metros y construido en 1829.

En 1818 se construyó el puente de Coalport, también sobre el río Severn, cerca de Coalbrookdale, un arco de 31 metros



Fig. 3. Puente de Coalport. Luz 31 m. 1818



Fig. 4. Puente de Triana en Sevilla sobre el río Guadalquivir. Luz 46,5 m. 1845. G. Steinacher, F. Bernadet

de luz, que sustituyó a otro puente metálico parecido construido en 1799, del que se aprovechó parte de los arcos; es uno de los pocos puentes de esa época que sigue en servicio, aunque con carga limitada. En este puente está claro el esquema general que se va a imponer en la mayoría de los puentes arco, compuestos de tres elementos básicos: el arco formado por una serie de anillos paralelos; el tablero, formado por un entramado de vigas, las principales situadas sobre los anillos de los arcos; y los montantes, barras verticales arriostradas entre sí que sirven de apoyo a las vigas

longitudinales del tablero sobre los anillos de los arcos. Sin embargo, esta estructura tardará años en generalizarse.

Otro puente con un esquema análogo de la estructura es el de arcos múltiples de 20 m de luz de Spa en Scarborough, Inglaterra, construido en 1827, en el que los montantes están inclinados.

El puente de Suderland construido con las piezas de Paine, y otros que se hicieron con piezas análogas, tuvieron una



Fig. 5. Puente Royal Albert sobre el río Tamar en Saltash (Inglaterra). Luz 132 m. 1859. I. Brunel

vida corta. En 1858 se sustituyó por otro arco metálico de la misma luz cuya unión entre el arco y el tablero se hizo mediante círculos de radio variable tangentes a ambos. Esta solución de enlace se utilizó con frecuencia, principalmente en los puentes que se hicieron con la patente del ingeniero francés A. Polonceau, que consistía en unos arcos tubulares hechos con dos semitubos, con alma de madera y tímpanos formados por anillos. Con este sistema se construyó el puente Carrousel de París con tres arcos de 48 m de luz, terminado en 1839, anterior al segundo de Sunderland, y el puente de Triana en Sevilla con tres arcos de 46,5 m, terminado en 1845.

En 1849, Robert Stephenson construyó el puente de Newcastle, uno de los de mayor envergadura de esa época, con una estructura innovadora; tiene 6 arcos de 38 metros de luz, con pilas de una altura considerable, porque la vía pasa a 36 metros sobre el río. El puente tiene doble tablero, uno superior sobre los arcos por donde pasa el ferrocarril y otro a la altura de los arranques de los arcos por donde pasa la carretera, que sirve de tirante. Es una magnífica obra, como la mayoría de las de Stephenson.

### 3. Puentes de hierro forjado y acero

La segunda mitad del siglo XIX se caracteriza por la construcción de grandes arcos con luces cada vez mayores,

debido en gran parte al desarrollo de las técnicas de los metales, primero por la utilización del hierro forjado mediante laminación, que sustituyó a la fundición que se había utilizado en los puentes de la primera mitad del siglo. La laminación dio lugar a las chapas y los perfiles, que fueron fundamentales en la configuración de las estructuras metálicas desde entonces; y, posteriormente, se pasó del hierro al acero, un material más resistente y de fabricación más regular.

En 1859, I. Brunel, otro de los grandes constructores de puentes, hizo el Royal Albert sobre el río Tamar, en Inglaterra, que podemos llamar de doble arco: el superior en compresión y el inferior en tracción que sirve de tirante. Ambos se unen mediante montantes que se prolongan hasta el tablero. Requiere, por ello, tres elementos: el arco, el tirante curvo y el tablero. Tiene dos vanos de 132 m de luz, que fueron los mayores arcos del mundo en su momento. El arco superior está formado por un tubo de sección elíptica y el inferior por dos cables de cadena, análogos a los de los puentes colgantes de esta época.

En Alemania, esta solución se utilizó con frecuencia y tomó el nombre de sistema Pauli porque fue el ingeniero alemán Fredrich August Von Pauli el primero que la utilizó. En el sistema Pauli, los arcos superiores e inferiores son simétricos

