



La revista de los
Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos

3561 ENERO 2015

REVISTA DE
OBRAS PÚBLICAS

ROP



MONOGRÁFICO

Puentes arco (I). Historia de los puentes arco

Coordinado por Conchita Lucas Serrano

- INGENIERÍA DE PRODUCCIÓN
- FABRICACIÓN
- LOGÍSTICA Y TRANSPORTE
- MONTAJE
- CERTIFICACIÓN EN SISTEMAS DE GESTIÓN Y CALIDAD



CALLFER SA
ESTRUCTURAS METÁLICAS

*50 años de experiencia,
más de 100 años de tradición familiar*



Torre Titania. Madrid



Puente de San Vicente de la Sonsierra



Estadio Santiago Bernabéu



THE CANADIAN
WELDING BUREAU

CALLFER, S.A.

C/ Metalúrgicos, 1. 28942 Fuenlabrada. Madrid. España. Tel.: +34 91 645 33 00 · Fax: +34 91 645 00 21 www.callfersa.es

PRESENTACIÓN

HISTORIA DE LOS PUENTES ARCO

-
- 7 **Los puentes arco de época romana**
Manuel Durán
-
- 19 **La segunda juventud de los puentes arco de fábrica:
s. XVII, XVIII Y XIX**
José Antonio Martín-Caro Álamo
-
- 33 **Estructura y forma de los puentes arco metálicos**
Leonardo Fernández Troyano
-
- 49 **Los puentes arco metálicos modernos**
Marcos Jesús Pantaleón Prieto y Óscar Ramón Ramos Gutiérrez
-
- 65 **Los primeros arcos de hormigón**
Javier Manterola Armisén
-
- 89 **El desarrollo de los puentes arco de hormigón**
Javier Manterola Armisén



**La revista decana de la
prensa española no diaria**

Director

Antonio Papell

Redactora Jefe

Paula Muñoz

Fotografía

Juan Carlos Gárgoles

Publicidad

MM Mass Media
Hermosilla 64 6ºB
T. 91 431 08 39

Imprime

Gráficas 82

Depósito legal

M-156-1958

ISSN

0034-8619

ISSN electrónico

1695-4408

ROP en internet

<http://ropdigital.ciccp.es>

Suscripciones

[http://ropdigital.ciccp.es/
suscripcion.php](http://ropdigital.ciccp.es/suscripcion.php)
suscripcionesrop@ciccp.es
T. 91 308 19 88

Edita

Colegio de Ingenieros de
Caminos, Canales y Puertos
Calle Almagro 42
28010 - Madrid

Consejo de Administración

Presidente

Miguel Aguiló Alonso

Vocales

Juan A. Santamera Sánchez
José Manuel Loureda Mantiñán
José Javier Díez Roncero
Juan Guillamón Álvarez
Luis Berga Casafont
Roque Gistau Gistau
Benjamín Suárez Arroyo
José Antonio Revilla Cortezón
Francisco Martín Carrasco
Ramiro Aurín Lopera

Comité Editorial

Pepa Cassinello Plaza
Vicente Esteban Chapapriá
Jesús Gómez Hermoso
Conchita Lucas Serrano
Antonio Serrano Rodríguez

Foto de portada

Viaducto sobre el río Almonte



Desde el principio de los tiempos, el hombre ha sentido la necesidad de saltar obstáculos naturales y crear espacios diáfanos. Cuando abandonaron la madera y empezaron a construir con piedra para que sus obras fueran duraderas, se dieron cuenta de que la forma curva constituía un medio resistente que les abría un mundo de posibilidades. Aunque los etruscos figuran en la historia de la humanidad como inventores del arco y los romanos quienes generalizaron su uso, fue en la antigua Mesopotamia donde se construyeron las primeras bóvedas, constituyendo éste el primer empleo de la forma curva.

Durante muchos, muchos siglos, el arco ha sido la única forma de salvar un obstáculo importante, y los puentes de esta tipología los únicos que existían. Los primeros arcos, los de fábrica, llevan conviviendo con el hombre casi desde siempre, y eso ha hecho que este tipo de puentes y, por extensión, la geometría de arco formen parte del paisaje que nos rodea y los entendamos como algo natural, algo que pertenece a nuestra historia.

Y la razón de que el arco se emplee desde las primeras civilizaciones reside en que es un elemento estructural que funciona por forma, o lo que es lo mismo, el arco es la línea por la que viajan naturalmente las cargas desde su punto de aplicación hasta los apoyos (antifunicular). Esto significa que las acciones uniformemente repartidas se transmiten a los cimientos produciendo esfuerzos casi exclusivamente de compresión, y son las cargas no uniformes (puntuales y sobrecargas) las únicas que generan en el arco esfuerzos de flexión.

Y fue este hecho, la existencia casi exclusivamente de compresiones en el funcionamiento de un arco, lo que llevó al

hombre a usarlo desde el siglo VII a.C. hasta bien entrado el siglo XVIII d.C., pues la piedra, que era el material de construcción esencial para obras duraderas, funciona estupendamente a compresión, y la configuración en arco permite construir un puente con pequeñas piezas sin necesidad de elementos de unión, más allá del mero contacto entre ellas. El relleno de tierras de las bóvedas clásicas de los puentes de fábrica, además de resolver el problema de la rasante, confiere el peso necesario para introducir en el arco de piedra un estado de compresión compuesta, casi independiente de la sobrecarga actuante, que sí genera flexión en un arco, al no ser una carga uniformemente distribuida.

Este funcionamiento tan “inteligente” del arco hace que sea ésta una configuración muy adecuada para puentes de hormigón, pues la gran virtud de este material, que es soportar muy bien las compresiones, se traduce en un ahorro directo de materiales, razón por la cual se ha empleado mucho, y todavía hoy se usa de manera extensiva. Si el arco está bien diseñado, la ausencia de grandes esfuerzos de flexión conduce a cuantías de armadura relativamente pequeñas; prueba de ello es el puente Villeneuve-sur-Lot, de hormigón en masa y 98 m de luz, proyectado por E. Freyssinet y construido en 1919.

Pero este funcionamiento por forma, que tiene múltiples ventajas, también tiene un gran inconveniente: la construcción, pues al ser una estructura que trabaja gracias a su geometría final, el arco no puede funcionar como tal hasta que está terminado. Esto ha exigido desarrollar sistemas constructivos complejos, con notables medios auxiliares (cimbras, pilas provisionales, atirantamientos, etc.) que sustenten el arco durante su construcción. Como alternativa a estos procedimientos de ejecución existe otra tendencia, que está ganando cada vez más importancia y reduce en cierta manera el problema de la construcción, y que consiste en incorporar los medios auxiliares a la estructura final del arco, como ya hizo Torroja en el viaducto de Martín Gil, en el que la cimbra rígida formaba parte de la estructura del arco, y que constituye la base del método denominado actualmente por sus siglas en inglés CFST (tubos metálicos rellenos de hormigón). De esta forma, el impacto económico de los medios auxiliares se reduce drásticamente y se facilita la construcción de la estructura de manera significativa.

CUANDO LOS TÚNELES ESTÁN
IMPERMEABILIZADOS DE FORMA
PERMANENTE:
THAT'S BUILDING TRUST.





El problema de la entidad de los medios constructivos necesarios se reduce también al construir con metal, y prueba de ello es el gran número de puentes metálicos que se han construido a lo largo de la historia. Gracias a la ligereza de los elementos resistentes, primero la fundición y el hierro, y posteriormente el acero, han dado lugar a grandes estructuras, que han llevado a este tipo de puentes a luces próximas a las que habitualmente se salvaban con puentes atirantados. Valga como ejemplo el puente chino de Chaotianmen, puente arco de mayor luz en el mundo que, con sus 552 m de luz, supera a varios puentes atirantados bien conocidos, como el de Oresund entre Suecia y Dinamarca con 490 m de luz, o el de Barrios de Luna, que fue récord del mundo entre 1983 y 1986 con su vano central de 440 m.

La tecnología del puente arco ha evolucionado mucho a lo largo de la historia, como se pondrá de manifiesto en este volumen, pero el motivo de que la ROP dedique este número monográfico a los puentes arco es celebrar la construcción de dos imponentes estructuras que se están ejecutando en nuestro país, y que sin duda marcan un hito en los puentes de esta tipología: el viaducto sobre el río Almonte y el viaducto sobre el río Tajo, ambos en el embalse de Alcántara, y sobre los que circulará el ferrocarril de alta velocidad que conecta Madrid con Extremadura. La primera de ellas, el viaducto sobre el río Almonte, con 384 m de luz, constituye el puente-arco de hormigón para ferrocarril más grande del mundo, y el tercero de mayor luz si no se hace distinción del tipo de tráfico. El viaducto sobre el río Tajo, con un arco algo menor, de 324 m de luz, se terminará antes, y ostentará estos récords durante algunos meses.

Como homenaje a estas dos estructuras tan sobresalientes se ha diseñado este doble número monográfico (enero y febrero de 2015), en el que en el primer volumen se hace un recorrido histórico por los puentes arco, empezando por los puentes romanos y los de fábrica, pasando después a los arcos metálicos, los primeros de celosía, y los más modernos, para terminar con los puentes arco de hormigón, tema que se ha dividido en dos partes por la gran extensión del contenido. El segundo volumen

está dividido en tres bloques: en el primero se abordan aspectos relacionados con el diseño, la construcción y el mantenimiento de los puentes arco en la actualidad, con un artículo sobre las mayores realizaciones que existen en el mundo de este tipo de puentes. El segundo bloque está dedicado a las realizaciones y se incluyen en él tres artículos, dos sobre las imponentes estructuras ya comentadas, el viaducto sobre el río Almonte y el viaducto sobre el río Tajo, y un tercero en el que se describe la actuación sobre uno de los arcos más importantes de nuestro país, el Puente de Pino (Puente de Requejo, según su nombre oficial), diseñado por Eugenio Ribera en 1897 e inaugurado en 1914, que ha sido reparado recientemente por problemas de corrosión, pues constituye un magnífico ejemplo de las labores que hay que realizar en España para conservar el extenso patrimonio de puentes existentes. El segundo volumen se cierra con un directorio donde aparecen los puentes arco más importantes de nuestro país. Es gratificante comprobar la calidad y extensión del Patrimonio que hemos ido construyendo a lo largo de los años. De hecho, por cuestiones de espacio, hemos tenido que incluir exclusivamente los puentes de más de 100 m de luz, dejando fuera pasarelas y grandes estructuras pero con luces menores. Pido disculpas, por adelantado, a todos los afectados.

No quiero terminar esta breve introducción sin agradecer la colaboración a los autores de los artículos de este número. Cuando hubo que diseñar el contenido del monográfico, nunca imaginé que podríamos llegar a contar con el elenco de personalidades que aquí se han reunido. Han participado los ingenieros españoles, proyectistas, constructores y conservadores, responsables de la mayor parte de los grandes puentes arco que existen en nuestro país, verdaderos especialistas de rango internacional, y a los que quiero agradecer especialmente su amable disposición a colaborar en este número, pues desde el primer momento se mostraron entusiasmados con la idea, y han dedicado tiempo y esfuerzo a escribir los magníficos textos que se incluyen en estos dos volúmenes.

Conchita Lucas Serrano
Coordinadora

Los puentes arco de época romana



Manuel Durán

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

E.I.C. Durán S.L.

Resumen

A lo largo de este pequeño artículo se expone el gran invento constructivo que en la historia de la humanidad significó el descubrimiento de la bóveda como un eficaz sistema de generación de un espacio bajo ella, que servía tanto para realizar la cubrición de un edificio como salvar un obstáculo y permitir el paso sobre ella. Desde un posible origen mesopotámico y la propagación de su técnica constructiva por todo el Oriente Próximo, el arco llegó a los griegos y posteriormente a los romanos que supieron llevarla a las cotas más altas de eficacia y, sin duda, de belleza. El arco, la bóveda y la cúpula construidas por Roma fueron un logro excepcional que marca un hito en la historia de la construcción.

Palabras clave

Arco, bóveda, puente, obra pública, romano, fábrica, identificación

Abstract

This brief article pays homage to the great invention in the history of humanity implied by the discovery of the vault as an effective means of generating a space below the same and serving both to cover a building and to span and provide passage over gaps and barriers. Supposedly initiated in Mesopotamia and technically developed throughout the Near East, the arch was brought to the Greeks and then to the Romans who took it up to its highest level of efficiency and beauty. The arch, vault and dome built by the Romans were exceptional feats that serve as a landmark in the history of building.

Keywords

Arch, vault, bridge, public works, Roman, masonry, identification

Roma impulsó, a lo largo de su historia, la construcción de numerosas obras públicas que no sólo fueron fundamentales para el desarrollo y mantenimiento de la vasta y compleja administración que impuso en un extenso territorio, sino que cumplieron con el objetivo de convertirlas en los símbolos del orgullo y grandeza del pueblo romano.

Una de las obras públicas más notables fueron los caminos, construidos para que los desplazamientos fuesen rápidos, confortables y seguros. La apropiada elección de los corredores territoriales les permitió llevarlos en derecha, con reducidas pendientes a su paso por los puentes de montaña para su mayor comodidad. Eran caminos anchos, bien drenados, elevados del terreno circundante y con una plataforma formada por varias capas granulares –similares a las base de las modernas carreteras y autovías– extendidas y compactadas sobre un cimiento de piedras de buen tamaño.

No quedaron atrás la calidad y eficacia constructiva de los puentes edificados por todo el Imperio, que tuvieron un gran reconocimiento y admiración desde el mismo momento de su construcción. Se valoraba su utilidad para cruzar un río y eliminar el riesgo que suponía hacerlo a pie o en barca, además de ver en ellos la grandeza y el poder de Roma. Han llegado hasta la actualidad como paradigmas de una obra bien construida y resistente.

Las bases técnico-constructivas que emplearon en su construcción les sirvieron para desarrollar diversas tipologías y eficaces procedimientos que hicieron posible que un buen número de puentes se hayan conservado en buen estado, como los puentes de Alcántara, Salamanca o Bibei, por citar sólo algunos de la antigua Hispania. Esta aspiración a que durasen por toda la eternidad, al igual que su imperio, está reflejada en la frase ‘*pontem perpetui mansurum in saecula mundi*’, “puente destinado a durar por siempre en los siglos del mundo”, de un texto copiado



Fig. 1. Foto de Ponte Bibei realizada por Laurent



Fig. 2. Bóvedas de los almacenes del Ramesseum en Tebas, Egipto (Foto M. Durán)

en tiempos de Isabel II de otro anterior y grabado en unas placas de mármol en el templo del puente.

Las técnicas constructivas de los puentes, que destacan por la soberbia utilización de las bóvedas de dovelas pétreas, fueron aprendidas de los constructores o arquitectos griegos que ya manejaban estos procedimientos con pericia en la época helenística (siglo III a.C.). Es muy probable que, a su vez, las aprendieran de los países de Oriente Próximo y Egipto gracias a los contactos que mantuvieron desde comienzos del primer milenio antes de Cristo.

El arco pudo haberse desarrollado por primera vez en Mesopotamia ya que es en esta zona de los valles de los ríos Tigris y Éufrates donde se han hallado los restos más antiguos de bóvedas de principios del III milenio antes de Cristo. Es posible que esta técnica constructiva derivase a Egipto, o bien que se generase de forma autónoma pues también se conservan arcos y bóvedas construidos con adobes de principios del III milenio a.C., por ejemplo las bóvedas de algunas tumbas de Abydos pertenecientes a la I y II dinastía (3137-2778 a.C.). Son muy conocidas las bóvedas de adobes de

los almacenes del templo construido por el faraón Ramsés III (1184-1153 a.C.) en Tebas, el llamado Ramesseum (Fig. 2).

Es precisamente en este templo donde se conservan las que han sido consideradas como las primeras bóvedas realizadas con dovelas de piedra (Fig. 4). Se trata de las bóvedas



Fig. 4. Una de las capillas abovedadas, la llamada de Amenardis (Foto M. Durán)



Fig. 3. Capillas de las Divinas Adoratrices de Amón del Ramesseum en Tebas, Egipto (Foto M. Durán)

existentes en las capillas de las Divinas Adoratrices de Amón, construidas durante la dinastía XXV (712-664 a.C.) (Fig. 3).

Los puentes arco romanos

La ingeniería romana fue desarrollada por técnicos capaces y experimentados, muy identificados con los objetivos que, según Marco Vitrubio Polión, debían reunir todas las construcciones públicas, de seguridad, utilidad y belleza (De Architectura, libro I, cap. VI). No se conoce la profesión de este autor, aunque se cree que fue un arquitecto que recogió en su obra, única de este tipo que se ha conservado, una buena parte de los conocimientos que sobre arquitectura y construcción había en tiempos del fundador del Imperio romano, el emperador Octavio Augusto (30 a.C.- 14 d.C.).

La característica más destacable del puente romano es la utilización preferente de arcos semicirculares de piedra con dovelas radiales, muy fáciles de diseñar y tallar. Se aprecia la maestría de quien ha comprendido su funcionamiento resistente y su comportamiento estructural, que tuvo como resultado obras de una gran monumentalidad por su esbeltez, tamaño o por el atrevimiento constructivo. En la figura 5, se ve el alzado aguas arriba de A Ponte Velha de Vila Formosa que, a parte de que sus arcos conservan su directriz circular casi perfecta, también ha conseguido mantener su geometría inicial de precisión, como lo demuestra el hecho de que después de dos mil años de vida útil y de haber sufrido un seísmo como el ocurrido en Lisboa en 1755, los centros de tres de sus seis arcos semicirculares están a la misma cota expresada en milímetros y la máxima diferencia entre ellos es de 11 centímetros. Estos datos han sido extraídos del levanta-

miento topográfico con estación láser que se realizó en 1996. La longitud del puente es de unos 120 metros y la luz de las seis bóvedas es prácticamente la misma de unos 8,90 metros.

El enigma de la construcción y funcionamiento de los arcos, fomentado por el sigilo profesional que perduró durante siglos, mantuvo el asombro permanente no sólo del ciudadano normal pues viajeros ilustrados así lo han dejado por escrito. El historiador Ambrosio de Morales se quedó asombrado ante el puente romano de Alcántara (Fig. 6) puesto que, según sus palabras, es una “obra de tanta braveza y *magestad* (sic) que pone espanto a quien la ve y se tiene por una de las grandes maravillas que puede haber en edificio”.

Tampoco fue pequeña la admiración de los arquitectos renacentistas italianos que consideraron modélicos el puente de madera de Julio César sobre el Rin y el de Augusto en Rimini, o la de los francmasones franceses de los siglos XVII y XVIII que visitaron los puentes romanos de la Provenza para conocer los procedimientos y el diseño empleados. Se conservan numerosas inscripciones con sus nombres y la fecha de la estancia además de sus grabados gremiales (Fig.7).

Por lo general, si un puente romano ha perdurado es porque se construyó en un lugar con unas buenas condiciones geotécnicas, con un acertado diseño desde un punto de vista hidráulico y con una construcción resistente y bien trabada. Pero a la vista del escaso número de obras de fábrica identificadas como romanas en Hispania –unas cuarenta hasta



Fig. 5. A Ponte Velha de Vila Formosa, en Portugal, construido con una gran precisión en el siglo I d.C. (Foto M. Durán)



Fig. 6. Alzado aguas arriba del puente de Alcántara, Cáceres (Foto M. Durán)



Fig. 7. Grabado masón en el pretil del puente adosado al acueducto romano de Pont du Gard, Francia (Foto M. Durán)



Fig. 8. Ruinas del Pont Ambroix en la Vía Domicia, Francia (Foto M. Durán)

ahora– se puede pensar que se construyeron pocos, ya que son obras de relativo alto coste económico y tecnológico, o bien que muchas de ellas han sucumbido (Fig. 8).

Los ingenieros que construyeron las obras públicas pertenecían, en ocasiones, al personal técnico del ejército –tal como ha quedado grabado en diversas inscripciones halladas en el África Proconsular, Egipto y Siria– pero también podían estar contratados por empresas de construcción de carácter privado a las que el Estado les adjudicaban contratos para este tipo de obras. En la construcción del Pont del Diable en Martorell (Barcelona) pudo intervenir personal militar, en concreto de las legiones IIII Macedónica, la VI Victrix y la X Gemina, que dejaron grabados, en algunos sillares, sus numerales representativos (Fig. 9).



Fig. 9. Numeral girado de la Legio VI Victrix en un sillar del Pont del Diable en Martorell, Barcelona (Foto M. Durán)



Fig. 10. Buena cimentación del puente de Segura (Cáceres-Portugal) en la roca del cauce (Foto M. Durán)

Desde épocas republicanas se tienen noticias de la participación de civiles como empresarios en la construcción de obras públicas; por ejemplo, en un texto de Tito Livio *–Ab urbe condita–* se menciona la elección de dos censores, Q. Fulvius Flaccus y A. Postumius Albinusque, que fueron los primeros que contrataron la construcción de vías y puentes en el año 174 a.C. Estas empresas eran las *societates publicanorum*, sociedades asentistas que desarrollaban dentro del Estado romano esta actividad constructora que, según Plutarco, eran las adjudicatarias de contratos licitados por las ciudades siempre que su oferta fuese la mejor, a menor precio y en el plazo más corto.