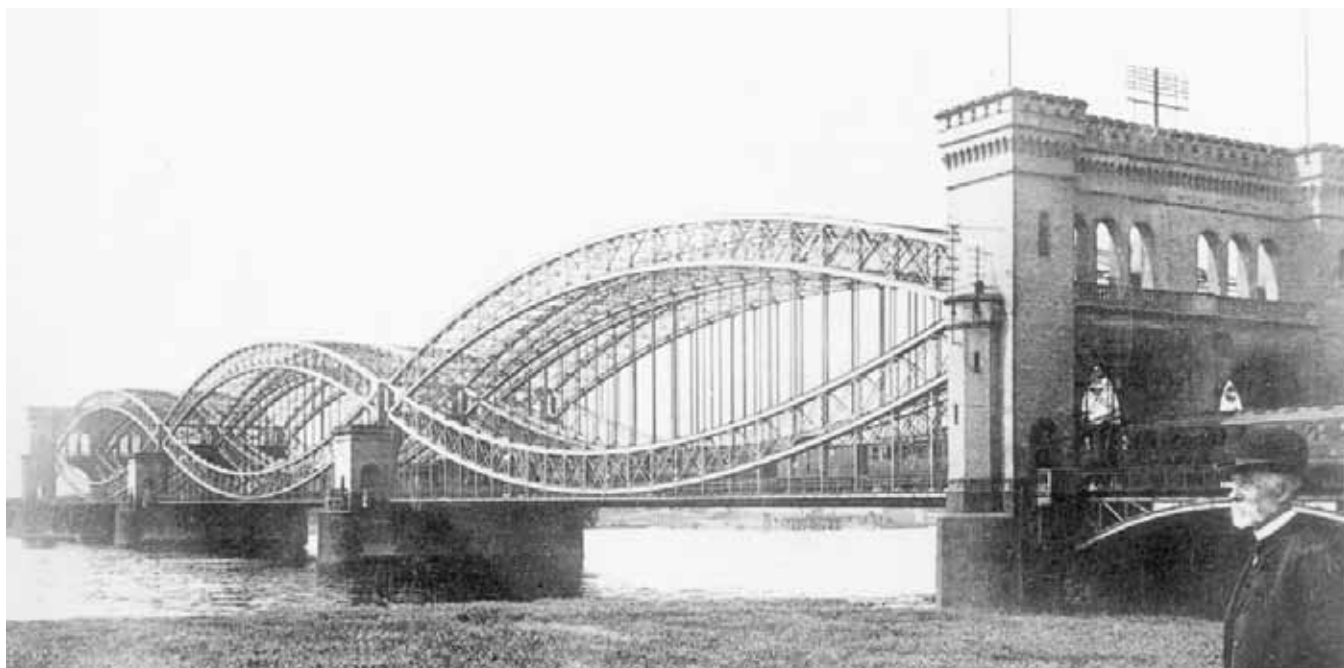


Fig. 6. Puente sobre el río Elba, en Hamburgo. Lohse

de directriz y estructura, de forma que el superior de un vano se continúa con el inferior del siguiente y viceversa, formándose así dos ondas simétricas a lo largo de todo el puente. Se llamaron también vigas lenticulares porque en muchos de ellos la conexión entre los arcos estaba triangulada; es un puente frontera entre los arcos y las vigas. Pauli construyó con este sistema el puente de ferrocarril de Maguncia-Sur sobre el Rin con cuatro vanos de 105 metros de luz. Los más conocidos y mejores de este tipo son los de Hamburgo sobre el Elba; el primero tiene cuatro vanos de 99 metros, construido por el ingeniero Lohse en 1872, con arcos de estructura triangulada.

Otro puente conocido de este tipo es el de la calle Smithfield en Pittsburg sobre el río Monongahela (Estados Unidos), con dos arcos de 109 m de luz, proyecto de G. Lindenthal, terminado en 1883.

El puente de la ciudad de San Luis sobre el río Mississippi para carretera y ferrocarril, proyectado y construido por J. B. Eads y terminado en 1874 –después de siete años de obra–, es uno de los más importantes de la historia del puente por diversas razones: en primer lugar, por su envergadura ya que tiene tres arcos que se convirtieron en los mayores del mundo; en segundo lugar, por su buen proyecto porque sigue

siendo uno de los mejores puentes de todos los tiempos; y, en tercer lugar, por sus importantes innovaciones técnicas. Tiene tres arcos de 152+157+152 metros de luz formados por barras tubulares unidas por una triangulación Warren. Es uno de los primeros puentes donde se utilizó el acero, pero sólo en la estructura resistente principal, es decir, en los arcos, que están formados por tubos de acero fundido; el resto es de hierro forjado. Son arcos de canto constante y están empotrados en la fábrica de las pilas y de los estribos.

Un puente sobre un río de la envergadura del Mississippi a la altura de la ciudad de San Luis era algo que no se había construido hasta entonces y, por ello, planteó serias dificultades.