La construcción de un puente de arco romano

La existencia de crecidas condicionó el diseño del puente en cuanto a su composición –número, luces y alturas de los arcos–, cuestiones muy importantes para la conservación de la obra pues afectaba directamente al nivel de las perturbaciones en el régimen fluvial del río, producidas por su construcción, al ser la causa principal de la socavación de las cepas que producía su ruina. Una forma segura de evitar ese fenómeno era construirlo en suelo firme, a ser posible en aquellas zonas del cauce en las que aflorase roca, pues su cohesión y dureza resistían la acción erosiva del agua.

Cuando el puente tenía que emplazarse en una zona de suelo flojo y sin condiciones adecuadas recurrieron, básicamente,

a dos soluciones: la primera consistía en sanear el terreno para cimentarlo superficialmente, y la segunda en llevar la cimentación a estratos más profundos y resistentes. En el primer procedimiento sustituían una parte de suelo por un relleno de escollera o de hormigón, tal como el que se conserva bajo el enlosado de cimentación del tramo izquierdo del puente sobre el Guadiana, en Mérida (Fig. 11).

La cimentación profunda la abordaban de dos formas: o bien procedían a excavar hasta las capas más compactas con ayuda de entibaciones en tierra y con ataguías de tierra o tablestacas de madera si era en medio del río y bombas aspirantes para achicar el agua del interior, o bien realizaban un pilotaje con postes de madera que clavaban hasta alcanzar las capas duras o agotar la capacidad de hincas del martinete; sobre estos pilotes construían un encepado y sobre él colocaban la fábrica. Esta última técnica fue muy empleada en el norte y centro de Europa, pero se desconoce si en Hispania se empleó en algún caso ya que no se han encontrado vestigios.

La madera fue un material muy empleado en los puentes provisionales, por su abundancia, por su fácil corte y trabajo, y por la posibilidad de fabricar piezas pequeñas y ensamblarlas para componer una estructura estable. Se desconoce si su construcción era habitual pues es reducido el número de restos arqueológicos localizados,



Fig. 11. Cimentación artificial de hormigón de cal y canto bajo las pilas del puente de Mérida en la margen derecha del río Guadiana (Foto M. Durán)



Fig. 12. Relleno de hormigón de una pila del puente de A Pontóriga, en Ourense (Foto M. Durán)



Fig. 13. Probable puente romano de Cotobro, realizado con mampostería hidráulica, en Almuñecar, Granada (Foto M. Durán)

especialmente en Hispania donde el número es muy escaso. Se supone su existencia en varios lugares, pero sólo se conocen dos en los que se han localizados vestigios, uno en la provincia de Ourense sobre el río Sil, el puente de A Pontóriga, del que únicamente se conservan los macizos interiores de hormigón de sus pilas. Según el ingeniero de Caminos Segundo Alvarado, la luz mayor de los arcos de celosía de madera era la del central que alcanzó los 24,80 metros. El otro puente estaba en la desembocadura del río Bidasoa en la antigua ciudad de Oiasso, la actual Irún, cimentado sobre pilotes de madera cuyos arranques se conservan hincados en el lecho fangoso.

El material más empleado en los puentes de arco romanos fue la piedra, por su abundancia y sus buenas condiciones de resistencia y durabilidad. En general, este material se empleó en sillerías aparejadas en seco, con juntas bien labradas que aseguraban un buen contacto entre las piezas. Sin duda también emplearon este material en obras de mampostería, colocada, en este caso sí, con mortero de cal hidráulica (Fig. 13).

Un número menor de puentes, a la vista de los ejemplares conservados, fueron construidos con ladrillo u hormigón en masa, a pesar que este material fue empleado con profusión en la edificación de bóvedas y cúpulas. Sólo se conserva un puente construido con hormigón en la antigua isla de Torre Astura, cerca de Neptuno (Italia), que

facilitaba el paso de personas y la conducción de agua a una antigua piscifactoría romana (Fig. 14).

En Hispania, la única obra de ladrillo reconocida como romana es una pequeña alcantarilla de Mérida (Fig. 15), de 4,10 metros de luz, que perteneció a una vía que unía esta ciudad con Olisipo, la actual Lisboa. Quizá este uso tan limitado se deba a que era considerado como un material no muy adecuado en este tipo de obras o porque no existían industrias capaces de suministrarlo con la calidad y en la cantidad necesarias.

El arco circular alcanzó en los puentes romanos su pleno desarrollo funcional, estructural y estético, ya fuese con directriz de medio punto –la forma más habitual– o rebajada. Posiblemente consideraron la primera como la solución más estable al creer –erróneamente– que transmitían verticalmente las cargas a la cimentación. La experiencia de fracasos por un estribado insuficiente les debió llevar al cuestionamiento de las bóvedas rebajadas, que ya construyeron en época tardorrepública, como en el Ponte de San Lorenzo, en la actual ciudad italiana de Padua. En España, la única bóveda rebajada original la conserva A Ponte Pedriña (Fig. 16), de unos 14,00 metros de luz, actualmente sumergida en el embalse de As Conchas (Ourense), por la que pasaba una de las vías, la nº 18, del Itinerario de Antonino, que enlazaba Bracara Augusta (Braga-Portugal) con Asturica Augusta (Astorga).



Fig. 14. Puente de Torre Astura realizado con hormigón de cal (Foto M. Durán)



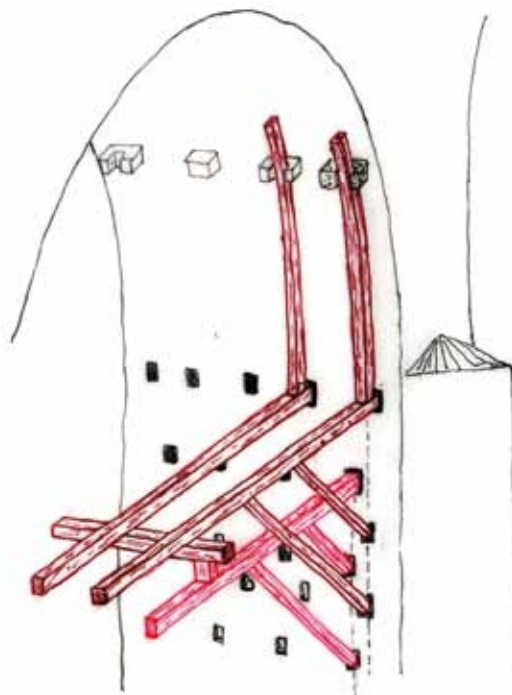
Fig. 15. Rosca interior de ladrillo de la bóveda y dovelas de piedra en la boquilla aguas abajo de la Alcantarilla de Mérida (Foto M. Durán)



Fig. 16. Alzado aguas abajo de A Ponte Pedriña, Ourense (Foto Archivo Central, Ministerio de Cultura, Caja 88048, exp. N° 14)

Para construir las bóvedas utilizaban cimbras de madera compuestas por varias cerchas curvadas con la forma de la futura bóveda. Generalmente el tirante inferior de cada cercha penetraba en unos huecos o mechinales existentes en la parte superior de las cepas, a nivel del arranque del arco (figuras 17 y 18). En esta fotografía del Ponte Bibei (Ourense) se ven otros dispositivos constructivos para incrementar la resistencia del armazón de madera de la bóveda central de 18,76 metros –una luz considerable para la época sólo superada por los cuatro arcos del Ponte de Alcántara y el

que posiblemente tuvo el Ponte Cigarrosa (Ourense)– y un espesor de la rosca extraordinariamente pequeño de 0,90 metros. Su relación con la luz es de $1/20,8$ que representa una extremada delgadez pues sólo hay que recordar el límite recomendado en el siglo XVIII era de $1/15$. El valor medio de los puentes romanos de la antigua Hispania es de $1/10$. Las fábricas de sillería de los puentes romanos cumplieron con los tres criterios que deben reunir todas las estructuras: la resistencia para soportar las cargas y la rigidez para que no se deformase excesivamente se consiguieron



Figs. 17 y 18. Mechinales de apoyo de la cimbra y andamios, apoyos en forma de cuña para los jabalcones de apeo del tirante y sillares salientes en el intradós de la bóveda para arriostramiento lateral de las cerchas, del arco central de Ponte Bibei, Ourense (Foto y dibujo M. Durán)

con los materiales empleados, cuyas tensiones de rotura son muy superiores a las de trabajo, y con la forma de colocarlos. Resisten mejor y son más rígidas si las piezas se colocan juntas con las caras de contacto finamente trabajadas, en seco, sin ripios ni mortero. El tercer criterio de estabilidad de la obra, el más incierto, lo consiguieron con la forma, las correctas dimensiones y el aparejo de las piezas.

El dimensionamiento se realizó con ayuda de unas acertadas relaciones aritméticas y geométricas que ligaban unas medidas con otras, obtenidas a lo largo de muchos años de éxitos y fracasos constructivos (esta forma de diseñar se mantuvo hasta finales del siglo XIX). En lo que respecta a las bóvedas, tuvieron un amplio conocimiento de su funcionamiento estructural que les permitió desarrollar varios sistemas para mejorar su estabilidad. El más acertado fue el descubierto en A Ponte Freixo (Ourense) (Fig. 19), consistente en el arrimo de unas hiladas de sillares en el trasdós de las partes bajas de los arcos. Hoy se sabe que este incremento parcial del grosor de la rosca de un arco de medio punto favorece su estabilidad.

Para facilitar el tránsito por el puente, los ingenieros consideraron más adecuado darle a la plataforma una rasante horizontal, además de mantener en ella la amplitud de la vía. Una anchura de 6,00 m –unos 20 pies romanos– es muy frecuente en los puentes conservados a lo largo del antiguo imperio. En Hispania oscila entre 4,60 y 7,80 metros del puente de Alcántara, siendo la anchura media de 5,83 metros. Poco se sabe cómo era el pavimento de la calzada, si hubo o no andenes, y cómo eran la forma y las dimensiones de los pretilos, pues apenas quedan vestigios en los puentes de Hispania y muy pocos en los del resto del Imperio.

La identificación del origen romano de un puente de fábrica

El reconocimiento del origen romano de un puente de fábrica no presenta mucha dificultad si está construido de sillería, pues tanto su labra, como el aparejo y su construcción poseen unas características propias que ayudan a ello. Además es muy probable que también se hallen otros pequeños detalles que resultan definitivos, como son las muescas practicadas en los bordes o en los lechos de los



Fig. 19. Refuerzo interior de las bóvedas con unas hiladas de sillares adosadas a la rosca para mejorar su estabilidad en la Ponte Freixo, Ourense (Foto M. Durán)



Fig. 20. Detalle de la losa de cimentación de la pila nº 2 del puente de Alcántara, con una línea de replanteo, muescas de palanca y mortajas de enlaces de doble cola de milano (Foto M. Durán)

rubricaingenieria.es

 RÚBRICA PUENTES

- Diseño y fabricación de equipos especiales para puentes por método de voladizos sucesivos •



rubrica,
Soluciones de ingeniería inteligente

Puente arco ferroviario sobre río Tajo

Equipos especiales para ejecución del arco del puente (320m) sobre el río Tajo, para la LAV Madrid - Extremadura.

Alsina
SOLUCIONES EN ENCOFRADOS

Distribuidor Oficial para Internacional

sillares para remover con una palanca las piezas de la hilada superior hasta colocarlas en sus sitios definitivos.

La presencia de enlaces entre sillares contiguos con forma de doble cola de milano es un detalle casi definitivo para identificar la obra romana. No lo es tanto la presencia de grapas metálicas en la fábrica. Para el ingeniero romano fue importante dar a las partes de la estructura más afectadas por la fuerza de las aguas, como eran la cimentación y la parte baja de las cepas, una trabazón flexible, mediante piezas de madera dura, para evitar la rotura de los sillares enlazados si experimentaban pequeños desplazamientos por asientos o seísmos.

También para darle a la fábrica una buena firmeza alternaron, con relativa frecuencia, hiladas de sillares colocados a soga y a tizón (Fig. 21).

Para finalizar, hay otros detalles constructivos como el almohadillado de la sillería y la presencia de cornisas rectas o molduradas, o los agujeros para facilitar el uso de tenazas en el manejo de las piezas, que también pueden indicar el origen romano de un puente antiguo. **ROP**



Fig. 21. Fábrica romana en la parte posterior de la pila central de A Ponte Freixo, con hiladas alternas de sillares normalizados de 1x1x3 pies dispuestos a soga y a tizón (Foto M. Durán)

Referencias

- Arenas de Pablo, J.J. (2002). Caminos en el aire. Los puentes. Tomos I y II. Colección Ciencias, Humanidades e Ingeniería. Colegio de Ingenieros de Caminos. Madrid.
- Alvarado Blanco, S. (1979). "A Pontóriga. Sobre los restos de un antiguo puente romano cerca de Sobradelo de Valdeorras". Boletín Auriense, tomo IX. Ourense.
- Fernández Casado, C. (1980). Historia del puente en España. Puentes Romanos. Instituto Eduardo Torroja. Madrid.
- Fernández Troyano, L. (1999). Tierra sobre agua. Visión histórica universal de los puentes. Colegio de Ingenieros de Caminos. Colección de Ciencias y Humanidades n.º 55. Madrid.
- Galliazzo, V. (1994). *I ponti romani*. II, pp. 70-71, Venecia. Ediciones Canova
- Durán Fuentes, M. (2003). "An endeavour to identify roman bridges built in former Hispania". *Proceedings of the First International Congress on Construction History*. Instituto Juan de Herrera. Madrid.
- Durán Fuentes, M. (2005). La construcción de puentes romanos en Hispania. pp. 199-201. Santiago. Xunta de Galicia.
- Durán Fuentes, M. (2006). "Estudio sobre las bóvedas de los puentes romanos". Actas del III Congreso: las obras públicas romanas en Hispania. Astorga.
- Durán Fuentes, M. ; Ferrer Sierra, S. (2013). A Ponte Vella de Lugo. Arqueología e enxeñería histórica. Traballos de Arqueología, nº 4. Concello de Lugo
- Liz Guiral, J. (1988). El puente de Alcántara: Arqueología e historia. CEHOPU. Madrid.
- Mesqui, J. (1986). *Le pont en France avant le temps des ingénieurs*. París: Ed. Picard.
- O'Connor, C. (1993). *Roman Bridges*. Cambridge University Press.
- Urteaga, M. (2001). "El puente romano del Bidasoa". Boletín Arkeolan, 10, 18-21. Irún (Guipúzcoa).

La segunda juventud de los puentes arco de fábrica: s. XVII, XVIII Y XIX



José Antonio Martín-Caro Álamo

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director de Ines Ingenieros Consultores

Resumen

El presente artículo pretende resaltar la importancia que tuvo en el proyecto y construcción de los puentes de fábrica la conjunción de una serie de hechos favorables relacionados con el conocimiento científico técnico que se dieron lugar a finales del s. XVII y principios del s. XVIII. Esta sinergia positiva derivó en un segundo periodo de esplendor de los puentes de fábrica que llevó consigo una mejora cualitativa de estas estructuras y la construcción de un ingente número de bellas estructuras. Se trata, por tanto, de subrayar esta nueva juventud de los puentes de fábrica, de su relación con el desarrollo de la matemática y la ingeniería, de su relación con sus inmediatos predecesores, los puentes medievales y modernos, y de su muerte temprana a finales del primer cuarto del s. XX, coincidiendo con la irrupción del hormigón armado.

Palabras clave

Puentes de fábrica, teoría general de estabilidad, historia de los puentes, evolución en el análisis de los arcos

Abstract

This article underlines the implications in the design and construction of masonry bridges brought about by a series of favourable advances in the knowledge of science and technology that took place at the end of the 17th century and the start of the 18th century. This positive synergy led to the resurgence of masonry bridges accompanied by the improved quality of these structures and witnessed by the construction of a vast number of beautiful bridges. The article outlines this renaissance of masonry bridges, highlighting their relation to the development of mathematics and engineering, their relation to their immediate predecessors, the medieval and modern bridges, and their early demise in the 1920's on the emergence of reinforced concrete.

Keywords

Masonry bridges, General Theory of Elastic Stability, history of bridges, development in arch analysis

1. Introducción

El análisis sincero de los puentes arco de fábrica desde el punto de vista de su proyecto y construcción, es decir, desde una perspectiva ingenieril, permite concluir que sólo existen dos grandes épocas identificables, la época romana y la que abarca el s. XVIII y s. XIX.

Tanto los puentes pertenecientes a la época medieval, como los construidos durante la Edad Moderna, no presentan innovaciones relevantes en cuanto a su genealogía y razón de ser. En ocasiones, se habla de puentes románicos, renacentistas, barrocos, etc. empleando estilos arquitectónicos para tratar de catalogar a estos puentes situados entre dos momentos ingenieriles históricos, pero salvo en aquellas ocasiones en que la presencia de detalles arquitectónicos o conjuntos escultóricos importantes en el mismo, le confieran pertenencia

a estos estilos, no parece una manera muy afortunada de nombrarlos.

Los puentes arco de fábrica anteriores al siglo XVIII fueron construidos en épocas en las que no se tenía apenas conocimiento de lo que hoy se entiende como Teoría General de Estructuras. Paradójicamente, la gran mayoría de las grandes estructuras de fábrica construidas lo fueron en épocas consideradas “precientíficas”: puente de Constantino sobre el Danubio con luces de 65 m, puente sobre el Adda en Trezzo, Italia, con 73 m de luz, puente de Alcántara en Toledo y un largo etcétera.

Tan sólo a partir del s. XVIII y especialmente en el XIX, el proyecto de estos puentes se ve asistido por herramientas teóricas de análisis, posibilitando el proyecto y construcción

de un gran número de estructuras de especial factura. Pero en ese momento, la irrupción con fuerza de otras tipologías (estructuras metálicas y de hormigón) provocó que el proyecto de los puentes de fábrica con arreglo a un conocimiento científico-técnico apenas perdurara en el tiempo un siglo. Un tiempo comparativamente pequeño con la perspectiva de los muchos años de historia de estas estructuras.

El presente artículo trata sobre la nueva juventud de los puentes de fábrica en los siglos XVIII y XIX, de su relación con el desarrollo de la matemática y la ingeniería, de su relación con sus inmediatos predecesores y de su pronta e injusta desaparición en el s. XX.

2. Sus inmediatos predecesores, los puentes del medioevo y de la Edad Moderna

2.1. Los puentes medievales

La época medieval, que comienza una vez finalizado el dominio romano, es claramente dependiente de la romana en cuanto a la construcción de sus puentes. En principio, la Edad Media recibe la bóveda de medio punto, pero la ortodoxia no es tan rigurosa como en la época precedente, ni en sus formas, ni en sus materiales, ni en su procedimiento

constructivo, resultando en construcciones mucho más variadas en general.

La variedad en las directrices empleadas en las bóvedas es grande y las luces alcanzadas en alguna ocasión (puente la Reina, Ponte Vella, Pont du Avignon, Pont du Diable, etc.) sorprenden por su magnitud. No debemos olvidar que a esta época pertenecen los dos estilos arquitectónicos, románico y gótico, que mejor han empleado la bóveda. Se construyen arcos de medio punto, apuntados y rebajados, con esbelteces que, en ocasiones, superan a las empleadas en la época romana. Las proporciones geométricas utilizadas en esta época en la mayoría de los países de nuestro entorno son, comparativamente con la época romana, mucho más variadas y menos uniformes; la esbeltez de la pila (b_p/L) oscila entre situaciones donde se llega a construir pilas cuya anchura llega a alcanzar la mitad de la luz libre de la bóveda hasta pilas cuya anchura no llega a 1/8 de la luz del puente. Sí bien es verdad que se detecta un retroceso generalizado en el trabajo de los materiales (labra, mortero, etc.) y una peor ejecución y una desconfianza en el cimientto.

Durante un primer periodo, según se expone en los trabajos de Carlos Fernández Casado, se repararon los puentes



Fig. 1. Puente de Besalú, en Girona. Puente representativo junto con el de Frías en Burgos de los puentes fortaleza construidos en los s. XII y XIII. El arco central de menor luz denota la antigua presencia de un puente levadizo de madera



Fig. 2. Puente de San Martín, en Toledo. La luz del vano central es de 38 m y fue construido en el s. XIV

romanos precedentes para pasar, ya en la época románica, a la construcción de nuevos puentes, recuperando de nuevo el dominio del medio punto, principalmente en las regiones del norte de Cataluña y Navarra, donde se tomó como prototipo el puente romano de la época republicana, formado por tramos de bóveda de medio punto con arquillos de aligeramiento sobre las pilas intermedias. Ejemplos de esta época son Besalú, Camprodón, puente la Reina y otros muchos.

Destacan en esta época la presencia de torres defensivas y de control en los puentes, muchos de los cuales eran de propiedad privada y donde se cobraban derecho de pontazgo. Es propia de esta época también la presencia de arcos de aligeramiento que aliviaban las cargas en cimentación y aumentaban la sección de desagüe y la rasante en lomo de asno.

En nuestro país, la historia de los puentes medievales está ligada a la transformación de los caminos utilizados por cristianos y musulmanes en la Reconquista y a la intervención de las órdenes monásticas en la construcción de estas sin-

gulares estructuras en el Camino de Santiago (valga como ejemplo la labor de Santo Domingo de la Calzada y San Juan Ortega).

Aún en época medieval, una vez concluida la época de los puentes románicos, todavía de técnica imperfecta, sobreviven los puentes góticos de directriz ojival dentro de los siglos XIII a XV, que suponen una novedad tipológica con respecto a las bóvedas romanas. Existen diferentes respuestas que intentan explicar el por qué de esta nueva directriz, desde la más ligada al simbolismo religioso, a la apuntada por Carlos Fernández Casado, que justifica este apuntamiento en la directriz para compensar la utilización de cimbras de poca rigidez y el posible movimiento durante el descimbrado. Ejemplos de puentes de este periodo son, entre otros, el de Alcántara, en Toledo, o el de San Martín, también en Toledo.

El puente Vecchio ayuda a explicar la evolución final de los puentes de esta época, puentes en ciudades, con edificaciones sobre ellos, con bóvedas rebajadas y no peraltadas y con luces de hasta 30 m.



Fig. 3. Puente Vecchio. Bóvedas de 30 m de luz con un rebajamiento de 1/7

2.2 Los puentes de la Edad Moderna

La época del Renacimiento supuso una vuelta a los clásicos en todos los sentidos. Se percibe una mejora en las técnicas constructivas y la labra es mejor. Se construyen nuevos puentes, no demasiados, pero de gran factura y de una belleza formal nueva, como correspondía al interés por la arquitectura y la física propia del momento. Los puentes se empiezan a ver como objetos individuales, se conoce el nombre del arquitecto que los proyecta, son los casos de Andrés de Vandelvira, Juan de Herrera, Hernán Ruiz el Joven entre otros.

Esta época coincide con la aparición de varios tratados de arquitectura (Leonardo, Alberti, Palladio y otros). En sus trabajos se recogen, por primera vez por escrito, valores para las dimensiones de las bóvedas a través de relaciones entre el valor del canto de la bóveda y la luz (c/L) o la anchura de la pila y la luz (b_p/L).

- Palladio: $c/L = 1/12$
- Alberti: $c/L = 1/15$
- Serlio: $c/L = 1/17$

Durante esta época, se reconstruyen y reparan muchos de los puentes preexistentes; Juan de Herrera, antes de proyectar y construir sus puentes (Segovia o Galapagar, entre otros), aprendió el oficio en la reparación del puente Mayor de Orense.

Se amplía el abanico de posibilidades en la elección de la directriz del intradós al comenzar a utilizarse directrices escarzanas y elípticas. En Venecia y Florencia se construyen un gran número de bóvedas rebajadas por condicionantes de trazado.

De esta época son un gran número de estructuras emblemáticas provenientes de la sustitución de antiguas estructuras de madera por puentes de fábrica en las principales ciudades



**GRUPO
PUENTES**





Fig. 4. Puente de Almaraz. Pedro de Uría. S. XVI



Fig. 5. Puente de Santa Trinitá. Obra de Ammanati en el s. XVI.
Sus bóvedas están técnicamente inspiradas en los sarcófagos de los Medicis realizados por Miguel Ángel



Fig. 6. Pont Neuf. Terminado durante el reinado de Enrique IV en 1607, fue el primer puente de piedra en París sin viviendas en su estructura para no entorpecer la visión del Louvre. Durante mucho años fue más que un puente, en él se daban cita puestos ambulantes, artistas callejeros (acróbatas, tragafuegos, músicos...), charlatanes y curanderos. También eran habituales en la zona, estafadores, ladrones y carteristas por lo que, durante un tiempo, llegó a contar con su propia horca

y capitales de Europa (Pont Neuf, Stari Most, Fleischbrücke, etc.), puentes que comienzan siendo estructuras extramuros pero que pronto quedan insertadas dentro de la ciudad.

Del mismo modo que se percibe una vuelta a las proporciones geométricas de la época romana, en la cimentación resurge de nuevo la cimentación pilotada. Esto no quiere decir que la cimentación superficial se suprima totalmente, sino que sólo es elegida cuando las condiciones del terreno lo permitían. Existe una gran diversidad de técnicas y reglas para el proyecto de las cimentaciones basadas en un empirismo total, pero la dificultad sigue residiendo en el conocimiento geotécnico, en definitiva, en saber cuándo el terreno permite una u otra cimentación.

En nuestro país, esta época está ligada a los reinados de Carlos I y Felipe II, donde quizás el puente de Almaraz proyectado por Pedro de Uría es su mejor ejemplo. Sus 38 m

de vano central sorprenden si se comparan con puentes contemporáneos en otros países, por ejemplo el puente de Rialto tiene un vano de 27 m y el de Santa Trinitá 29 m.

El s. XVII comienza con un esfuerzo en toda Europa por renovar y mejorar sus vías de comunicación. Este esfuerzo comienza en Francia y rápidamente se contagia por toda Europa. Este impulso constructivo, donde Francia sirve de inspiración, comienza en España a mediados del s. XVII y alcanza su máxima expresión en el s. XVIII, con la llegada de Carlos III.

Es esta una época antecesora de la revolución que supuso el s. XVIII para los puentes, en ella se empiezan a introducir grandes mejoras en las técnicas constructivas, especialmente en la ejecución de cimentaciones complicadas; se comienza a emplear varios tipos de fábricas en un mismo puente (ladrillo y sillería), comienzan los decorados barrocos



Fig. 7. Puente Over. Gloucester. T. Telford. 1827. Luz de 45,70 m

y se detecta un interés por las formas hidrodinámicas en los tajamares.

3. La irrupción del conocimiento científico-técnico. Los siglos XVIII y XIX

Al igual que ocurrió con otras tipologías, en el proyecto y construcción de los puentes arco de fábrica la teoría y práctica no han ido siempre de la mano. El desarrollo teórico de las entonces novedosas teorías de la elasticidad y resistencia de materiales que, por otra parte, se venían produciendo desde el s. XVII con Galileo, Hooke, Mariotte, Bernouilli, Euler, Lagrange, Coulomb y resto de ingenieros matemáticos basado, en gran medida, en el propio desarrollo de las matemáticas no tuvo aplicación práctica inmediata en los puentes arco de fábrica.

No es quizás hasta la aparición de las escuelas politécnicas de finales del s. XVIII y principios del s. XIX, cuando la

teoría y práctica se empiezan a unir de manera indisoluble, produciéndose un doble acercamiento: por una parte, los conocimientos teóricos ayudan a entender, explicar y mejorar las prácticas constructivas adoptadas hasta la fecha y, por otra parte, las prácticas constructivas espolean, motivan y sirven de campo de experimentación a las nuevas teorías.

Este doble acercamiento teórico-práctico duró más de un siglo en el caso de los puentes arco de fábrica, ya que el peso e inercia que tenía la praxis constructiva en estas estructuras por un lado, junto con la todavía juventud de los nuevos descubrimientos y desarrollos teóricos por otro, generó un periodo de transición y convivencia largo y fructífero de dos maneras de entender y proyectar estas estructuras. Otra razón que ayudó a que se mantuviera una metodología de análisis diferente para los arcos, bóvedas y otros elementos de fábrica es el hecho de que, al estar constituidas por piezas independientes ligadas por mortero-

ro, la aplicación de las reglas de los medios continuos se pusiese en duda.

Además, el desarrollo teórico no fue único. Como se muestra a continuación, durante estos siglos convivieron dos maneras de entender el proyecto y construcción de estas singulares estructuras, la clásica y específica de ellas y la nueva, que sirvió para entender y analizar también las estructuras metálicas y de hormigón.

3.1. Evolución en el conocimiento de las estructuras de fábrica. Teoría general de estabilidad

Las primeras noticias que se tienen sobre el análisis científico-técnico y de estabilidad de las bóvedas de fábrica datan de finales del siglo XVII y principios del XVIII. Desde este momento y hasta finales del s. XIX diferentes autores profundizan en aspectos como la determinación analítica y gráfica de la línea o curva de presiones, los posibles mecanismos de colapso, la contribución estructural del relleno, etc.

Se recogen a continuación de manera resumida las grandes aportaciones de los diferentes ingenieros relacionados con los aspectos teóricos de la estabilidad de las bóvedas de fábrica y con el proyecto de puentes:

- La Hire, 1712. Estudio de la estabilidad de bóvedas desde un punto de vista científico, aunque partiendo de hipótesis inexactas.

- Couplet, 1729. Determinación de la junta de rotura (*joint of rupture*) en una bóveda cualquiera.

- Coulomb, 1775. Desarrolla una teoría que se apoya sobre bases científicas sólidas pero que es de difícil aplicación práctica.

- Gauthey y Rondelet realizan experimentos para conocer las formas de colapso de bóvedas y arcos.

- Boistard, 1796. Estando encargado de la construcción del puente de Nemours, proyectado por Perronet, realiza una serie de ensayos a escala real en los que constata la rotura de las bóvedas por la formación de articulaciones en ellas.

- Lamé y Clapeyron, 1823. Publican sus estudios sobre estabilidad de las bóvedas basándose en los ensayos de Boistard.

- Gerstner (1830). Realiza investigaciones sobre la línea de presiones.

- Navier, 1833. Determinación de la regla del tercio central: "La curva de presiones en una bóveda de fábrica debe pasar siempre por un punto de la clave situado a un tercio de la altura de la junta a partir del trasdós, y debe pasar también por el punto de la junta de rotura, situado al tercio de su longitud a contar desde el intradós".

- Moseley (1839). Demuestra que la línea de presiones y la línea de resistencia son curvas diferentes.

- Méry, 1840. Tras sus estudios es posible determinar analíticamente las condiciones de equilibrio de una bóveda de manera general. No obstante, su aplicación práctica para un caso concreto sigue siendo compleja.

- Scheffler, 1853. Independientemente de los estudios llevados a cabo en Francia, en Alemania Scheffler desarrolla el principio de mínima resistencia, según el cual la curva de presiones real es aquella en la que las reacciones son mínimas.

- Culmann, 1866. Su teoría sostiene que la curva de presiones real es aquella cuya posición se aproxime lo más posible a la línea que une los puntos medios de las juntas de las dovelas, condición de tensión mínima.

- Clapeyron, 1867. Desarrolla un método para el trazado de la curva de presiones que se basa en la imposición de tres condiciones:

o La presión máxima en un punto cualquiera de una junta entre dovelas debe ser siempre inferior al límite impuesto por seguridad.

o La curva de presiones debe estar siempre contenida entre el intradós y el trasdós de la bóveda.

o Las dovelas deben permanecer siempre en equilibrio sobre sus juntas y el rozamiento debe impedir su deslizamiento.

- La contribución de Clapeyron es modificada por Szyskowski para un nuevo método de trazado de la curva de presiones, en 1877.

3.2. Evolución en el conocimiento de las estructuras de fábrica. Teoría general de estructuras

Casi al mismo tiempo y en paralelo, el desarrollo de las matemáticas permitió el desarrollo de una nueva teoría general de estructuras no pensada sólo para las estructuras de fábrica y que fue permitiendo un análisis más general de todo tipo de elementos estructurales y materiales. Este desarrollo estuvo basado, entre otras, en las siguientes aportaciones:

- Hooke, 1673. Ley de proporcionalidad de esfuerzos y deformaciones.
- Bernouilli, 1700. Determinación de la elástica, hipótesis de las secciones planas.
- Coulomb, 1776. Primer análisis exacto de la flexión en vigas. Estudio del esfuerzo cortante.
- Young, 1807. Módulos de elasticidad; teoría de la deformación ante esfuerzo tangencial.
- Cauchy, 1822. Ecuaciones fundamentales del equilibrio elástico; direcciones principales y coeficientes elásticos.
- Navier, 1825. Teoría de la elasticidad en sólidos tridimensionales; hipótesis de las secciones planas; teoría definitiva de las vigas.
- Poisson, 1828. Fundador de la teoría de la elasticidad junto con Cauchy y Navier.
- Lamé, 1852. Desarrollo de la teoría de la elasticidad y aplicación a casos particulares.
- Saint-Venant, 1855. Teoría de la torsión; coeficiente de dilatación transversal.
- Clapeyron, 1857. Teorema de los tres momentos. Expresión de la energía interna de un cuerpo elástico.
- Rankine, 1858. Distribución de los esfuerzos cortantes. Fórmula de la resistencia de columnas.
- Maxwell, 1864. Principio de las deformaciones recíprocas; diagrama para la resolución de entramados.

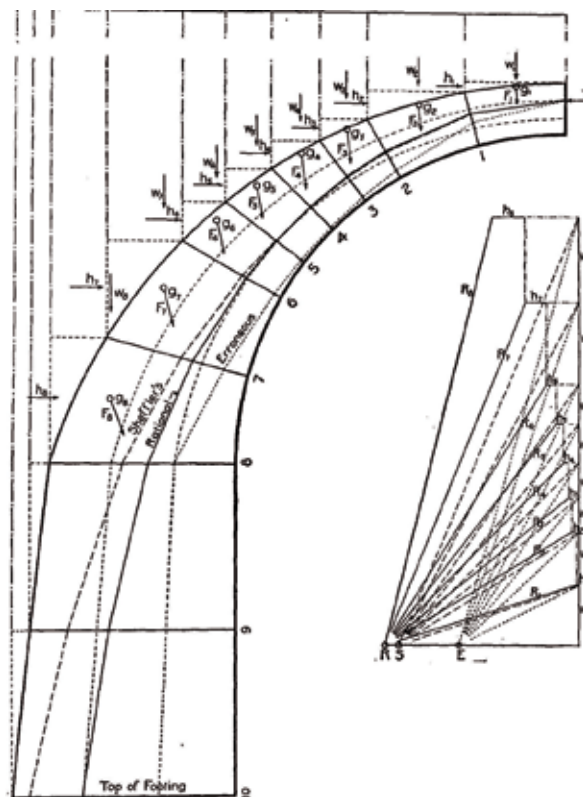


Fig. 8. Obtención de la línea de presiones en un puente teniendo en cuenta la acción horizontal del relleno. Comparación de la teoría racional y la de Scheffer.

- Mohr, 1874. Deducción del principio de las deformaciones recíprocas por el método de los trabajos virtuales. Representación gráfica del estado elástico.
- Castigliano, 1875. Principio del mínimo trabajo elástico.
- Müller Breslau, 1886. Sistematización de los procedimientos de cálculo de estructuras hiperestáticas.
- Timoshenko, 1930. Estudio de los efectos dinámicos y equilibrio elástico de estructuras.

Al finalizar el siglo XIX, Castigliano (1878) publica un libro para el departamento de mantenimiento de puentes de la Red Ferroviaria en el Norte de Italia. El análisis de dos estructuras de la red, una situado en la línea Milán-Venecia, puente sur l'Òglio y otra en Doire del ingeniero Mosca, abren una nueva vía para el análisis de las bóvedas



Puente Infante D. Henrique sobre el río Duero. Oporto.

Luz: 280m

IDEAM

Ingeniería de Puentes y Estructuras

Jorge Juan, 19 - 3º - 28001 Madrid
 Tel. 91 435 8084 - e-mail: general@ideam.es
www.ideam.es

ESPAÑA ■ BRASIL ■ MÉXICO

Presidente: Francisco Millanes Mato

Director General: Luis Matute Director de Ingeniería: Miguel Ortega

Principales campos de actuación:

- Puentes de Carretera, Autovías, Líneas de Ferrocarril y de Alta Velocidad
- Pasarelas Peatonales
- Edificación Singular
- Rehabilitación e Inspección de Puentes y Estructuras
- Asistencias Técnicas y Direcciones de Obra

Actividades:

- Estudios Previos, Anteproyectos y Proyectos de Licitación
- Peritajes y Asesorías Técnicas
- Auscultación e Instrumentación de Estructuras
- Control de Calidad de la ejecución de estructuras
- Supervisión y Control de Proyectos y Ejecución de Obras

Asistencias Técnicas:



Luz: 324m

L.A.V. Madrid-Extremadura
 Viaducto de Alcántara
 A.T. a la Dirección de Obra



Luz: 384m

L.A.V. Madrid-Extremadura
 Viaducto sobre el río Almonte
 Asesoría Técnica a FCC



Luz: 220m

Autovía de la Plata AP-66
 Viaducto sobre el río Tago
 A.T. a la Dirección de Obra



Luz: 184m

Autovía de la Plata AP-66
 Viaducto sobre el río Almonte
 A.T. a la Dirección de Obra



Fig. 9. Construcción de un puente carretero

de fábrica, dando entrada al análisis elástico de manera definitiva.

3.3. La convivencia de ambas teorías en el proyecto de los puentes arco de fábrica

En general, e independientemente de cuales fueran finalmente en cada caso, las reglas o bases teóricas en las que se basara el proyecto y dimensionamiento de estos puentes, es posible concluir que el proyecto de estas estructuras se ayuda en gran medida en la experiencia de los “hechos consumados”, es decir, en el número de estructuras existentes que se encuentran cumpliendo con su tarea, siendo prueba evidente de su estabilidad, por no hablar de la historia de colapsos de estas estructuras que también dan luz sobre el comportamiento de las mismas.

Durante estos siglos, la metodología de proyecto de estas estructuras se estableció de la siguiente forma:

- predimensionando las bóvedas según unas reglas empíricas o de reglas de buena práctica;
- comprobando, posteriormente, las bóvedas con las teorías clásicas existentes basadas en la estática gráfica o en las nuevas basadas en la resistencia de materiales y elasticidad.

La búsqueda de la mejor directriz para el intradós y la definición de la magnitud del canto, eran las variables más importantes en el proyecto de los puentes arco de fábrica. Los complejos análisis de estabilidad parten de unas dimensiones previas que son el resultado de la aplicación de unas reglas de proyecto propuestas, en este caso, en la literatura científica. El siglo XIX es rico en publicaciones sobre la elección de la directriz adecuada, el valor del canto en clave y en arranques, las dimensiones de pilas y estribos, etc. Estas reglas de naturaleza empírica, que si bien es verdad dejan de lado variables de cierta importancia en el proyecto, como el valor de la resistencia de la fábrica y su aparejo, el peso específico, el tipo de relleno y su compactación, el proceso de descimbrado, la cimentación, y las sobrecargas, estaban basadas en estudios detallados de la construcción tradicional y eran validados por los técnicos y científicos del momento. Estas reglas también reflejaban los gustos estéticos de la época.

La aplicación de estas fórmulas requería de una comprobación posterior de la estabilidad de las bóvedas. Conocer que existían otras estructuras con las mismas dimensiones podía conseguir que se aceptará como válida la afirmación de que la estructura fuera segura, pero ¿cuánto de segura? Resumiendo, dentro del proyecto de bóvedas de fábrica, la



Fig. 10. Puente de ferrocarril de Frómista. Este puente ferroviario que salva el Canal de Castilla permite la vista simultánea de las dos infraestructuras que revolucionaron el proyecto y construcción de estos puentes

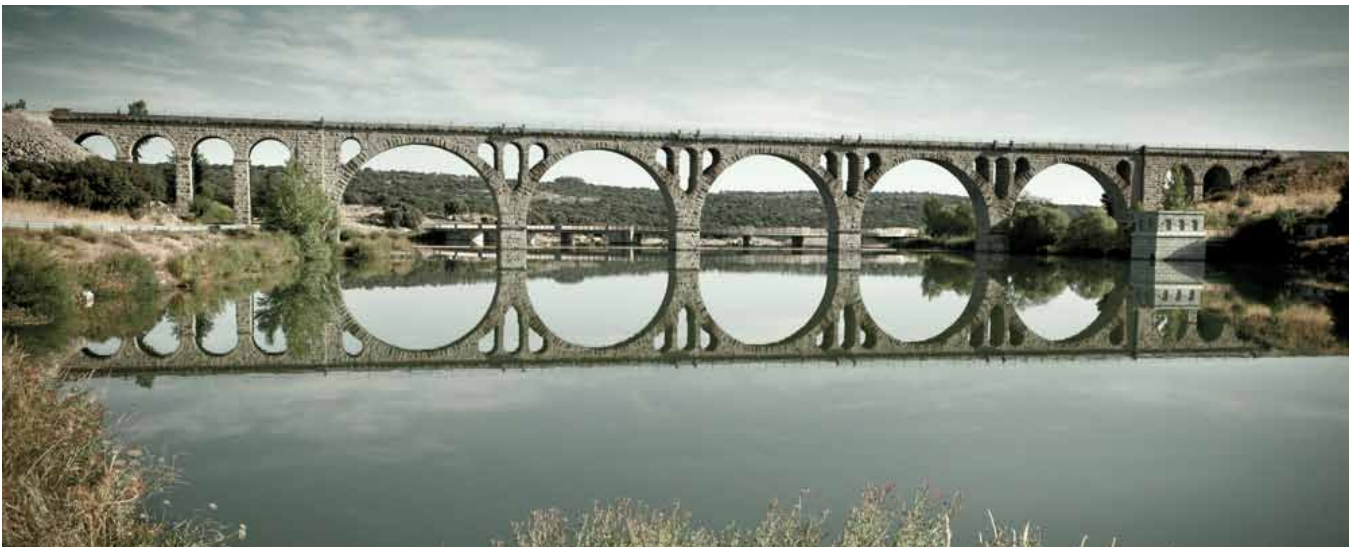


Fig. 11. Puente del Adaja. Línea Ávila-Salamanca

teoría era interpretada por la experiencia, pero la experiencia fue analizada para mejorar la teoría. Todo este desarrollo iba a tener en el proyecto y construcción de los canales y el ferrocarril un campo perfecto de aplicación y prueba.