La primera de ellas fue la cimentación porque era necesario llegar a 42 metros de profundidad en el estribo este. Para ello, se utilizaron campanas de aire comprimido, un sistema para hacer cimentaciones profundas en presencia de agua que se había empezado a utilizar pocos años antes en Europa, pero nunca se había llegado a las profundidades del puente de San Luis. La presión del aire en las cámaras causó la muerte de varios obreros porque no se tenía idea del efecto que produce en el cuerpo humano una presión tan grande.

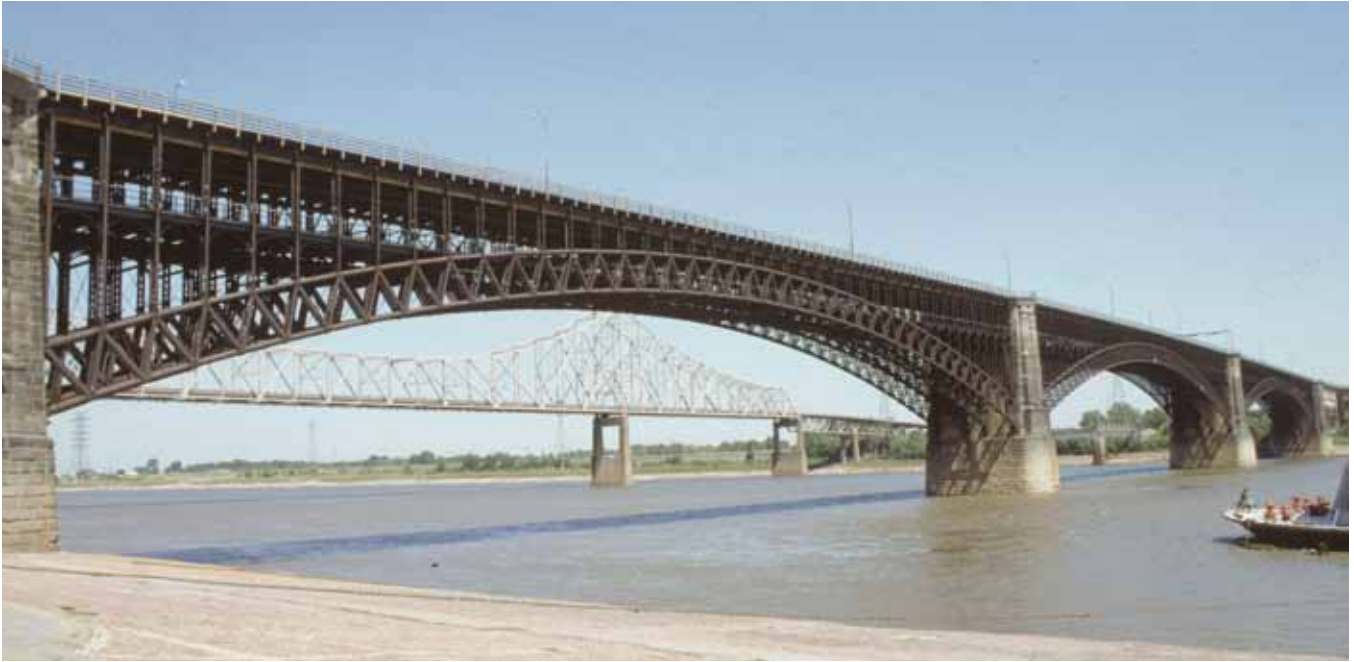


Fig. 7. Puente de San Luis sobre el río Misissippi (Estados Unidos). Luz 157 m. 1874. J. Eads

La segunda dificultad se planteó en la construcción de los arcos. La profundidad del agua y de las cimentaciones hacía imposible montar una cimbra en medio del río Mississippi con apoyos intermedios. Por ello, Eads inventó un nuevo sistema de construcción que se ha convertido en uno de los fundamentales, o mejor podemos decir el fundamental, salvo en los puentes colgantes, para construir puentes de grandes luces. Es el primero donde se utilizó el sistema de construcción por avance en voladizos sucesivos inventado por Eads. Se construyeron por este sistema los semiarcos, avanzando simétricamente desde las pilas y en una sola dirección desde los estribos. Como la sección resistente de los arcos no tenía la suficiente capacidad para soportar el peso propio en voladizo de los semiarcos, se atirantaron provisionalmente desde unas torres de madera situadas sobre las pilas y los estribos. En las pilas centrales se avanzaba simétricamente a ambos lados y en los estribos, los tirantes de compensación se anclaban a las cimentaciones. El atirantamiento se hacía en dos fases: en la primera se atirantaban los semiarcos desde las torres situadas sobre las pilas o sobre los estribos y, en la segunda, se situaba una nueva torre provisional sobre el extremo del último tirante y, desde ella, se efectuaba un nuevo atirantamiento que permitía llegar a la clave y cerrar el arco. El puente de San Luis se

llamó luego Eads Bridge en honor a su autor; se terminó en 1874 y fueron los arcos de mayor luz del mundo porque superaron los del Royal Albert de Brunel.

El puente de San Luis es el mayor y más conocido de los puentes de arcos múltiples, una solución que se utilizó con mucha frecuencia antes y después de él pero, en general, con luces menores que los de los puentes con un solo arco. Esta solución es clásica en las ciudades situadas en las orillas de grandes ríos. Buenos ejemplos de estos puentes son los de Lyon sobre el Ródano: el puente de La Universidad, construido en 1903, con tres arcos, el mayor de 72,5 metros de luz; y el de Lafayette, construido en 1900. También hubo muchos puentes de este tipo en las ciudades del Rin construidos a finales del siglo XIX y principios del siglo XX pero la mayoría, desgraciadamente, se destruyeron en la Segunda Guerra Mundial. Se conserva, reconstruido, el de Maguncia, construido inicialmente en 1885 y ensanchado en 1933; tiene cinco arcos, el mayor de 103 metros de luz; se destruyó en la Segunda Guerra Mundial y se reconstruyó con la forma del puente original. El de los Nibelungos en Worms, construido en 1900, tenía tres arcos, el mayor de 105 metros; se destruyó en la Segunda Guerra Mundial y se reconstruyó con un puente viga de hormigón.

+ desarrollo sostenible

# Más que agua

Talento, conocimiento y compromiso.  
Aportamos respuestas adecuadas  
para una gestión más eficiente.  
Compartimos conocimiento  
y generamos innovación.  
Trabajamos por un futuro basado  
en el compromiso y la cooperación.

[www.aqualogy.net](http://www.aqualogy.net)





**AQVALOGY**  
Where Water Lives

SOLUCIONES INTEGRADAS  
DEL AGUA PARA UN  
DESARROLLO SOSTENIBLE

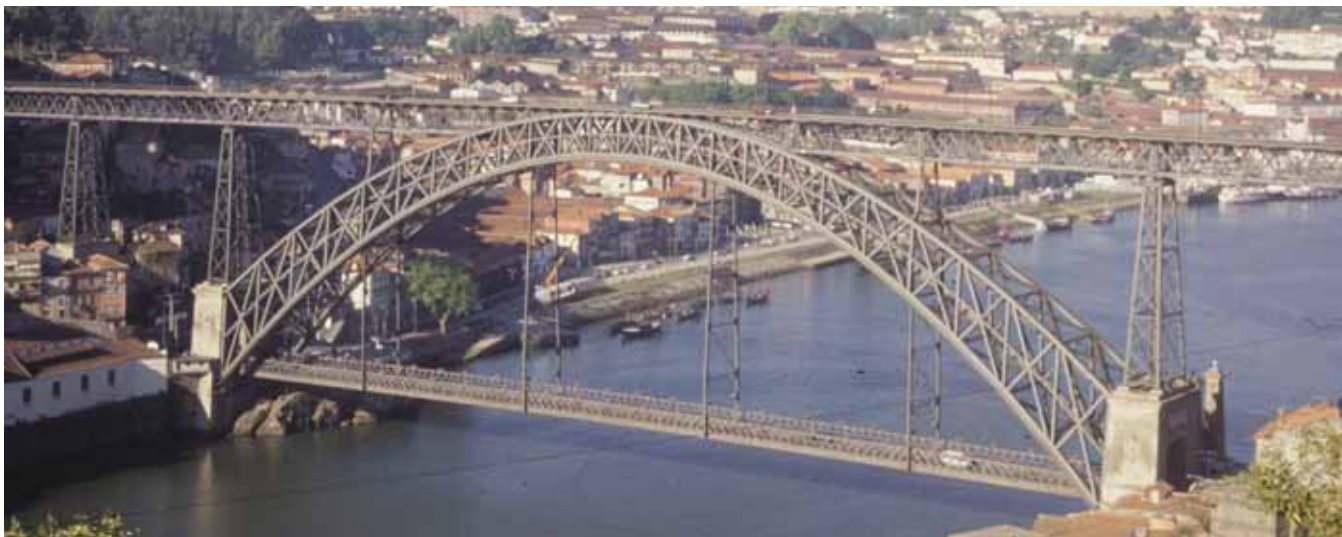


Fig. 8. Puente de María Pía sobre el río Duero, en Oporto. Luz 160 m. 1877. G. Eiffel, T. Seygrig