4. La aparición del ferrocarril y los canales, el nuevo periodo de esplendor de los puentes arco

Con la aparición de los canales y el ferrocarril, las estructuras debieron adaptarse a unos requerimientos más complejos de trazado, es decir, la estructura ya no mandaba como en el caso de las carreteras y caminos donde el trazado se modificaba para conseguir una estructura más sencilla de ejecutar. Esta sumisión de la estructura obligó a proyectar y construir estructuras curvas y esviadas, por una parte, y a viaductos de gran longitud con pilas altas, por otra.

La adopción de esta tipología, antigua y conocida, por los nuevos conocimientos teóricos y prácticos de la época, junto con la aparición de los retos técnicos y constructivos provenientes de las nuevas infraestructuras (canales y ferrocarril), dio lugar a un nuevo periodo de esplendor para estos puentes, a una segunda juventud y a la generación de muchos de sus mejores ejemplos.

Es muy importante resaltar que los puentes arco de fábrica son estructuras cuya génesis es muy anterior al periodo industrial, pero es precisamente en este periodo donde adquieren un nuevo significado y desarrollo, tanto teórico (concepción y proyecto) como práctico (construcción), nunca visto hasta entonces (salvo quizás en la época romana).

Tal y como ya se ha indicado en el punto anterior, es el s. XVIII y XIX el periodo donde quizás se produzcan los avances más importantes relacionados con la ingeniería en general y con la ingeniería civil en particular. Este periodo culmina con la creación de las escuelas de ingenieros civiles y de los correspondientes cuerpos de la Administración, que posibilitan la creación y extensión de las obras públicas pertenecientes a la infraestructura ferroviaria por todo el territorio de manera eficaz y bajo criterios uniformes que descansaban en conocimientos técnicos.

La irrupción de proyectistas especializados con conocimientos técnicos fundados y consensuados, deriva en una construcción racional y fiable que permite abordar el proyecto y construcción de obras que hasta la fecha parecían retos inalcanzables. Sólo el establecimiento de las nuevas reglas de juego técnicas consensuadas, el establecimiento de nuevos cuerpos de fun-

cionarios y técnicos dentro del nuevo entorno social, político y económico anteriormente mencionados, hizo posible la construcción de las grandes infraestructuras de esta época.

5. La aparición del hormigón y el final de una época

Es en esta época cuando se vuelve a descubrir el hormigón gracias al hallazgo del cemento hidráulico natural y del cemento Portland. Se recuperó la técnica de su dosificación y amasado, empleándose en primera instancia en diques y cimentaciones. Rápidamente, su uso se extendió a las grandes obras civiles y por supuesto a los puentes de bóvedas.

En los primeros momentos, el nuevo material es aplicado a las formas estructurales ya conocidas, el arco y la bóveda, sin apenas sacar provecho de las nuevas prestaciones del nuevo material. Se ejecutan bóvedas de hormigón imitando las antiguas bóvedas de fábrica, con las mismas dimensiones, incluso se llegan a fabricar sillares de hormigón en masa simulando una sillería de piedra artificial. Esto permitía aligerar la cimbra ya que ésta sólo tenía que soportar la primera bóveda de sillares. Posteriormente se hormigonaba sobre ella el resto de la bóveda.

Poco a poco, el hormigón se fue liberando de la tradición y especificidades de la fábrica y se fue abriendo a las nuevas posibilidades. Aunque la construcción de bóvedas de hormigón heredó los métodos constructivos de sus predecesoras de fábrica, entre ellos las cimbras para soportar las bóvedas durante su construcción, se idearon procesos constructivos para reducir la importancia de la cimbra en la ejecución de bóvedas de hormigón en masa. Uno de estos métodos es la construcción de la bóveda por roscas; otro es el empleo de armaduras rígidas, cimbras metálicas que quedan embebidas en el hormigón, aprovechándose la rapidez de su puesta en obra.

La desaparición progresiva de canteros, el elevado costo de materiales y mano de obra, junto al apogeo en el proyecto de estructuras metálicas y de hormigón, hicieron que el proyecto y construcción de los puentes arco de fábrica, tipología que nos había acompañado durante los últimos 24 siglos, desapareciera totalmente a partir de 1930 salvo en China donde aún hoy se proyectan y ejecutan puentes de fábrica por considerarlos funcionales y económicos.

El empleo desinhibido del hormigón armado, gracias al asentamiento de las nuevas teorías de la resistencia de materiales y el impulso dado por ejemplos como el puente de Martín Gil, elevó el proyecto de los arcos a otra categoría, pero eso ya es otra historia. **ROP**

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

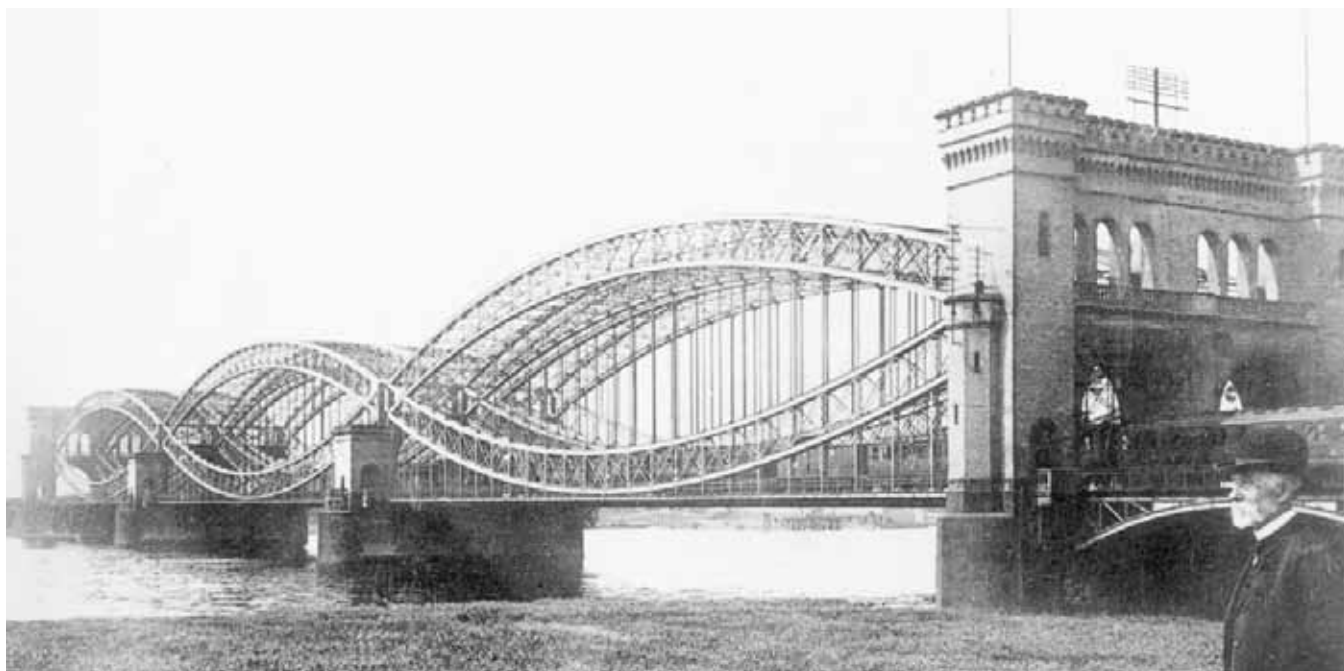


Fig. 6. Puente sobre el río Elba, en Hamburgo. Lohse

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



AQVALOGY
Where Water Lives

SOLUCIONES INTEGRADAS
DEL AGUA PARA UN
DESARROLLO SOSTENIBLE

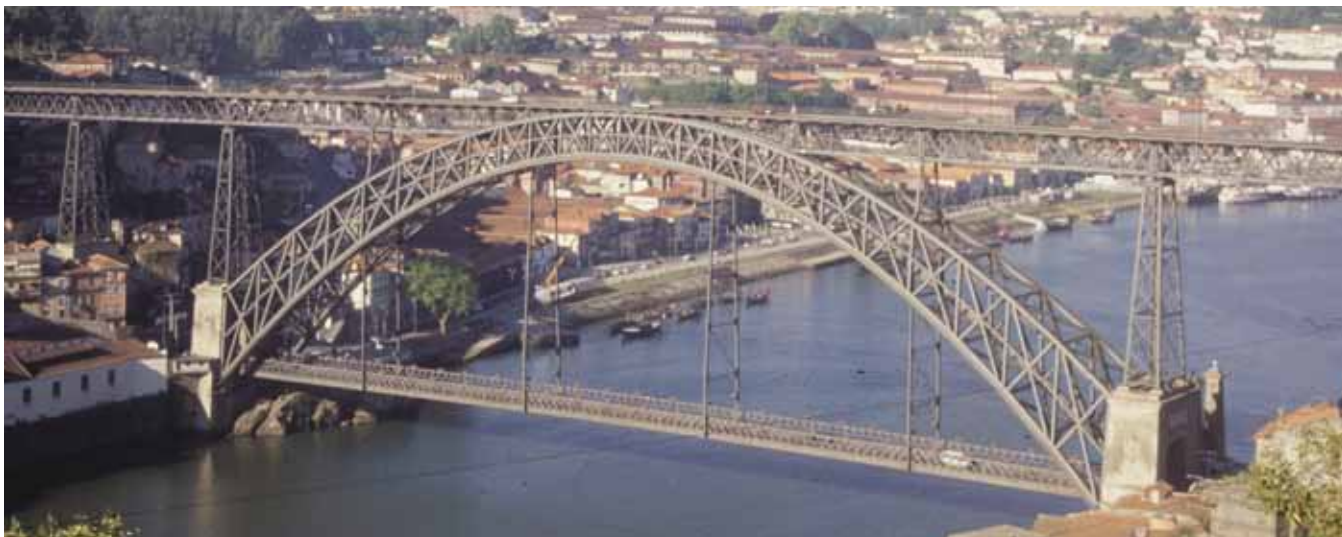


Fig. 8. Puente de María Pía sobre el río Duero, en Oporto. Luz 160 m. 1877. G. Eiffel, T. Seygrig

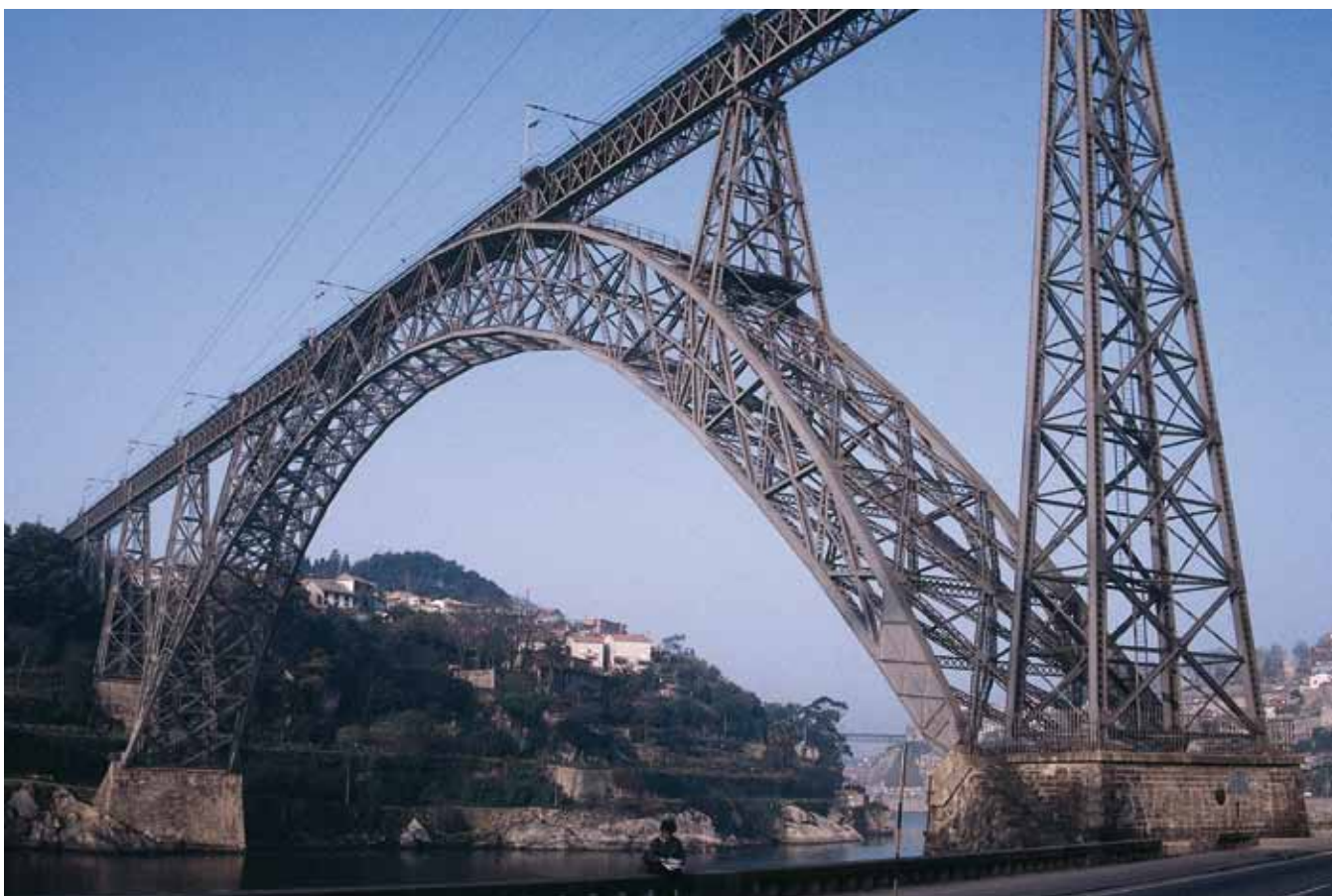


Fig. 9. Viaducto de Garabit sobre la Thuyère (Francia). Luz 166 m. 1884. G. Eiffel, L. Boyer, M. Koechlin



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**

Los puentes arco metálicos modernos



Marcos Jesús Pantaleón Prieto
 Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
 Presidente de APIA XXI – LB IDC



Óscar Ramón Ramos Gutiérrez
 Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
 Responsable de la división de Estructuras
 APIA XXI – LB IDC

Resumen

El artículo realiza una revisión histórica de los puentes arco metálicos modernos, construidos en su mayoría en el último cuarto del pasado siglo y hasta nuestros días. Inicialmente, se apuntan algunas razones acerca del ocaso de esta tipología en la mitad del siglo XX, así como de su posterior renacimiento. Posteriormente, se establece una clasificación formal de los puentes arco, distinguiendo entre arcos de tablero superior (*deck arch*), arcos de tablero inferior (*through arch*) y arcos de tablero intermedio (*half-through arch*). Para cada una de estas categorías se describen y se ilustran las principales realizaciones a lo largo del mundo. Por último, se expone también el estado del arte de los arcos metálicos espaciales, abundantemente desarrollados en los últimos años.

Palabras clave

Arco metálico, tablero superior, tablero inferior, tablero intermedio, arcos espaciales, estado del arte

Abstract

The article provides a historic overview of modern steel arch bridges, built largely over the latter quarter of the last century and up to the present day. The author introduces the article by giving some of the reasons for the decline of this type of bridge in the mid-20th century and their subsequent resurgence, before establishing a formal classification of arch bridges, distinguishing between deck arch, through arch and half-through arch bridges. A description is given for each of these categories together with illustrations of the most relevant examples throughout the world. The author concludes by outlining the state-of-the-art of spatial arch steel bridges that have been widely developed over recent years.

Keywords

Steel arch, deck arch, through arch, half-through arch, spatial arches, state-of-the-art.

1. Ocaso y renacimiento de una vieja tipología

Los grandes arcos en celosía. Dominación y ocaso

Los arcos metálicos y, en particular, aquellos construidos mediante celosía, dominaron ampliamente el panorama del diseño y construcción de los grandes puentes hasta la primera mitad del siglo XX. Sin embargo, puede considerarse que a partir de 1931, con el proyecto del puente de Bayonne (510 m) realmente comenzó ya el ocaso de los grandes puentes arco metálicos (por más que el puente de New River Gorge desbancara al primero en cuanto a la luz máxima, con 518 m).

Las razones del ocaso de la tipología de arco metálico están bien detalladas en numerosa literatura específica. Si bien la aparición y el cada vez mayor creciente empleo del hormigón armado durante la primera mitad del siglo XX ya constituían de por sí una innegable competencia a los arcos metálicos,

fue la aparición y desarrollo del hormigón pretensado a partir de la década de los 40 y 50 el que realmente contribuyó, de forma decisiva, a arrinconar al arco (no sólo al metálico sino también al arco de hormigón) casi exclusivamente al ámbito de las luces extremas. De esta forma, es bien conocido cómo el puente viga de hormigón pretensado se erigió en el verdadero protagonista en la segunda mitad del siglo XX y hasta nuestros días para el rango de las luces bajas y medias (desde 30 m de luz hasta los grandes avances en voladizo de más de 300 m de luz que pueden construirse hoy en día en conjunción con el uso del tablero mixto en el centro del vano principal).

Y precisamente es en el rango de las luces extremas para los puentes viga (establezcámoslas, arbitrariamente, en los 300 m) donde a partir de 1955, y de manera muy extensa en la década de los 70, la consolidación de la tipología de puente atirantado mermó de forma considerable la competitividad

de los arcos metálicos (y no metálicos) también dentro del ámbito de las grandes luces.

En cualquier caso, hay que señalar que, enmarcados en este contexto general, y como veremos más adelante, durante la segunda mitad del siglo XX continuaron construyéndose magníficos puentes arco metálicos, abandonando ya la configuración original en celosía y estableciéndose secciones simples que confieren una notable esbeltez y limpieza al conjunto del puente.

El renacimiento de una vieja tipología

En los últimos 25 años, la tipología de arco metálico parece haber dejado atrás definitivamente la época anodina en la que se vio inmerso y entendemos que hoy podemos decir que estamos asistiendo al renacimiento de una vieja tipología, revisada a través del prisma (no necesariamente siempre acertado) de la modernidad.

Creemos que podemos señalar dos factores fundamentales que alientan este renacimiento de los puentes arco metálicos.

Por una parte, y comenzando desde la época más reciente, a partir de los años 2000 y hasta nuestros días, los puentes arco metálicos han resurgido de una manera muy singular en China. Es allí donde hoy se están estableciendo las nuevas fronteras de los arcos metálicos en lo que se refiere a luz máxima (552 m para tablero intermedio con celosía en el caso del puente Chaotianmen, 550 m en el caso del imponente puente Lupu con tablero intermedio y sección simple, y 460 m para el puente Wushan con la utilización de celosía tubular rellena de hormigón configurando una sección mixta).

Por otra parte, desde finales de los 80 y años 90, se inició en España, Francia e Inglaterra (y extendida hoy en día a otros muchos países) una nueva corriente que añade un significado renovado al empleo de los arcos metálicos con tablero inferior. En este caso, el arco metálico, otras veces tan aparentemente voluminoso, pasa a constituirse en un elemento de referencia visual en entornos urbanos y periurbanos, en el que predomina por encima de cualquier otra razón –incluso resistente– la capacidad expresiva, la esbeltez, la ligereza y su dimensión espacial. El pleno (o casi pleno) conocimiento de los mecanismos resistentes de nuestras estructuras (explotado al máximo con la estandarización del *software* de cálculo que permite, por ejemplo, abordar complejos análisis no lineales materiales y geométricos), junto con el mayor conocimiento y control de ejecución del propio material, ha posibilitado liberar la tipología del arco

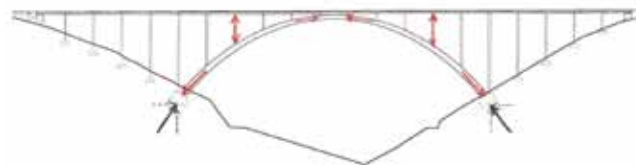


Fig. 1. Puentes arco con tablero superior

metálico de la rigidez formal que exigía la pura verdad estructural, explorando nuevas configuraciones espaciales que se alejan de los habituales conceptos de rectitud y simetría.

A este renacimiento de los arcos metálicos contribuyen también algunas otras razones, como son la versatilidad y potencia de los medios y procedimientos constructivos actuales, aunque estas, en realidad, podrían aplicarse a cualquier otra tipología estructural.

2. Clasificación de los puentes arco metálicos. Realizaciones destacadas desde la segunda mitad del siglo XX hasta nuestros días

A la hora de establecer una clasificación formal de los puentes arco, ha sido muy habitual referir dicha clasificación a la posición que ocupa el tablero en relación con el arco.

De esta forma, podemos distinguir entre arcos de tablero superior (*deck arch*), arcos de tablero inferior (*through arch*) y arcos de tablero intermedio (*half-through arch*). En principio, el diseño de una u otra tipología debiera venir totalmente obligado por las características orográficas del obstáculo que salva el puente. Así pues, cuando la vía que origina el puente (ya sea carretera, ferrocarril o para peatones) se sitúa a una cota bastante elevada con respecto al terreno, nace espontáneamente la figura clásica del puente de tablero superior, relacionada en la mayoría de las ocasiones con rasantes situadas sobre valles pronunciados de laderas escarpadas (fig. 1). En el extremo opuesto, en otras ocasiones la rasante se dispone prácticamente horizontal, con un mínimo resguardo o gálibo vertical con respecto al suelo o al agua; surge aquí, de manera algo menos intuitiva inicialmente, el arco con tablero inferior, en el que todo el arco está situado por encima del tablero, que queda suspendido de aquel (fig. 2). Esta solución es habitual en puentes dispuestos sobre ríos anchos y poco profundos –generalmente no navegables–, si bien puede extenderse a cualquier otra localización. Finalmente, en no pocos casos, la rasante se sitúa en una posición intermedia: elevada con



Fig. 2. Puentes arco con tablero inferior

respecto al terreno o al agua, pero no en la suficiente proporción con respecto a la luz como para materializar el arco inferior, y es entonces cuando se presenta la solución del arco intermedio (fig. 3). En este caso, parte del tablero se apoya en el arco a través de elementos trabajando a compresión y parte del tablero queda suspendido mediante elementos trabajando a tracción.

A continuación, describiremos algunas de las realizaciones más destacadas de estos tipos de arcos metálicos desde la segunda mitad del siglo XX hasta nuestros días (anticipadamente nos excusamos por dejarnos en el tintero tantos otros buenos ejemplos que podrían ocupar lugar en este artículo). En esta descripción no es fácil destacar un hito primordial que represente un cambio de paradigma en la construcción de los arcos metálicos a lo largo de este tiempo. El tipo estructural presentaba un grado de madurez considerable que hace que, hasta hace unos pocos años, y con la irrupción de los arcos espaciales, no pueda realmente hablarse, a nuestro juicio, de un salto cualitativo en el diseño y construcción de los arcos metálicos.



Fig. 3. Puentes arco con tablero intermedio

Hemos dejado de esta recopilación los puentes construidos en China en los últimos 15 años, por ser objeto de otro artículo.

Puentes arco metálicos de tablero superior

Como ya se ha dicho es este el más natural y monumental de los arcos. El esquema estructural, de forma simplificada, puede verse en la figura 2. El tablero soporta las cargas del tráfico y, a través de montantes o pilas (elementos comprimidos) que descansan sobre el propio arco, las transmite a este último. El arco, a su vez, incorpora en su directriz estas cargas como esfuerzos axiales (en la medida de lo posible) y las traslada al terreno, para lo que se necesita una cimentación con suficiente capacidad para contrarrestar no sólo la reacción vertical sino, sobre todo, la reacción horizontal (empuje del arco). En terminología inglesa, esta forma de trabajar el arco es también conocida como *true arch*.

Centrándonos en los arcos metálicos formados por secciones simples (y no por celosías), unos de los primeros puentes de esta tipología adaptados para las grandes luces fueron los puentes internacionales de Rainbow (fig. 4), en las cataratas



Fig. 4. Puente Rainbow



Fig. 5. Puente Lewiston-Queenston



Fig. 6. Arcos de Alconétar

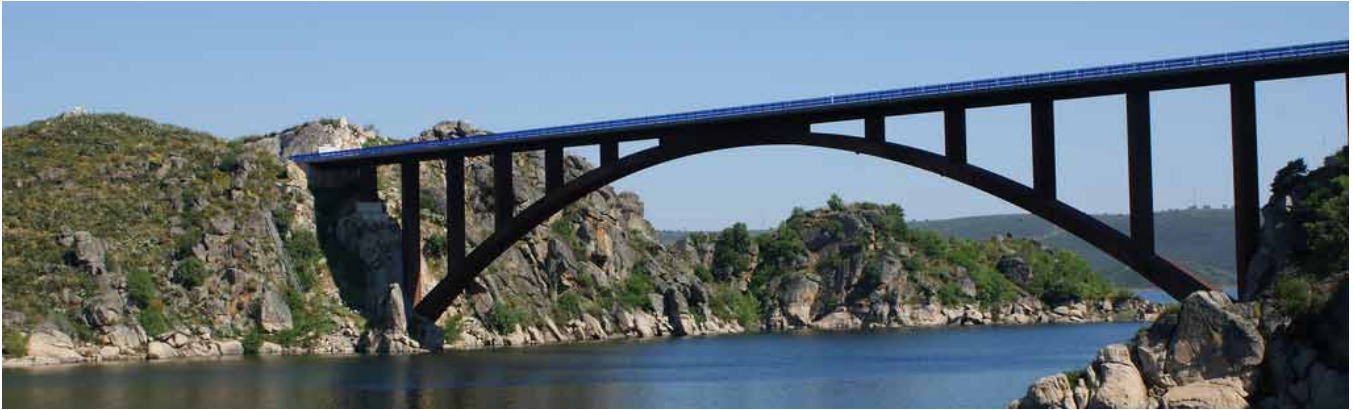


Fig. 7. Arco de Ricobayo.

del Niágara, y de Lewiston-Queenston (fig. 5), también sobre el río Niágara y a unos 6 km del anterior. Su construcción está separada 20 años (el primero de ellos se construyó en 1941 –con 286 m de luz– y en 1962 el segundo –con 305 m de luz y proyectado como una réplica del anterior–). En ambos casos, el arco está formado por sendas vigas cajón, arriostradas mediante una doble triangulación en ‘K’ que le confiere la adecuada rigidez lateral. El puente Rainbow se construyó mediante avance en voladizo con potentes torres de atirantamiento situadas sobre los pórticos de los viaductos de acceso, mientras que en el puente Lewiston-Queenston fue posible disponer puntales metálicos sobre las laderas para sostener el voladizo de los arcos durante su construcción. Este último puente se mantiene hoy en día como el puente arco metálico de tablero superior y sección simple con mayor luz.

En España contamos también con algunos ejemplos interesantes de este tipo de arcos metálicos de tablero superior, de los que destacaremos dos. El primero de ellos corresponde a los Arcos de Alconétar sobre el río Tajo en el embalse de Alcántara, en la Autovía de la Plata (fig. 6). Este puente está constituido por dos estructuras gemelas, paralelas, cuyo vano principal lo forman sendos arcos metálicos de 220 m de luz. Cada arco está compuesto por dos vigas cajón arriostradas mediante perfiles cerrados formando una configuración rómbica. Los arcos fueron montados en posición vertical y posteriormente abatidos, girando sobre su base hasta proceder al cierre en clave, operación que representó un récord absoluto en cuanto a luz de arco construido por este procedimiento. Fue inaugurado en 2006.

El segundo ejemplo lo constituye el arco de Ricobayo (fig. 7), con 168 m luz sobre el embalse del Esla, próximo a Zamora.

Se trata de un arco bastante rebajado, en el que la anchura del tablero (12 m) permitió diseñar un único arco de 4 m de anchura, lo que confiere aún una mayor sensación de ligereza y esbeltez. Aun así, su mayor peculiaridad tal vez resida en que se trata de un arco mixto, en el que el trabajo conjunto de acero y hormigón se consiguió hormigonado el interior del arco una vez que concluyó el proceso constructivo. Fue inaugurado en 1995.

Puentes arco metálicos de tablero inferior

Los puentes arco con tablero inferior presentan una triple singularidad con respecto a los arcos de tablero superior, tal como puede apreciarse en la figura 2.

Por una parte, el tablero se encuentra suspendido del arco, con los elementos de cuelgue trabajando a tracción. Este trabajo a tracción permite emplear secciones muy livianas (llamémoslas péndolas, aunque no siempre lo sean) para estos elementos, ya sea mediante perfiles tubulares, perfiles abiertos, barras o cables. Aunque la distancia entre péndolas sea reducida, el conjunto generalmente presenta un aspecto bastante diáfano, que permite concentrar el foco de atención en el elemento resistente principal, que es el arco.

Por otra parte, como es bien sabido, en la inmensa mayoría de los puentes arco con tablero superior, el empuje horizontal del arco queda atirantado por el propio tablero, liberando así al terreno de las componentes horizontales y demandando de él sólo capacidad resistente vertical. Es por eso que estos arcos también se conocen como arcos atirantados por el tablero (*bowstring* o *tied arch*). El trabajo del tablero como tirante permite, pues, emplear este tipo de arcos casi independientemente de las condiciones de cimentación del

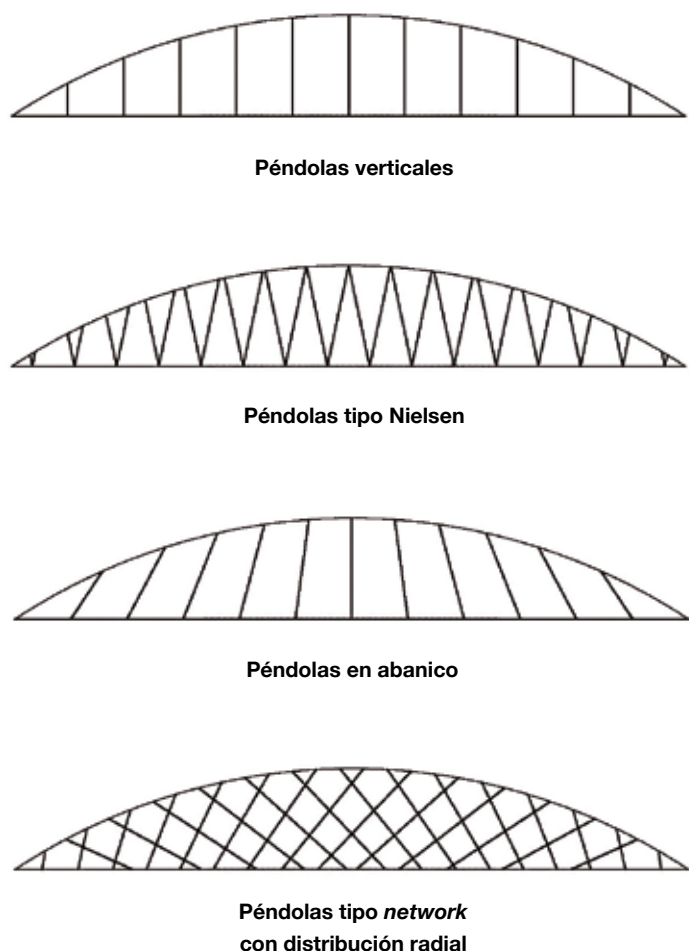


Fig. 8. Redes de péndolas en arcos de tablero inferior

terreno, y es uno de los responsables de la profusión de esta tipología en las últimas décadas.

En estos arcos es posible jugar, de una manera más acentuada, con las proporciones y rigideces relativas de arco y tablero, toda vez que el tablero es capaz de colaborar eficazmente frente a las sobrecargas variables y excéntricas, y también es capaz de controlar la respuesta del arco frente al pandeo en el plano o fuera de él.

La tercera singularidad de los arcos con tablero inferior reside en la exposición visual del arco y, por tanto, en su capacidad expresiva y en su configuración como elemento no sólo resistente sino también estético. En efecto, en es-

tos puentes el arco se constituye en el claro dominador del espacio, siendo contemplado no sólo desde la lejanía sino también por el propio usuario del puente. En este sentido, precisamente el arco metálico, con su esbeltez, ligereza y variabilidad en las formas, se ha erigido como el auténtico dominador de los puentes arco de tablero inferior, con un desarrollo muy relevante en el campo de las luces bajas y medias en las últimas décadas (particularmente en entornos urbanos y periurbanos).

Especial atención merece también la variabilidad en la configuración de la red de péndolas (fig. 8). Podemos encontrar desde las clásicas péndolas verticales o en abanico, péndolas inclinadas (estilo Nielsen) o también es posible triangular la conexión entre arco y tablero mediante perfiles rígidos –lo que asemeja el comportamiento del puente al de una viga biapoyada en celosía de canto variable–. Una evolución de la idea de péndolas inclinadas tipo Nielsen lo constituye el arco tipo *network*, impulsado por Tveit en la segunda mitad del siglo XX, en el que las péndolas se intersecan entre ellas al menos dos veces y la red puede presentar una inclinación variable –para evitar su entrada en compresión ante sobrecargas excéntricas–.

Son innumerables las realizaciones de puentes arco metálicos de tablero inferior que podrían incluirse aquí, por lo que intentaremos recoger sólo algunas de las que entendemos más representativas, bien por la época en que fueron realizadas o bien por su singularidad.

Remitiéndonos a los puentes arco metálicos con péndolas verticales, en lo que podríamos llamar su configuración clásica, mostramos aquí el puente Solidarität sobre el río Rin en Duisburg (fig. 9) y el puente Glenfield sobre el río Ohio en Pennsylvania (fig. 10). El primero es un elegante arco de 256 m de luz (al que, tal vez, le faltó la osadía de alcanzar con un solo vano la otra orilla del Rin) inaugurado en 1950. El segundo ejemplo tiene 229 m de luz, con una notable esbeltez. Su construcción finalizó en 1976 y tiene 6 carriles de circulación. En ambos casos los arcos son verticales, y están arriostrados entre sí mediante una red rómbica (completada con montantes en el caso del primero de ellos).

Es digno de mencionar también una realización bastante reciente, concluida en 2007. Se trata del puente Pentele sobre el río Danubio, a unos 70 km al sur de Budapest (fig. 11). Es un puente arco metálico de tablero inferior, con péndolas verticales y arcos de sección simple inclinados con arrios-

tramiento tipo Viereendeel. Su configuración, por tanto, es clásica y la apariencia final es armoniosa y elegante. Lo que constituye un verdadero hito para este tipo de arcos con sección simple es la luz: 308 m. El procedimiento constructivo, trasladando mediante pontonas el vano completo, también merece atención.

Valgan como ejemplo para ilustrar los puentes arco de tablero inferior con triangulación rígida dos realizaciones españolas dentro de los últimos veinte años, como son el



Fig. 9. Puente Solidarität



Fig. 10. Puente Glenfield



Fig. 11. Puente Pentele



Fig. 12. Puente Portal de Castilla



Fig. 13. Puente de Lanjarón

puente Portal de Castilla, en Vitoria, para ferrocarril (fig. 12) y el puente de Lanjarón, sobre el río Tablate, para carretera (fig. 13). El primero de ellos tiene 64 m de luz, con arcos exentos (no arriostrados entre ellos), y fue construido en el año 1994. El segundo tiene una luz de 113 m y fue construido en el año 2001. El puente de Lanjarón, debido a la no despreciable altura de la rasante y a las condiciones de las laderas, fue construido mediante una técnica peculiar de empuje desde un estribo y tiro mediante cables desde el estribo opuesto.

Con respecto a los arcos con red de péndolas inclinadas tipo *network* es muy conocido el puente sobre el estrecho de Fehmarn, dentro del gran corredor que une Copenhague con Hamburgo (fig. 14). Tiene una luz de 248 m y fue inaugurado en 1963. En cada plano del arco se disponen 40 péndolas con inclinaciones constantes, formando una red

rómbica. El tablero, de 21 m de anchura, aloja tanto plataforma de carretera como de ferrocarril. El arriostramiento entre los arcos es de tipo Vierendeel. Podemos apreciar en este puente lo que sería una tendencia bastante generalizada para los puentes arco de tablero superior, como es disponer los arcos sobre un plano inclinado, llegando a fundirse en un único elemento en la zona central. Este efecto, que es beneficioso desde el punto de vista estructural para determinados estados de carga, nos introduce, sobre todo, en el carácter espacial y un tanto simbólico de los puentes arco con tablero inferior.

Japón también ha mantenido una fuerte tradición en el campo de los arcos metálicos con péndolas inclinadas cruzadas. Elegimos aquí como ejemplo el puente de Shin-Hamadera (fig. 15), sobre la bahía de Osaka. Tiene una luz de 254 m, con un tablero de 20 m de anchura. Fue terminado en 1992.



Fig. 14. Puente sobre el estrecho de Fehmarn



Fig. 15. Puente de Shin-Hamadera

Encontramos también realizaciones muy recientes de esta tipología en España, de las que presentamos como ejemplo el puente sobre el río Deba del año 2007 (fig. 16), con 110 m de luz y arcos tubulares; en los Estados Unidos, con el puente Blennerhassett Island sobre el río Ohio (fig. 17), inaugurado en el año 2008, con 268 m de luz; y también en Argentina, con el puente sobre el río Tercero, en Villamaría (fig. 18), con 120 m de luz y finalizado en el año 2013. En este último caso, el tipo de distribución de péndolas es radial, es decir, las distancias entre las péndolas a lo largo del arco y el ángulo entre cada péndola y el arco son constantes, lo que optimiza la respuesta del arco y del tablero frente a sobrecargas excéntricas.

Dentro de los puentes arco metálicos con tablero inferior, no podemos menos que incluir aquí el puente de la Barqueta, en Sevilla, sobre el viejo cauce del río Guadalquivir, como una referencia señalada (fig. 19). Este puente fue finalizado en 1989

con motivo de la Exposición Universal de Sevilla que se celebró tres años más tarde. El puente de la Barqueta, de 168 m de luz, recogía la tendencia de otros puentes de arco único en mediana (como el puente Tomoegawa en Japón o el de Salzach, cerca de Salzburgo), pero evita el efecto duro de la caída del arco sobre los arranques, abriéndose en ambos extremos y descomponiéndose en pares de pies inclinados que confieren una nueva dimensión espacial (amén de mejorar considerablemente la respuesta del arco frente al pandeo lateral).

Puentes arco metálicos de tablero intermedio

Como ya hemos dicho, los puentes arco metálicos de tablero intermedio comparten algunas de las características propias de las otras dos tipologías antes descritas.

La ubicación de la rasante en una posición intermedia garantiza en muchos de los casos un gálibo vertical suficiente



Fig. 16. Puente sobre el río Deba

bajo el tablero (ya sea para navegación o para tráfico rodado). Asimismo, esta posición del tablero permite también reducir la flecha aparente del arco (entendida esta como la altura del arco que se eleva sobre el tablero); a nuestro juicio, esto repercute en un efecto visual beneficioso frente a los arcos con tablero inferior para el caso de puentes de gran luz (en los que la flecha requerida para el arco –cifrémosla en un quinto de la luz– puede acabar resultando excesivamente invasiva para los observadores situados a nivel del tablero).

Desde el punto de vista resistente, los arcos intermedios pueden conservar el esquema habitual de los arcos con tablero inferior, en los que el empuje horizontal es transmitido directamente al terreno o, lo que es más habitual (y aprove-



Fig. 17. Puente Blennerhassett Island



Fig. 18. Puente sobre el río Tercero, en Villamaría



Fig. 19. Puente de la Barqueta



Fig. 20. Puente Fremont

chando que el arranque de los arcos no está muy alejado del propio tablero), el arco queda efectivamente atirantado por el tablero, conectándose a él mediante puntales inclinados hasta los vanos de aproximación (fig. 3).

En lo que se refiere al carácter expresivo del conjunto del puente, esta tipología comparte muchas de las posibilidades que ofrecen los arcos de tablero inferior, incluso amplificadas en función de la mayor o menor elegancia con que se

resuelva el paso de los arcos a través del tablero, y de cómo se integre, asimismo, el encuentro del puntal trasero y el arco a nivel del terreno (en el caso de los arcos atirantados por el tablero).