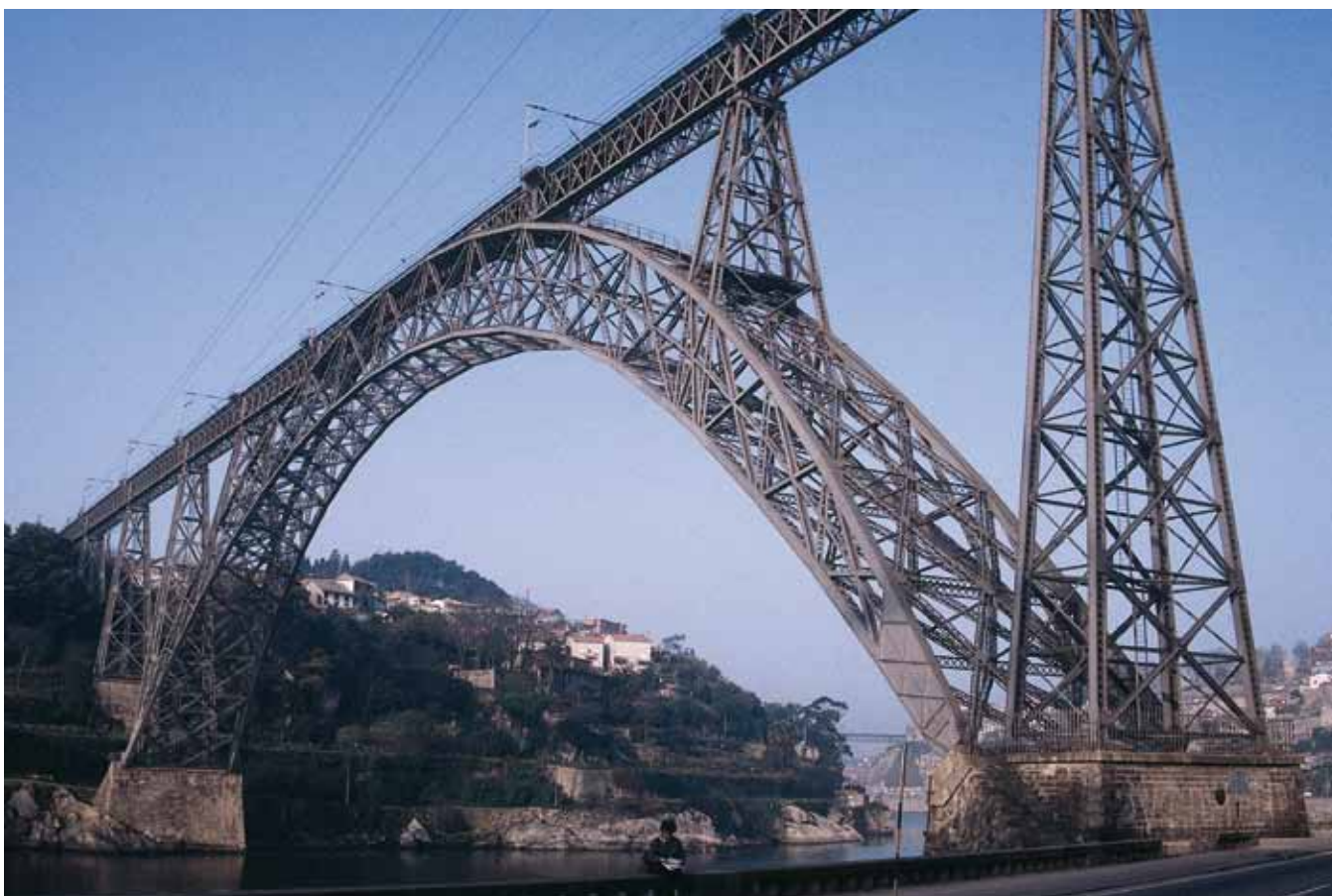


Fig. 9. Viaducto de Garabit sobre la Thuyère (Francia). Luz 166 m. 1884. G. Eiffel, L. Boyer, M. Koechlin



Fig. 10. Puente de Luis I sobre el río Duero, en Oporto. Luz 174,5 m. 1885. T. Seyrig

Los puentes del Rin, igual que los del Niágara, han tenido una especial significación en la historia de los puentes, desde el romano de madera de Julio César hasta los de la segunda mitad del siglo XX, que en su mayoría son reconstrucciones de los puentes hundidos durante la guerra. En el Rin se iniciaron los puentes atirantados y su primer desarrollo se produjo casi exclusivamente en este río.