Uno de los primeros y más significativos ejemplos de este tipo de puentes, centrándonos de nuevo en los arcos metálicos formados por secciones simples (y no por celosías), lo encontramos en el puente Fremont, en Portland, sobre el



Fig. 21. Puente sobre el lago Roosevelt

río Willamette (fig. 20). Este puente fue construido en 1973, con una luz de 383 m, y se trata de un arco atirantado por el tablero. Es de destacar la notable esbeltez del arco (con apenas 1,17 m de canto, que conduce a una esbeltez de $L/314$), contrarrestada obligadamente por la robustez de las vigas tirante del tablero.

Destacamos, igualmente en los Estados Unidos, el puente sobre el lago Roosevelt, en Arizona (fig. 21). En este caso, como puede observarse en la figura, se trata de un arco intermedio no atirantado, que transmite completamente el empuje al terreno. La luz del vano es 329 m. Los arcos, secciones cajón con una esbeltez de $L/135$, están arriostrados mediante vigas en celosía del mismo canto que el arco. El puente fue concluido en 1991.

También en Japón, en las últimas décadas, se han construido grandes puentes con esta tipología. En el área de la bahía de Osaka encontramos, por ejemplo, el puente Kishiwada, de 1993 con 255 m de luz (fig. 22) y el puente Shin Kizugawa, del año 1994 y con 305 m de luz (fig. 23). Ambos puentes tienen arcos situados en planos inclinados, con arriostramiento tipo Vierendeel. Estos puentes resuelven de forma distinta el encuentro de los pies inclinados con los vanos de aproximación, quedando una figura mucho más limpia en el primer caso, sin ningún tipo de apoyo en la parte del arco situada bajo el tablero. El puente Kishiwada utiliza péndolas verticales, mientras que el puente Shin Kizugawa mantiene la tradición japonesa de péndolas inclinadas cruzadas. En la misma zona de la Bahía de Osaka es singular, cuando menos, el puente Yumemai, del año 2001 y con 280 m de luz (fig. 24), puesto



Fig. 22. Puente Kishiwada

que se trata de un puente flotante y giratorio, y de ahí su especial morfología.

De muy reciente construcción (año 2013) es el puente sobre el río Vístula en Torun (Polonia). Introducimos aquí un ejemplo de puente en arcos sucesivos, bastante utilizado a lo largo de los años, y que creemos que queda resuelto en este caso de una forma bastante agradable y proporcionada (fig. 25). Los arcos no están atirantados por el tablero; se ensamblaron y se colocaron en su posición como arcos exentos y posteriormente se fueron colgando de las péndolas las distintas dovelas del tablero. La luz de cada arco es de 270 m.

En España citaremos dos ejemplos de puentes arco metálicos con tablero intermedio. El puente de Tamaraceite en el acceso norte a Las Palmas de Gran Canaria y al puerto de La Luz (año 1994) y el puente de la Vicaría sobre el embalse de La Fuensanta en el río Segura, en Albacete (año 2008). Ambos casos presentan arcos mixtos, con sección cajón metálica rellena posteriormente de hormigón. El puente de Tamaraceite (fig. 26) está resuelto con un único arco, situado en la mediana de un tablero de 30 m de anchura total. El arco tiene 162 m de luz y transmite el empuje directamente al terreno. El puente de la Vicaría (fig. 27) presenta dos arcos de 168 m de luz con arriostramiento tipo Vierendeel. Este puente fue montado en tres subestructuras parciales (el tramo central como bowstring y los tramos de acceso más los arranques del arco trabajando en voladizo atirantado por el tablero hasta los estribos). En la posición definitiva se conectaron rígidamente las tres subestructuras y se liberaron los anclajes de los estribos.



Fig. 23. Puente Shin Kizugawa



Fig. 25. Puente sobre el río Vístula, en Torun



Fig. 24. Puente Yumemai



Fig. 26. Puente de Tamaraceite



Fig. 27. Puente de la Vicaría



Fig. 28. Cuarto puente sobre el río Ebro, en Logroño



Fig. 29. Puente Nanning sobre el río Yong

3. Arcos espaciales... y especiales

Como habíamos avanzado en la introducción, el renacimiento en el diseño y construcción de la tipología de puente arco en las últimas décadas se debe en gran parte a las numerosas posibilidades expresivas que reúne, sobre todo, en su vertiente de arco de tablero inferior.

Cuando hablamos aquí de arcos espaciales no nos vamos a referir a ellos según el criterio académico (arcos en los que se obtienen esfuerzos fuera del plano al aplicar cargas centradas en el tablero) sino en un sentido más relacionado con su singularidad estética y libertad de formas, de ahí que bien pudiéramos sustituir la denominación de espaciales por especiales.

En este sentido, desde mediados de la década de los 90 hasta nuestros días, podemos encontrar no pocos ejemplos de puentes arco con tablero inferior que se separan de los habituales criterios de diseño que hemos podido observar en el resto de puentes mostrados en este artículo. Se trata fundamentalmente de puentes de mediana luz, en bastantes ocasiones pasarelas, situados en entornos urbanos, y en los que, más allá de la mera misión funcional y resistente (incluso por encima de ellas y, otras veces, hasta en contra de ellas) el proyectista ha pretendido dotar al puente de una personalidad singular.

Esta tipología ofrece, para ello, variados recursos como son, entre otros, jugar con la inclinación de los arcos (haciéndolos no sólo converger, sino divergir), introducir fuertes asimetrías con respecto al plano longitudinal del puente, girar los arcos con respecto al eje del tablero, proyectar

arcos con directriz curva o crear una red espacial con la red de péndolas, por ejemplo.

El arco metálico se convierte entonces en un aliado casi imprescindible para estos puentes gracias a su ligereza, variabilidad en las formas, equiresistencia de sus secciones y facilidad de montaje.

Mostraremos, a continuación, algunas realizaciones de estos puentes. Nos centraremos sólo en puentes para carretera –no en pasarelas– y sin ánimo de ser exhaustivos ni de abarcar todas las posibles categorías.

El cuarto puente sobre el río Ebro en Logroño (fig. 28) es un arco superior de 140 m de luz. Los arcos son dos tubos de acero rellenos de hormigón. Dispone de un tablero central de 18 m de anchura y dos pasarelas laterales, exentas, que son las que precisamente aportan la particularidad a este diseño, pues es el cuelgue de dichas pasarelas hasta los arcos situados en la posición de la mediana el que confiere un carácter espacial al conjunto. Fue inaugurado en el año 2003.

El puente Nanning sobre el río Yong en China (fig. 29) con 300 m de luz e inaugurado en 2009 tiene la configuración (anteriormente ya ensayada, pero no para luces grandes) de arcos exentos divergentes atirantados. En este caso, el tablero también presenta una curvatura en planta no despreciable. Indudablemente supone un reto técnico que tal vez no vaya acompasado con su apreciación estética final.



Fig. 30. Puente de la Alameda

Dentro de la configuración de arco único asimétrico e inclinado mostramos dos realizaciones. Por un lado, el bien conocido puente de la Alameda (fig. 30), en Valencia, sobre el cauce seco del río Turia. Finalizado en 1995, presenta un arco tubular situado de forma excéntrica con respecto al eje del tablero, que posibilita la separación de los tráficos vehiculares y peatonales. Otro ejemplo, más reciente, es el puente Main Street sobre el río Scioto, en Columbus, Ohio (fig. 31). Tras sensibles modificaciones con respecto al concepto inicial, fue inaugurado en 2010. Tiene una luz de 120 m y de nuevo el arco divide el tráfico peatonal y viario. El tablero está suspendido mediante la superposición de péndolas y conexiones rígidas.



Fig. 31. Puente Main Street



Fig. 32. Puente Juscelino Kubitschek



Fig. 33. Puente Margaret Hunt Hill



Fig. 34. Puente sobre el río Galindo

En el caso del puente Juscelino Kubitschek sobre el lago de Paranoá, en Brasilia, inaugurado en 2002 (fig. 32) nos encontramos con una sucesión de tres arcos rectos, verticales, de 240 m de luz, pero que están girados respecto de un eje vertical, y que en planta cruzan diagonalmente sobre el tablero sin llegar a tocarlo. El tablero está suspendido de los arcos mediante péndolas a ambos lados de la plataforma.

De muy reciente construcción –año 2012– es el puente Margaret Hunt Hill, sobre el río Trinity, en Dallas (fig. 33). En este caso, el arco, muy peraltado, está girado perpendicularmente al eje del tablero y éste queda suspendido únicamente en la mediana. El arco tiene 136 m de altura y la longitud total de tablero suspendido es de 367 m. A nuestro juicio, el efecto que provoca la red de cables es bastante sugestivo. En cualquier caso, cabe hacerse la pregunta de si estamos ante un puente arco o un puente atirantado... (valga como indicio que el propio autor del puente lo describe como un puente atirantado con mástil en forma de arco).

El puente sobre el río Galindo en su desembocadura en la ría del Nervión (fig. 34) construido en 2008 presenta la singularidad de ser el primer arco espacial, curvo en alzado y curvo en planta construido para un puente de estas dimensiones (110 m de luz y tablero de 27 m de ancho). Para contrarrestar las cargas horizontales transversales del arco, debidas a su curvatura en planta, se disponen tirantes casi horizontales anclados en ménsulas que salen del borde interior del tablero. Entendemos que el conjunto revela una tensión estática totalmente integrada con las formas. **ROP**

Los primeros arcos de hormigón



Javier Manterola Armisén

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Consejero delegado de CFCSL

Resumen

Se hace referencia a la construcción de arcos de hormigón desde los años 30 a la actualidad. El hormigón armado es el material idóneo para la construcción desde arcos pequeños, los primeros de Ribera que apenas pasaban los 30 m. de luz, hasta los actuales de más de 300 m., 384 m. el cruce del río Almonte en su desembocadura en el embalse de Alcántara. La formidable evolución en procesos constructivos (piedra angular de la construcción de arcos) ha garantizado que se puedan construir los arcos que hoy en día se construyen. Si el pretensado parecía que iba a hacer desaparecer a los arcos de hormigón en los años 60 y 70 al siglo pasado, la realidad ha constatado la formidable firmeza de los arcos de hormigón.

Palabras clave

Arcos, hormigón, armado, voladizos sucesivos, movimiento de traslación y giro, fluencia y retracción

Abstract

The construction of reinforced concrete arches from 1930 to nowadays is shown. Reinforced concrete material is appropriate for the construction of small arches, from a 30 m span initially designed by Ribera to modern arches with span lengths greater than 300 m like the bridge over the Almonte river reaching the Alcántara reservoir. The great evolution in the construction procedures of arches (key features in the construction of arches) has allowed the construction of all modern arch bridges. During the years 60 and 70 of last century, it was thought that prestressed concrete technology would produce the extinction of concrete arches but reality has shown the strength of concrete arches technology.

Keywords

Reinforced concrete arches, free cantilever construction, translation and rotation movements, creep and shrinkage

Este tema es extraordinariamente largo, pues los grandes puentes se hacían con arcos de hormigón, todos nuestros mayores eran formidables constructores de arcos. Hemos decidido dividir el tema en dos partes y el punto de separación es claro, la aparición del pretensado después de la Segunda Guerra mundial que casi supone la desaparición de los arcos como solución a las grandes luces. Pensemos que el puente de Bendorf sobre el Rin, llevó los dinteles rectos hasta los 208 m de luz. Pero poco a poco el puente arco ha ido recuperándose y hoy en día vuelve a tener gran actualidad, tanto formal, como resistente y económica.

El hormigón en masa y después el hormigón armado constituyen los materiales con los que la construcción reencuentra la tradición de la construcción con piedra y que había durado más de 2.000 años. La revolución industrial, que se produce a finales del siglo XVIII y principios del siglo XIX y que se prolonga hasta hoy en día, había traído el hierro y el acero como materiales clásicos de construcción.

Esto significó que todo el entendimiento del hecho constructivo cambió totalmente. La aparición del acero destruyó el concepto que se había configurado de la construcción a lo largo de tantos siglos. Las formas cambiaron de tal manera que profesiones enteras, como la de los arquitectos, quedaron fuera; tan fuerte era la identificación de la construcción con las formas y maneras de unir producida por la arquitectura en piedra.

A finales del siglo XIX, principios del XX, aparecen el cemento Portland y el hormigón, que permitieron recuperar no la forma de construir con piedra pero sí la configuración de lo construido con materiales pétreos. Muchos ingenieros no entendieron la gran revolución que se produjo al tratar con el hierro y el acero en su deseo de construir y se reconciliaron con lo moderno cuando apareció el hormigón.

Pensemos que M. Seyourne, con su enorme habilidad y talento, prolongó los puentes de piedra hasta 1911, como el



Fig. 1. Puente de Torre Montalvo



Fig. 2. Puente sobre el Tajo

puente de los Catalanes, en Tolouse, lo cual le convierte en el mayor ingeniero anacrónico de la época moderna.

En España también se cometieron desaguisados anacrónicos como el puente del Cabriel (1849) de Lucio del Valle o el puente de piedra de Logroño (1882).

Puentes de hormigón en masa

Aunque generalmente no sobrepasen los 40 m de luz, en España se construyeron bastantes bóvedas de hormigón en masa por su reducido coste frente a los puentes de sillería. Ribera decía que, con este material, los puentes no debían pasar de esta luz.

Un ejemplo de ellos es el puente de Torre Montalvo sobre el río Najerilla, terminado en 1926, del ingeniero D. Francisco Castellón. Consta de cinco arcos parabólicos de 30 m de luz y rebajamiento 1/4 (fig. 1). La transmisión de carga del tablero al arco se hace por tabiques transversales.

Se hicieron muchos puentes de hormigón en masa para las líneas de ferrocarril –pues los ingenieros de entonces se fiaban más del hormigón que del acero–, como el construido en Alcántara, sobre el río Tajo, en la línea de Madrid-Valencia, y formado por 15 bóvedas de 21 m de luz (fig. 2). Pero, indiscutiblemente, el puente de hormigón en masa más importante del mundo es el de Villeneuve-sur-Lot (1919), de

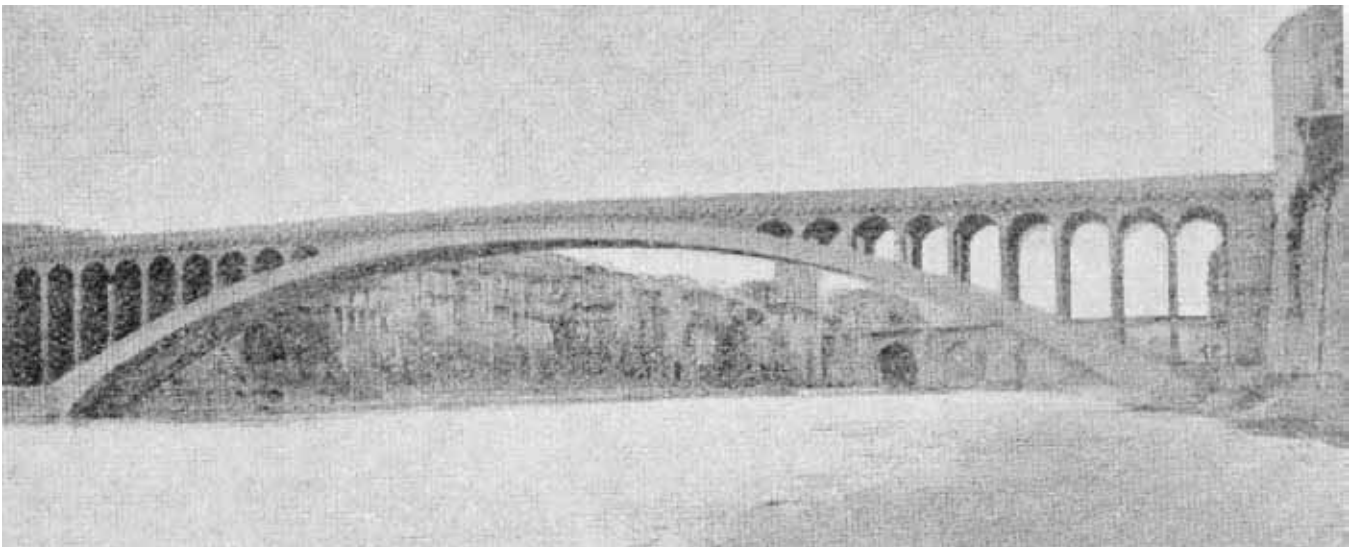


Fig. 3. Puente de Villeneuve-sur-Lot

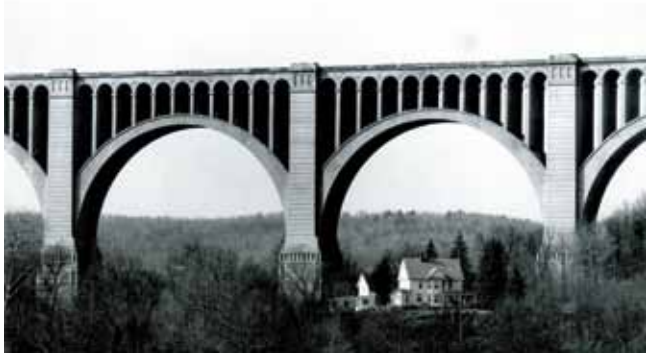


Fig. 4. Puentes de Nicholson



Fig. 6. Autocimbra de Melan

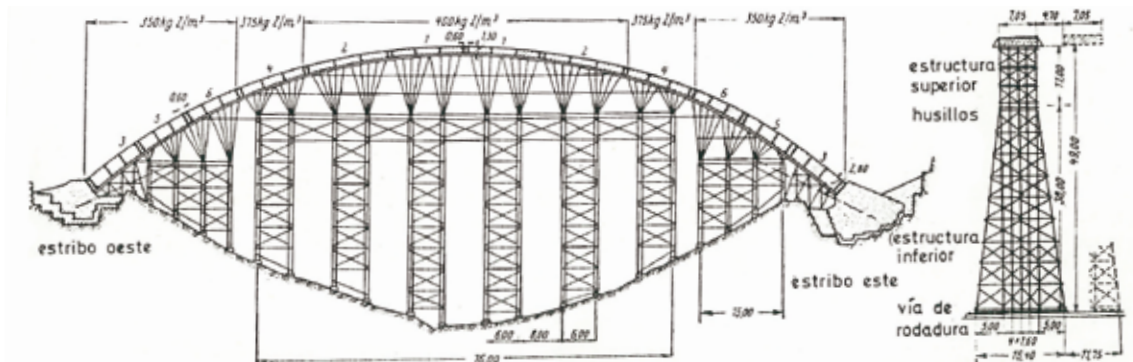


Fig. 5. Puentes sobre Tenfelstal

98 m de luz, formado por dos arcos gemelos de hormigón en masa con tímpanos transversales de ladrillo y tablero de hormigón armado, cuyo autor es Freyssinet (fig. 3).

En los Estados Unidos existen muchos puentes de hormigón en masa como el puente de Nicholson (1916), de 680 m de longitud y que está constituido por diez arcos de 54,8 m de luz (fig. 4).

Todos estos puentes se construyeron sobre cimbras.

Puentes de hormigón armado

El puente arco constituye la única estructura posible para saltar grandes luces a principios del siglo XX. Su gran problema residía y reside en su construcción, pues hasta que no está terminado el arco necesita para resistir de grandes cimbras, de madera normalmente, cimbras cuya ejecución fue casi siempre el problema principal a resolver (fig. 5). Generalmente, se resolvían con andamios de madera o de

hierro apoyados en el suelo y se interponían gatos hidráulicos en puntos intermedios para poder descimbrarlos.

En 1892, el ingeniero austriaco Joseph Melan patenta un sistema de construcción consistente en la utilización de cimbras metálicas rígidas, embutidas dentro de los arcos, que servían como soporte para el encofrado y la armadura para el hormigón armado (fig. 6). Este sistema, que permitía eliminar las grandes y pesadas cimbras desde el suelo, fue utilizado mucho en España por José Eugenio Ribera, en desarrollo paralelo a la invención de Melan. En la figura 7 se observa la disposición típica de muchos puentes de Ribera con tabiques transversales y forjados de hormigón armado apoyándose en la cimbra metálica hormigonada.