Tres años después de terminarse el puente de San Luis, Gustave Eiffel construyó el puente de María Pía sobre el río Duero, en Oporto, para la Compañía Real de Ferrocarriles Portugueses, que ganó en un concurso internacional; el proyecto lo hizo en colaboración con Théophile Seyrig, su socio y jefe de la oficina de proyectos de la empresa Eiffel & Cie. Es un arco biarticulado peraltado, con una variación de canto muy acusada, máximo en clave y mínimo en arranques, con forma de luna en cuarto creciente poco después de la luna nueva, como corresponde a un arco biarticulado. Tiene 160 metros de luz –tres más que el de San Luis– y, por esta razón, fue nuevo récord de luz. Se construyó avanzando los semiarcos por voladizos sucesivos atirantados, de la misma forma que el de San Luis; el atirantamiento se hizo desde las pilas laterales del tablero y, por ello, los medios auxiliares para la construcción se redujeron exclusivamente a los tirantes.

El éxito del puente de María Pía llevó al ingeniero francés León Boyer a proponer una variante de trazado en un tramo de la línea ferroviaria Marvejols-Neussargues, que reducía la longitud del trayecto pero obligaba a construir un viaduc-

to sobre el valle de la Thruyère de dimensiones análogas al de Oporto. Realizó un anteproyecto inspirado en el puente del Duero, con un arco biarticulado de la misma forma, y se puso en contacto con Eiffel para estudiar su viabilidad, desarrollar el proyecto y construirlo. Eiffel aceptó el anteproyecto de Boyer y se hizo cargo del puente. Para desarrollar el proyecto, contrató al ingeniero Maurice Koechlin, porque T. Seyrig ya no trabajaba con él. El viaducto de Garabit tiene 166 metros de luz y, por tanto, fue también el mayor del mundo; se construyó de la misma forma que el puente de María Pía, por voladizos sucesivos atirantados; una vez terminado el arco, el tablero se construyó en dos mitades sobre el terreno, una a cada lado del puente, y se trasladaron a su posición definitiva empujándolas hasta unir las en clave. Se terminó en 1884.

En 1885, T. Seyrig proyectó el puente de Luis I sobre el río Duero, en Oporto, de 174,5 metros de luz, que ganó de nuevo en un concurso internacional, igual que el de María Pía, pero en este caso él sólo porque ya no trabajaba con Eiffel. Es un puente de carretera y ferrocarril con doble tablero, uno superior sobre el arco y otro inferior colgado de él. Fue el arco más grande del mundo en su momento y sigue siendo el mayor de los construidos con hierro forjado porque a partir de entonces la mayoría de los grandes puentes se hicieron con acero. Es un arco biarticulado y triangulado igual que María Pía y Garabit, pero con una configuración del arco diferente, motivada por su proceso de construcción. Tiene también canto variable, pero en sentido inverso a los anteriores por-



Fig. 11. Puente de Alejandro III sobre el Sena, en París. Luz 107 m. 1900. J. Resal, M. Alby

que es mayor en los arranques que en clave, contrariamente a lo que requiere el arco biarticulado. Las articulaciones definitivas están en los extremos del cordón inferior, quedando el cordón superior libre. Este sistema se debe a que, inicialmente, el arranque se empotra provisionalmente en el estribo de piedra para iniciar la construcción en voladizo libre, que posteriormente se atiranta. Como veremos, esta configuración del arco se utilizó en los siguientes grandes arcos biarticulados triangulados que se construyeron.

En 1898 se construyó el puente entre Niágara y Clifton, el Honeymoon Bridge, con proyecto de Leffert L. Buck; es uno de los innumerables puentes construidos sobre el río Niágara que han tenido especial significación en la historia de los puentes, tanto los colgantes como los cantiléver y los arcos; se han ido sustituyendo sucesivamente y, por ello, la mayoría han desaparecido. El Honeymoon Bridge era un arco biarticulado de 256 metros de luz, triangulado de canto constante, que se construyó atirantándolo, sin empotramiento provisional en arranques. Sustituyó a un puente colgante situado en el mismo lugar. También es de L. Buck otro arco sobre el río Niágara, de 168 metros de luz, que sustituyó al puente colgante de ferrocarril de Roebling; se construyó en 1897, un año antes que el Honeymoon Bridge, y sigue todavía en servicio. El Honeymoon Bridge superó en 69 metros al mayor arco construido hasta entonces, el puente entre Bonn y Beuel sobre el Rin, de 187 metros de luz, terminado el mismo año; fue, por tanto, el mayor arco del siglo XIX. Estuvo

en servicio hasta que se hundió, en 1938, a causa de una concentración de hielo en el río, que llegó a la altura de los arranques del arco, y su empuje hizo ceder las articulaciones que arrastraron a todo el puente. Se sustituyó por un nuevo arco de 290 metros de luz, biempotrado, el Rainbow Bridge, terminado en 1941, proyectado por Wadell y Hardesty.

Son clásicos de finales del siglo XIX y principios del XX, los arcos triarticulados rebajados que se construyeron en muchas ciudades. Su rebajamiento hace difícil, en muchos casos, saber si se trata de arcos o vigas continuas; éste es el caso del puente de Passy (actualmente llamado de Bir-Hakein) sobre el Sena, en París, con un rebajamiento parecido al de Alejandro III, también sobre el Sena en París, pero el primero es una viga continua y el segundo un arco.

El puente Alejandro III sobre el Sena, uno de los clásicos de París, es un arco triarticulado de 107 m de luz, extraordinariamente rebajado; en este puente es muy peculiar su recargada decoración, hecha con fundición. Las dovelas que forman los arcos son de acero fundido, yuxtapuestas a tope como en un puente de piedra, y unidas mediante tornillos pasantes que le dan al arco capacidad de soportar flexiones. La estructura del arco triarticulado se refleja en su canto, porque los semiarcos tienen una ligera variación desde las articulaciones extrema y de clave, a su punto medio, donde el canto es máximo. El proyecto es de los ingenieros Jean Resal y M. Alby; los arquitectos Cassien-Bernard y Caussin añadieron la decoración



Fig. 12. Viaducto de Viaur sobre el río Viaur (Francia). Luz 220 m. 1902. P. Bodin



Fig. 13. Puente sobre la Hell Gate en Nueva York. Luz 298 m. 1917. G. Lindenthal



Fig. 14. Puente de Sydney (Australia). Luz 503 m. 1932. R. Freeman

a posteriori. Lo construyeron dos de las empresas francesas más potentes en la construcción metálica: Fives-Lille y Schneider, y se terminó en 1900. Para montar el puente, se utilizó una viga metálica superior, desde donde se colgaron las dovelas hasta que se cerró el arco en clave.

#### IV. Los grandes arcos del siglo XX

En 1902 se terminó en Francia el viaducto de Viaur sobre el río del mismo nombre, un arco de 220 metros de luz en la línea ferroviaria de Rodez a Albi, una de las obras más impresionantes de la historia del puente. Lo ganó en concurso la sociedad Batignolles, con proyecto de Paul Bodin, jefe de estudios de esa sociedad. Es un arco triarticulado, pero el conjunto de la estructura tiene un funcionamiento intermedio entre el arco y el puente cantiléver porque está formado por dos dobles ménsulas trianguladas casi simétricas que parten de los apoyos articulados. Estas dobles ménsulas se unen con una articulación en la clave del vano principal y en los laterales se enlazan con los estribos mediante unos tramos

simplemente apoyados. Es una estructura isostática, y la compensación, casi perfecta, de las dobles ménsulas anula prácticamente el efecto arco para peso propio. Por esta razón se ha llamado arco equilibrado a este tipo de estructura.

El viaducto de Viaur se construyó por voladizos sucesivos libres sin ningún atirantamiento, utilizando el gran canto que genera el conjunto arco-tablero unidos por la triangulación. Este viaducto creó escuela y se hicieron muchos puentes análogos a él; de ello es buen ejemplo un puente ferroviario e Costa Rica construido en 1910. Después del concurso del viaducto de Viaur, Jean Resal proyectó el puente de Mirabeau sobre el Sena, en París, un arco extraordinariamente rebajado de 93 metros de luz, con la misma estructura de arco equilibrado. Se terminó en 1896, antes que el de Viaur.

En 1917 se terminó en Nueva York el puente de la Hell Gate sobre el East River, un arco biarticulado de 298 metros de luz para ferrocarril que fue, durante muchos años, el mayor



Fig. 15. Puente de Bayona sobre el Kill Van Kull, en Nueva York. Luz 504 m. 1932. O. Ammann

del mundo, proyecto de Gustav Lindenthal. En el proyecto del puente de la Hell Gate intervinieron como ayudantes de Lindenthal, Othmar H. Ammann y D. B. Steinman. Es un arco triangulado de gran canto, con tablero intermedio, y con una configuración del arco análoga a la del puente Luis I, en Oporto, pero con mayor variación de canto, que llega a invertir la curvatura del trasdós, creciendo hacia los estribos de piedra que componen bien el puente. Sin embargo, su misión resistente se limita a la construcción del arco porque sirven de anclaje provisional del cordón superior que, una vez cerrado el arco, se suelta quedando, igual que en el puente de Seyrig, las articulaciones definitivas en los extremos del cordón del intradós.