Jose Eugenio Ribera (1864-1936)

Ribera fue funcionario, proyectista, constructor y profesor, además de uno de los grandes ingenieros que tuvimos en el cambio de siglo. Si bien no fue el primero que utilizó el hormigón en

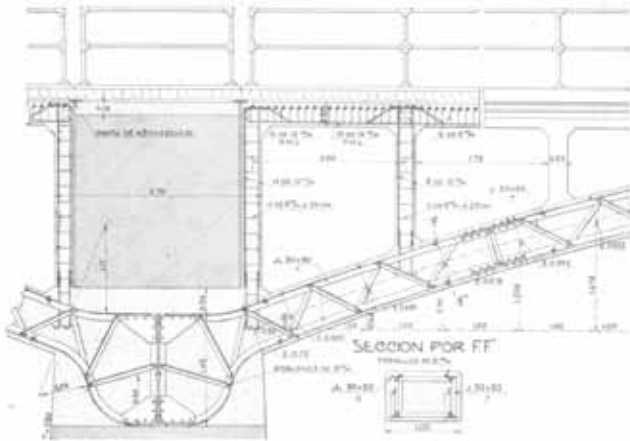


Fig. 7. Disposición constructiva de Ribera

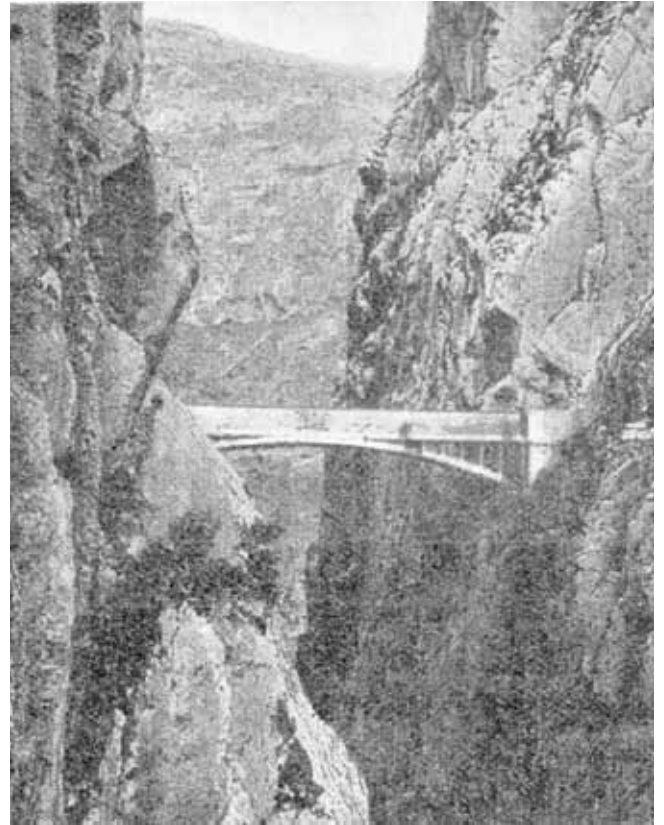


Fig. 9. Acueducto del Chorro

España, si fue el primero que hizo un puente con este material, el puente de Golbaro (fig. 8), de 1900. Se trata de un puente arco de 30 m de luz, rebajamiento 1/10, formado por dos arcos individuales de 0,5x0,6 dentro de los cuales introduce dos perfiles metálicos en doble 'T' –de 200x90x11,5x7,5– que sirven de soporte del hormigón de los arcos. Los arcos metálicos necesitaron una pequeña cimbra para ser montados.

Parece que Ribera se arrepintió de la pequeña rigidez de estos arcos, lo que llevó a hacerlos mayores en trabajos posteriores.



Fig. 8. Puente de Golbaro

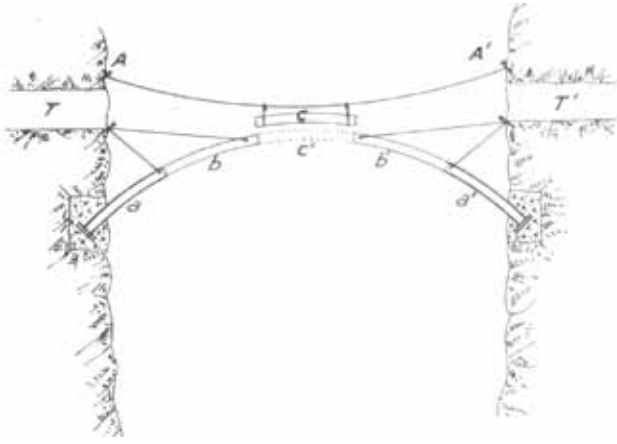


Fig. 10. Autocimbra del acueducto del Chorro

En el acueducto del Chorro (fig. 9), de 1904, Ribera utiliza un arco de toda la anchura del canal, 8 m, por 0,4 m de canto, dentro del cual ha hormigonado la autocimbra metálica constituida por ocho vigas doble 'T' de 0,24 m de canto que, montada con ayuda de un blondín (fig. 10), sirve de soporte al arco de hormigón que rodea las vigas.

El puente de María Cristina (1901-1904) está constituido por tres arcos de 30 metros de luz con rebajamiento 1/11 (fig. 11).

Se realizó una cimbra rígida para soportar la tabla de hormigón que se extiende a todo el ancho del puente. Se dispusieron tabiques longitudinales, de 20 cm de espesor, separados 1,5 m, en los cuales se dispuso la armadura rígida sobre la cual se hormigonó una tongada de 0,25 m que, una vez endurecida, sirvió para colaborar con la autocimbra en el soporte del hormigón posterior. Este puente está excesivamente decorado, medida que Ribera no controlaba bien.

Un proyecto similar es el que realizó, en Valencia, el puente de Don Juan, pero disponiendo cuatro arcos de 30 m de luz y tabiques longitudinales similares al de María Cristina (fig. 12).

En el puente de la Reina Victoria (1909), Ribera introduce una serie de variantes respecto al de María Cristina que van a constituir un prototipo de puente que repetirá con frecuencia.

El río Manzanares (fig. 13) lo salta con arcos de 30 m de luz y además individualizados en dos arcos bicelulares de 2,8 m de anchura, colocados en el borde del tablero que se unen con una serie de vigas transversales separadas 1,52 m y coincidentes con las pilas que unen los arcos con el tablero.

Según el mismo Ribera comenta, la eliminación de una bóveda de toda la anchura por dos vigas se hace a imitación de las

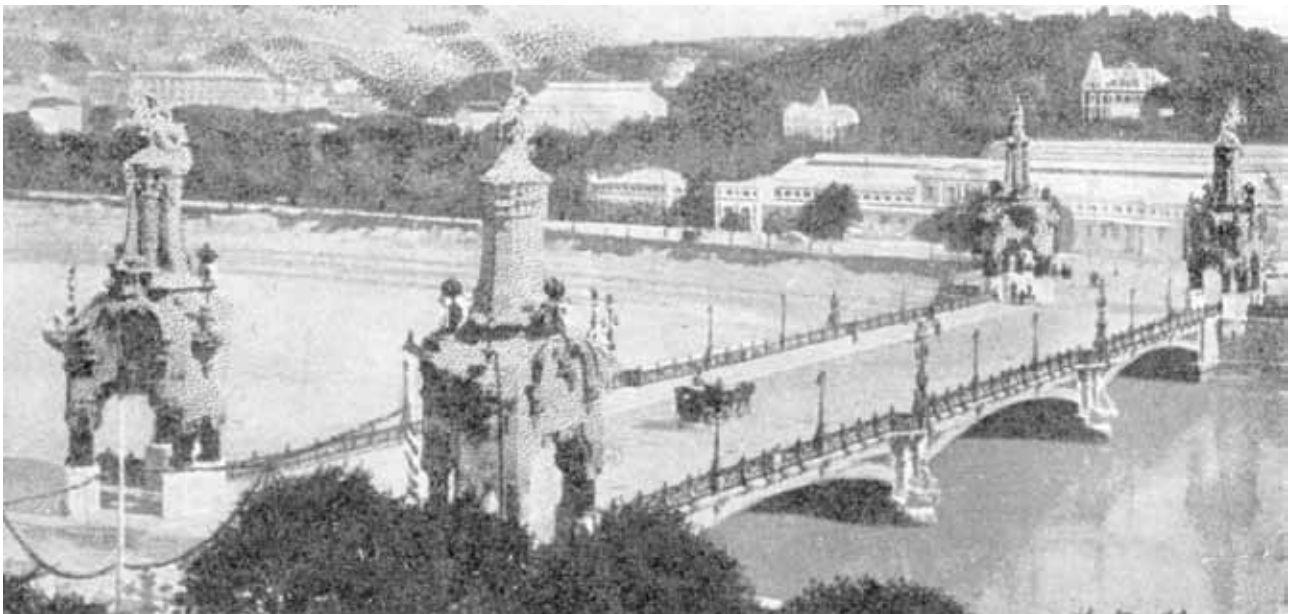


Fig. 11. Puente de María Cristina

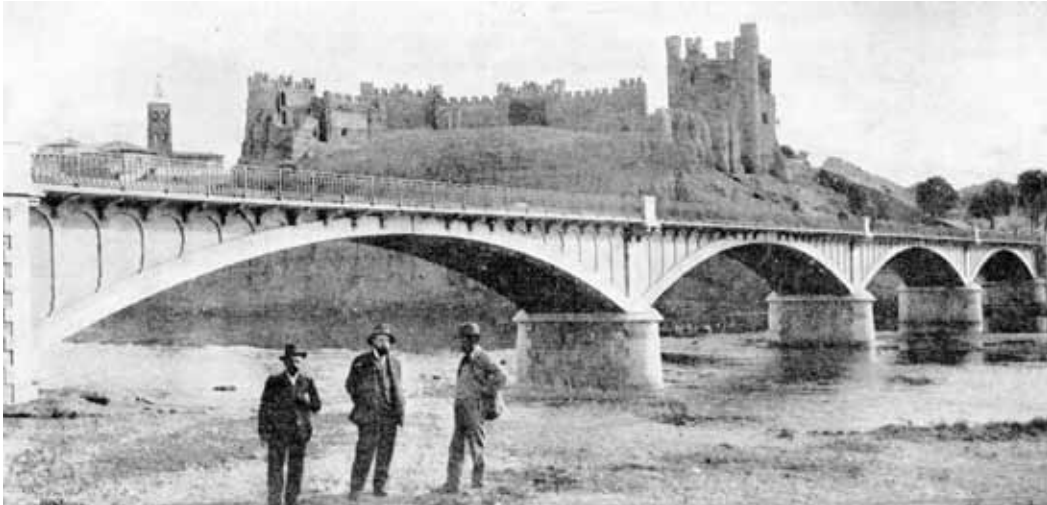


Fig. 12. Puente de Valencia de Don Juan

propuestas que en Francia había realizado Seyourné en el puente de Luxemburgo y el de los Catalanes, en Toulouse.

Estos arcos tienen una cimentación importante sobre el río para recoger los fuertes empujes horizontales de los arcos, pues el rebajamiento de los arcos es enorme para intentar acoplar su rasante a las orillas del río. Este hecho se reproduce en muchos puentes de hormigón armado de la época. A continuación de los arcos, se disponen dos tramos rectos horizontales a cada lado.

Idéntica disposición general adopta Ribera en el puente de Barranco Hondo, en Tenerife (fig. 14).

Junto con el puente de S. Telmo, en Sevilla, con dos arcos laterales y un tramo móvil en el centro –ahora convertido en un pórtico rígido–, Ribera hace muchos puentes similares a los descritos. Hace también una colección de puentes oficial que será seguida por muchos proyectistas en España.

Finalmente, quiero citar el puente de Gaznata, formado por cuatro arcos peraltados de 25 m de luz seguido por cinco tramos rectos de 11,5 m de luz, cuatro por un lado y uno por el otro. La autocimbra rígida se subió por luces completas desde el suelo. Este viaducto da lugar a una serie de viaductos altos muy imitados también (fig. 15).

Otros ingenieros españoles

Fernando Hue (1871-1935) fue el responsable del viaducto Viejo o viaducto Fernando Hue (1929), de Teruel, su obra más importante. Tiene 79 m de luz y 26,5 m de flecha



Fig. 13. Puente de la Reina Victoria



Fig. 14. Viaducto sobre Barranco Hondo

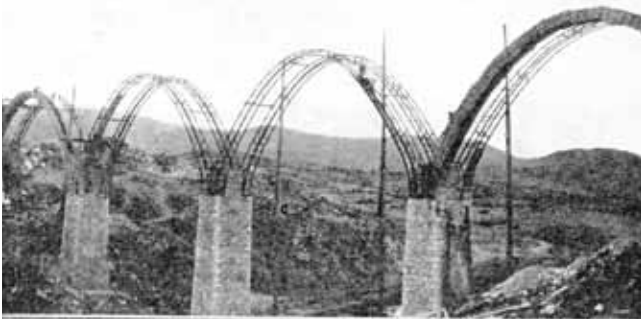


Fig. 15a y 15 b. Puente de Gaznata



Fig. 16. Viaducto de Teruel

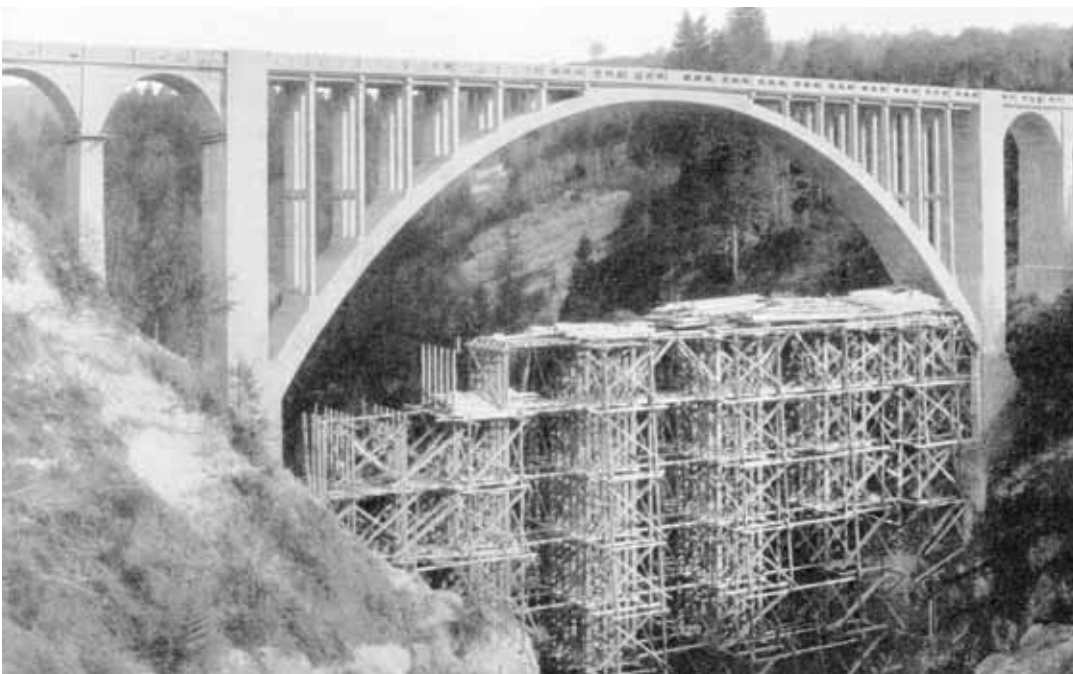


Fig. 17. Cimbra del puente de Gmundertobelbrucke

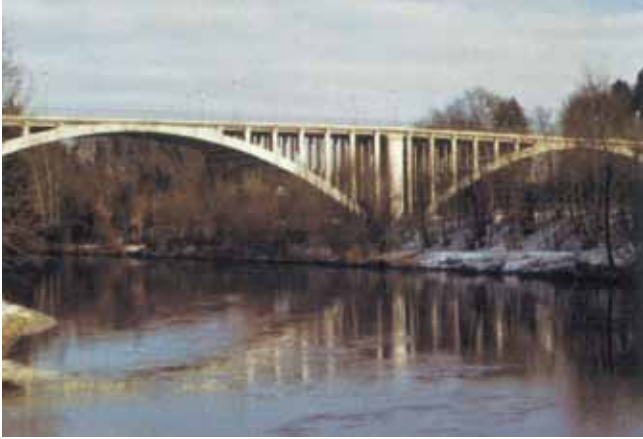


Fig. 18. Puente de Isarbrücke



Fig. 19. Puente de Bixby

(fig. 16). Este viaducto sigue al famoso viaducto de Sitter, de E. Mörsch, construido en 1908.

Conviene aquí detenerse en el gran ingeniero alemán Emil Mörsch (1872-1950), proyectista, docente, investigador, etc. Es el creador del Gmündertobelbrücke (fig. 17), de 1908, y del Isarbrücke cerca de Grunwald (fig. 18), de 1903-1904, con dos vanos en arco de 70 m. Se trata de dos puentes que establecieron la pauta a seguir en los grandes viaductos de hormigón. El mismo Fernando Hue justifica su viaducto de Teruel porque es igual al de Mörsch (fig. 18), con la misma luz 79 m y la misma flecha 26,5 m.

Mörsch tiende a separar en el puente arco, principal de los viaductos de acceso, interponiendo una gran pila rígida que va a soportar los empujes de la arcada lateral de mucha menos

luz y separada del principal por una junta. En el puente sobre el Isar, la dispone igual aunque separa dos arcos iguales.

En España, además del puente de Teruel de Fernando Hue, siguen la misma morfología puentes como el de Martín Gil, construido por Torroja o todos los puentes grandes de Ribera, quien no dispone arquillos en los vanos de los viaductos de acceso sino tramos rectos, como ya hemos visto en el puente de Tenerife del Barranco Hondo, el de la Reina Victoria de Madrid, etc.

Y eso, a mi entender, no está bien. La discontinuidad introducida entre el arco principal y los tramos de acceso sólo puede deberse a la dificultad de calculo que podría presentar la continuidad natural del viaducto de acceso con la palizada dispuesta sobre el arco principal.



Fig. 20. Viaducto de San Jorge de Alcoy



Fig. 21. Puente de Requejo

Hay muchos puentes así distribuidos por el mundo y de ejecución posterior al de Mörsch. El puente de Bixby (fig. 19), en la costa californiana del Pacífico responde al mismo planteamiento. Tiene dos arcos paralelos de 85 m de luz y fue construido en 1931-33.

De la misma época tenemos en España el viaducto de S. Jorge de Alcoy (1931), con proyecto de los ingenieros de Caminos, Carmelo Monzón y Vicente Redón, con la colaboración de Peña Benuf (fig. 20). Está constituido por tres arcos parabólicos de 45,5 m de luz con 12 m de anchura. Su altura alcanza los 42 m. Su tecnología es muy distinta a los ejemplos de Mörsch. Es una arcada múltiple, empotrada y formada por dos arcos separados. Sigue los modelos de puente de Ribera. A los arcos les siguen tramos rectos a la manera de Ribera.

En España se proyectaron en los años 30 muchos puentes con tablero inferior e intermedio. El puente de Requejo sobre el Narcea (fig. 21), de 1930, tiene 41 m de luz y una articulación en la clave del arco, cuya existencia justifica su autor, Ildefonso Sánchez del Río, por una serie de razones de dudosa eficacia.

Puente del Risorgimiento (1910)

La tecnología italiana fue muy buena y activa en el desarrollo de los puentes arco de hormigón. El puente del Risorgimiento (fig. 22), de 1910, constituye con sus 100 m de luz, el máximo logro en una fecha tan temprana. El puente tiene 20 m de anchura.

Existen dudas respecto a su autoría, los italianos adjudican el proyecto al ingeniero Porcheddu y a su asistente, el ingeniero Emilio Giay, mientras que los franceses consideran que es el máximo logro de Hennebique. Lo que sí parece seguro es que éste supervisó los cálculos.

El puente se realizó sobre cimbra y está constituido por siete tabiques longitudinales, con 0,85 m de espesor en clave, 20 cm pertenecientes a cada una de las losas superior e inferior y 45 cm de alma. La cimentación se realizó sobre pilotes.