Los grandes estribos de piedra utilizados en el puente Hell Gate, y en otros grandes arcos metálicos de tablero inferior o intermedio, son realmente elementos de composición para rematar el arco; esto se hace evidente por su ausencia en el puente de Bayona sobre el Kill Van Kull en Nueva York, un

arco de 504 metros de luz, cuyos estribos nunca se forraron de piedra como estaba previsto en el proyecto y, por ello, el puente se queda débil en sus extremos, falta de estribación.

El arco de la Hell Gate se construyó igual que el de Luis I, avanzando los semiarcos por voladizos sucesivos empotrados. Se añadió un tirante provisional en el primer tramo de cada semiarco. El resto se hizo en voladizo libre. Se cerró la clave mediante una articulación provisional en el cordón inferior del arco, dejando libre el superior; luego se soltaron los tirantes y el empotramiento provisional, de forma que quedó un arco triarticulado. Al estar las tres articulaciones en el cordón del intradós, el peso propio del arco se resiste únicamente por ese cordón; el cordón superior y la triangulación, únicamente colaboran para soportar las cargas móviles del ferrocarril. Posteriormente, se montó el tablero, colgándolo del arco mediante péndolas y, una vez completo el puente, se bloqueó la articulación de clave, quedando el arco biarticulado.



Fig. 16. Puente de la New River Gorge (Estados Unidos). Luz 518 m. 1976.

En 1925 se iniciaron las obras del puente de Sydney, una vieja aspiración de la ciudad, que fue objeto de muchos estudios previos. Se adjudicó a la empresa inglesa Dorman, Long and Company con proyecto de Ralph Freeman. Es cuantitativamente mayor que el Hell Gate, porque se pasa de 298 a 503 metros de luz, pero cualitativamente hay poca diferencia entre ellos; su forma, su estructura y su proceso de construcción son idénticos. El empotramiento provisional en arranques del cordón superior del arco se hizo mediante unos tirantes alojados en una galería semicircular excavada en la roca, solución que se había utilizado en varios puentes colgantes. La única diferencia con el Hell Gate es que los semiarcos se construyeron por voladizos sucesivos libres hasta clave, sin necesidad de ningún atirantamiento provisional, gracias al gran canto de la triangulación del arco. Se terminó en 1932, pero con sus 503 metros de luz no llegó a ser nunca el arco mayor del mundo porque el puente de Bayona sobre el Kill Van Kull en Nueva York tiene un metro más de luz; se empezó a construir cinco años más tarde que el de Sydney y se terminó pocos meses antes.

El puente de Bayona es proyecto de Othmar H. Ammann, ingeniero suizo emigrado a Estados Unidos, que proyectó también los grandes puentes colgantes de Nueva York. Es un arco biarticulado con tablero intermedio y con la misma estructura del Hell Gate y del de Sydney, es decir, con arti-

culaciones en los extremos de los cordones del intradós del arco, pero formalmente difiere bastante de los anteriores. El arco tiene poca variación de canto, sin contracurva en los extremos del trasdós. Como hemos dicho, los estribos del arco son metálicos y estaba previsto forrarlos de piedra, pero no tenían torres como los anteriores. A pesar de la debilidad de los estribos, este puente nos parece un paso adelante respecto al Hell Gate y al de Sydney. Se construyó mediante apoyos provisionales intermedios y entre ellos se avanzó por voladizos sucesivos.

A partir del puente de Bayona, los arcos metálicos de gran luz se han utilizado en contadas ocasiones, pero han seguido siendo una solución adecuada en determinados casos y, por eso, nunca se han abandonado.

En 1976 se terminó el puente de la New River Gorge en Estados Unidos de 518 m de luz. Es un arco biarticulado de tablero superior con una altura sobre el fondo del valle de 276 m. Es triangulado de canto constante con las articulaciones en el eje de la sección del arco. Se construyó por voladizos atirantados como los anteriores, pero sin empotramiento provisional en arranques, igual que los de Eiffel. Las piezas del arco se montaron mediante un blondin de 1.067 m de luz. El puente de la New River Gorge es el arco de mayor luz del mundo del siglo XX. **ROP**