Otros muchos puentes, y de todo tipo y tamaño, realizaron los italianos. Conviene señalar dos por sus especiales características como el viaducto de Intra configurado por tres arcos de 30 m de luz y un ancho total de 7,8 m. La flecha de los arcos es de 5,9 m (fig. 23). Su configuración es es-

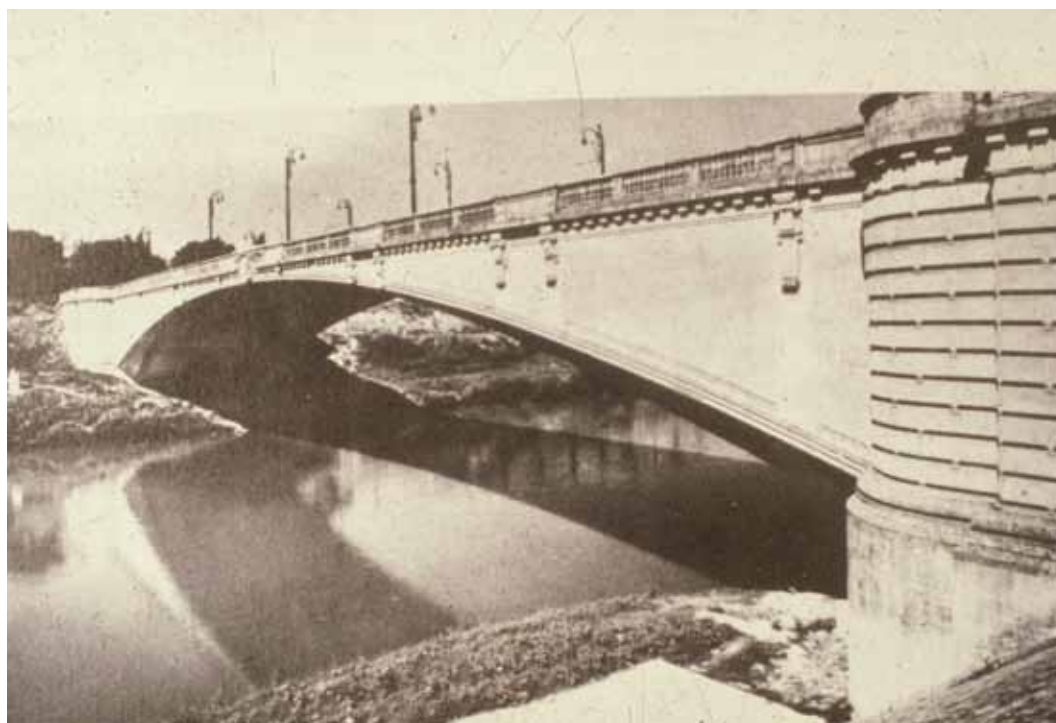


Fig. 22. Puente del Risorgimiento



Fig. 23. Puente de Intra



Fig. 24. Puente en la autopista de Bologna-Venecia



Fig. 25. Puente de Varzi

pecial con tres puntales sobre pila que recogen la carga de los 10,8 m de tablero que están sobre la pila y el arco los 21,6 m centrales (1922).

Otros viaductos curiosos italianos se encuentran en la autopista Bolonia-Venecia (fig. 24). La poligonalización de los arcos y la cuadrícula de vigas y pilares que cosen entre sí los puntos de quiebro proporcionan rigidez y resistencia a los arcos ante las cargas descentradas. Tiene unas luces de 58 m.

Esta misma forma de arriostramiento longitudinal de los arcos se encuentra en muchos puentes arco italianos.

La finura del diseño que caracteriza a casi todos los puentes italianos se manifiesta, muy especialmente, en puentes como el que está sobre el torrente Staffora, en Varzi, constituido por tres arcos muy rebajados de 31,2 m de luz y 2,75 m de flecha. Estos arcos, formados por cuatro nervios con fondo continuo, se terminaron en 1915 (fig. 25).

Robert Maillart (1872-1940)

Maillart es un ejemplo de la innovación que puede obtenerse en la forma del puente partiendo de una interpretación directa de la tecnología. Y esto es muy poco frecuente. Normalmente, se tiende a considerar la forma de los puentes como expresión única de la tecnología que lo soporta. Un puente arco es o un arco tímpano, en el que la relación entre arco y tablero es continua –herencia del puente de piedra–, o es un arco que soporta el tablero por medio de pilares verticales –herencia del puente metálico–. Maillart no hace ni lo uno ni lo otro, es un heterodoxo para su tiempo y abre una ventana enorme al entendimiento del puente arco. Cuando en el puente de Zuoz (fig. 26), de 1901 –arco tímpano de hormigón de 30 m de luz, triarticulado, y con relación flecha-luz 1:10–, se le fisuraron los tímpanos, los eliminó como en su segundo puente, el de Tavanasa (1905), en el que empieza a perfilarse lo que va a ser una de las aportaciones concretas de Maillart al mundo de los puentes: el arco triarticulado con riñones aligerados (fig. 27).



Fig. 26. Puente sobre el río Inn, en Zuoz



Fig. 27. Puente sobre el río Rhin, en Tavanosa



El dintel no es algo que se superpone y se apoya en el arco, sino que ambos forman un elemento estructural único del que se elimina la zona inútil. Estarán relacionadas por pilares o no, pero siempre manteniendo ese criterio. Los arcos son más o menos arqueados, a veces son hasta ojivales, pero siempre acoplándose a la ley de momentos flectores característica de los arcos triarticulados.

Resultado de esta toma de conciencia respecto a lo que es el puente arco tenemos ejemplos tan características como:

Puente	Año	Luz (m)	Relación flecha/luz
Tavanasa	1905	35,00	1/8,5
Salginatobel	1929-30	90,04	1/6,9
Rossgaben	1932	82,00	1/8,5
Thur	1933	72,00	1/8,45
Arve	1936	55,97	1/11,7
Simme	1939-40	32,00	1/13,6
Strassenüberführung	1940	40,00	1/8,8

Tabla I

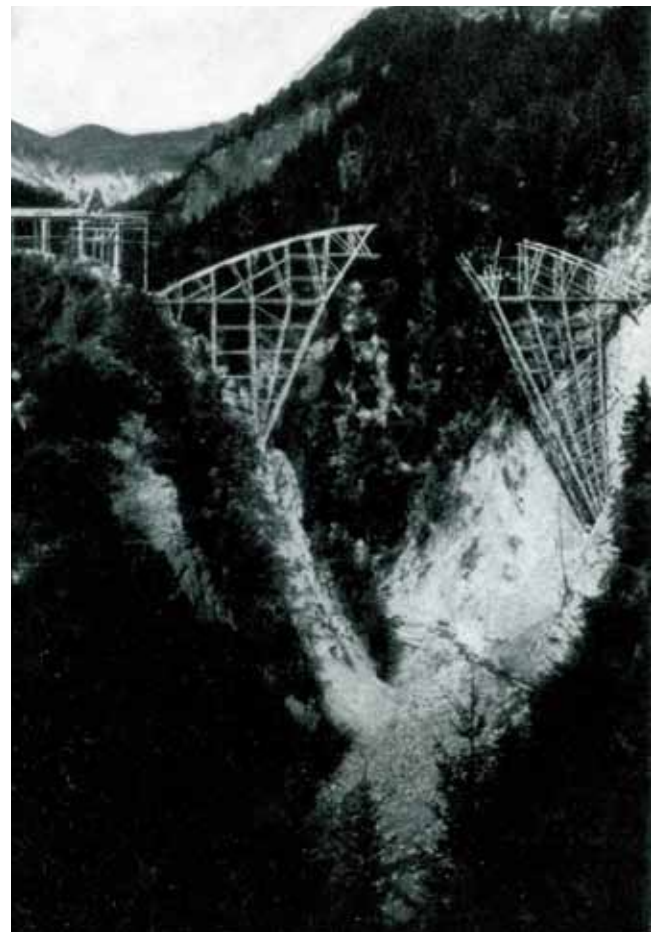


Fig. 28. Puente de Salginatobel y cimbra (Ing. Coray)

Otra cosa que sorprende en estos puentes, con una estructura tan flexible como es un arco triarticulado, es su pequeña relación flecha/luz. Renuncia pocas veces a relaciones tan arriesgadas, aún en casos tan fáciles como el Salginatobel en el que la morfología del terreno no le obligaba a mantener rebajamientos tan grandes. Pero el rebajamiento es un elemento de tensión formal en los arcos. Un arco con una relación flecha/luz grande es un arco muy tranquilo. Un arco muy rebajado es inquietante y hermoso.

En la figura 28, podemos ver el puente Salginatobel, uno de los muchos que construyó en esta tipología, con un rebajamiento de 1/6,9. Pero, en otros casos, como en el puente sobre el Simme, llega a rebajamientos de 13,6.

La segunda tipología, original de Maillart y que se ha hecho clásica en los puentes de hormigón armado, es el que podríamos bautizar como puente colgante invertido, en el cual el arco se reduce a su mínima expresión y el dintel es la viga de rigidez que permite la actuación de cargas alternadas. De este tipo tenemos:

Puente	Año	Luz	Relación flecha/luz	Ancho Dintel	Canto dintel	Espesor arcos
Schrärbach	1924	28,8	1/7,2	3,0	1,1	0,2 a 0,22
Val-Tschlei	1925	43,2	1/8,3	3,6	1,15	0,27 a 0,29
Landquart (ferrocarril)	1930	30	1/3,8	4,95	1,4	0,26 a 0,34
Spital	1930	30	1/9,2	7	0,9	0,24 a 0,28
Engstligen (pasarela)	1930	26	1/7,65	2	1,2	0,15 a 0,16
Hombach	1931	21	1/7	5	0,7	0,17 a 0,19
Traubach	1932	40	1/7,15	4	--	0,2 a 0,26
Schwandbach	1933	37,4	1/6,23	4,9	0,9	0,2

Tabla II



Fig. 29. Puente de Schwandbach



Fig. 30. Puente de la Caille

Se caracterizan por una ejecución cuidadosísima del arco, como no podía ser de otra manera, pues los fallos en la geometría de la directriz tendrían consecuencias considerables en arcos de espesores tan delgados. Las vigas de rigidez del dintel son siempre las barandillas y la referencia entre arco y tablero son diafragmas muy delgados pero extendidos a toda la anchura del arco. En este tipo de puentes es necesario mantener la cimbra hasta la terminación del puente pues el arco no puede aceptar cargas disimétricas sin tener la viga de rigidez terminada. La tradición de este tipo de puentes se ha continuado en Suiza por Christian Menn y fue utilizada con éxito por Fernández Casado en acueductos, donde la rigidez del dintel se obtiene naturalmente en la altura del cajero que conduce el agua.

El trabajo de Maillart no se redujo en los puentes exclusivamente; las losas ‘hongo’ para los edificios o las primeras estructuras laminares son obra suya.

Puentes franceses: Caquot, Freyssinet, Esquillant, etc.

El siglo XX, sobre todo en su primera mitad, corresponde a la apoteosis de la ingeniería francesa. Ésta se manifiesta con gran pureza, sencillez, adecuación tecnológica y belleza. Cuando la ingeniería francesa se expresa en toda la pureza que su racionalismo ha capacitado a la transformación de lo tecnológico en formas simples y primeras, la belleza aparece natural y contundente, lo que no pasa cuando decide adornarse con la estética de arquitectos que vulgariza y afea fuertemente su magnífica tecnología. Voy a presentar unas magníficas realizaciones que en belleza y naturalidad se decantan mejor en Esquillant, Caquot y Freyssinet, aunque producen obras absolutamente capitales en el desarrollo de los puentes arco no son tan bellas.

Albert Caquot (1881-1976)

Albert Caquot fue considerado como el más grande de los ingenieros franceses vivos durante nuestro siglo y eso que era condiscípulo y de la misma promoción de Freyssinet.

El puente de la Caille (fig. 30) fue terminado en 1928 convirtiéndose en el récord absoluto de luz de puentes de hormigón con 137,5 m. Con 8 m de ancho, fue proyectado para resistir tanto vías de ferrocarril como la carretera.

Su construcción se realizó con una cimbra completa de madera en arco de toda la luz del puente, verdadera hazaña cualquiera que sea su consideración. Esta cimbra fue montada con la ayuda de un puente colgante realizado al efecto.

En su diseño, el puente tiene un error formal importante. Durante mucho tiempo se ha estado elucubrando respecto a cómo debía ser el contacto entre arco y tablero; hay muchas opiniones y aquí se elige la peor, disponiendo un tabique que solidariza arco y tablero en una gran longitud en clave.

El arco tiene una anchura de 6,36 m, un espesor en clave de 2,8 m y un espesor en arranques de 5,5 m.

Eugene Freyssinet (1879-1962)

En 1907, Freyssinet, de 28 años de edad, proyecta el más atrevido y bello de sus puentes. Recibe el encargo de sustituir tres puentes colgantes en estado ruinoso sobre el Allier y proyecta los puentes de Le Veudre (1911-1912), Boutiron (1913) y el puente de Châtel-de-Neuvre (1914-1923).

Le Veudre (fig. 31) está formado por tres arcos de tres articulaciones, de 72,5 m de luz y una esbeltez extraordinaria de 1/15. La relación entre el arco y el tablero es una triangulación.



Fig. 31a. Puente de Veudre

La esbeltez del arco es tan importante que el año de su inauguración las flechas que se producían en clave son del 13 cm y el tema progresaba. Esto dio lugar, posteriormente, al descubrimiento de la fluencia del hormigón, que él resolvió con la abertura en clave de los arcos por medio de gatos y la eliminación de la articulación central. Este puente fue destruido en la Segunda Guerra Mundial. El de Boutiron, cerca de Vichy, se conserva pero carece de la espectacularidad de Le Veudre.



Fig. 31b. Puente de Veudre



Fig. 32. Puente de Saint-Pierre-du-Vauvray

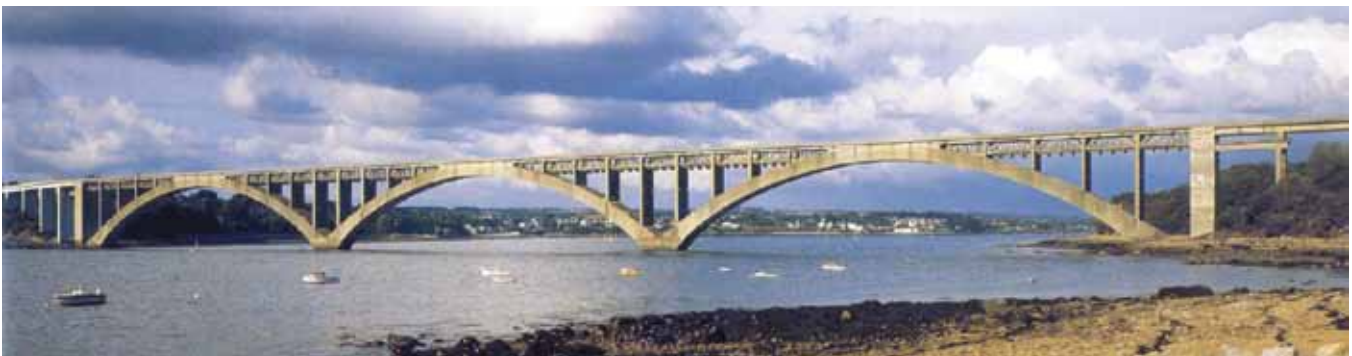


Fig. 33. Puente de Plougastel



Fig. 34. Puente de Plougastel

En 1923 termina el puente sobre el Sena de Saint-Pierre-du-Vauvray (fig. 32). Se trata de un arco empotrado de 132 m de luz, del que cuelga el tablero. Freyssinet hizo aquí lo contrario de lo habitual: construyó primero el arco por medio de una cimbra espectacular y luego hizo el tablero. Fue el mayor puente del mundo en hormigón aunque pronto el puente de la Caille, con 137,5 m de luz, lo destronó.

Entre 1926 y 1930, Freyssinet, con la empresa Limousin, construye el puente de Plougastel, sobre el río Eloru (fig. 33). Consta de tres arcos de 186,4 m de luz, con 9,5 m de anchura y 4,8 m de canto en una viga cajón de tres células. El tablero es una viga en celosía con dos calzadas, una superior con

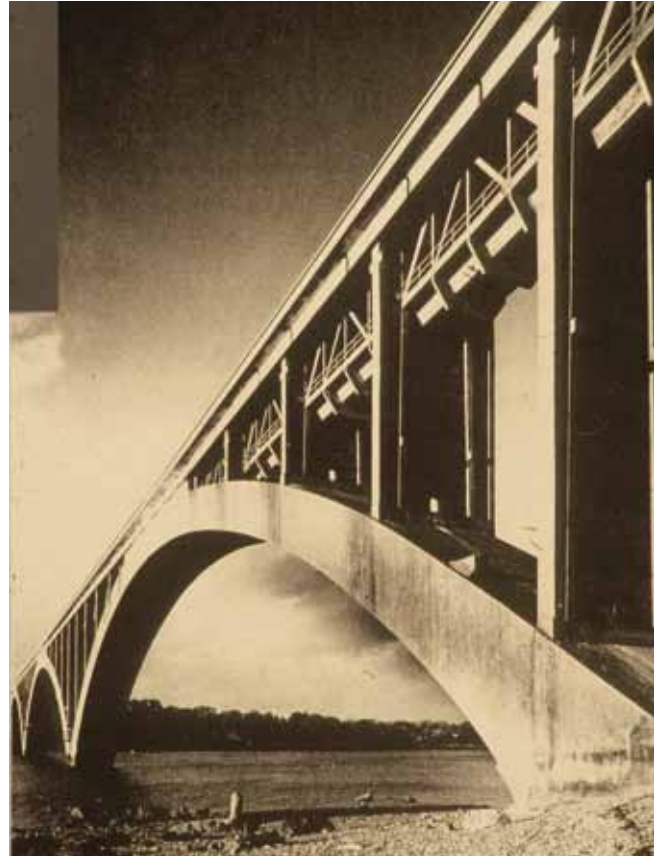


Fig. 35. Puente de Plougastel



Fig. 36. La Roche-Guyon

una calzada de 6 m de ancho y dos aceras de 1 m y una inferior para una sola línea de ferrocarril.

La construcción fue asombrosa pues fabricó una cimbra móvil en arco atirantado de 160 m de luz (fig. 34), verdadera obra maestra, que apoyaba en los cimientos y aguantaba el hormigón de la viga cajón del arco definitivo, el cual se hormigonó en tres fases, primero la losa inferior, después las almas y por último la losa superior de la viga cajón.

Una vez terminado un arco, pasaba la cimbra al vano siguiente, la cimbra de madera flotaba por dos flotadores de hormigón en los extremos los cuales estaban articulados durante el transporte (fig. 35).

Freyssinet consideraba a este puente el mejor de los realizados por él si se exceptúa a Le Veudre que admira sobre todos los demás.

Nicolas Esquillan (1902-1989)

Más conocido por sus grandes cubiertas, CNIT París, en 1955, Esquillan fue un gran constructor de puentes. Simón Boussion le nombra jefe de su sección de estudio donde realizará puentes tan notables como La Roche-Guyon, de 161 m de luz (1934), La Coudette (1943) y Conflans-Fin-d'Oise (1950).

El puente de La Roche-Guyon (1934) es un puente arco con tablero intermedio (fig. 36), que en su momento constituyó la mayor obra en cuanto a luz se refiere para los arcos con tablero intermedio. Los arcos tenían un canto de 2,65 m en clave y 1,4 m en arranques aunque con un ensanchamiento a 3 metros.

El tablero, de 10 m de ancho, era dividido en tres partes correspondientes a la zona colgada o apoyada en el arco.

El puente fue cimbrado para su construcción. El hormigonado se hizo por secciones comenzando por la losa inferior siguiendo por las almas y terminando en su losa superior. Es un puente bellísimo, simple y perfectamente bien resuelto. El puente de Conflans-Fin-d'Oise es similar a éste aunque un poco más pequeño.

El puente de Caudette (fig. 38), de 1943, es otro de los puentes diseñado por Esquillan siguiendo, en este caso, al puente de Castelmoron, proyectado y realizado por Christiani Nielsen, con péndolas inclinadas, lo que en un principio permite reducir el tamaño del arco pues la triangulación es muy favorable para la respuesta ante las cargas disimétricas pero con el inconveniente de que pueden quedar fuera de servicio si la sobrecarga en alguna introduce una compresión mayor que la tracción de peso propio.



Fig. 37. La Coudette



Fig. 38. Puente Canadá

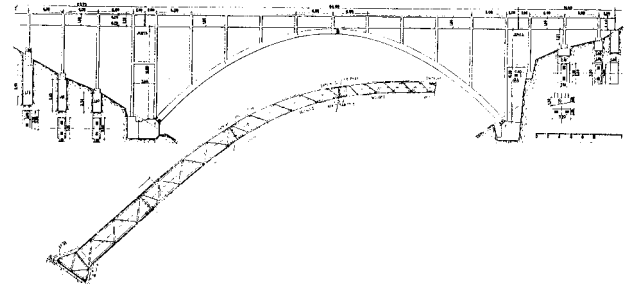


Fig. 39. Acueducto de Najerilla

El puente de La Coudette tiene 111 m de luz, un espesor constante del arco de 1,25 m x 1,1 m de anchura. La relación flecha/luz es $1/6,75$ y la separación entre arcos es de 1,2 m.

El puente se construyó sobre cimbra. Los arcos tienen un arriostramiento discontinuo en cuatro zonas del mismo.

Aunque se sale un poco de las fechas en que se desarrollan estos primeros puentes arco, en 1954, se construye el Canadá, en Treguier, un puente formado por dos arcos sin

arriostramiento entre ellos, fig. 38, con una relación flecha/luz de $1/5,5$, un canto en el centro de vano de 2,5 m y 3,6 m en el empotramiento. Su luz es de 153 m.

Carlos Fernández Casado (1905-1988)

La obra en hormigón armado se realiza en la primera parte de su vida, en la segunda utiliza el hormigón pretensado, y esporádicamente, alguna construcción metálica, nunca en puentes.

Los puentes arco de hormigón armado los realiza según tres procesos constructivos diferentes.

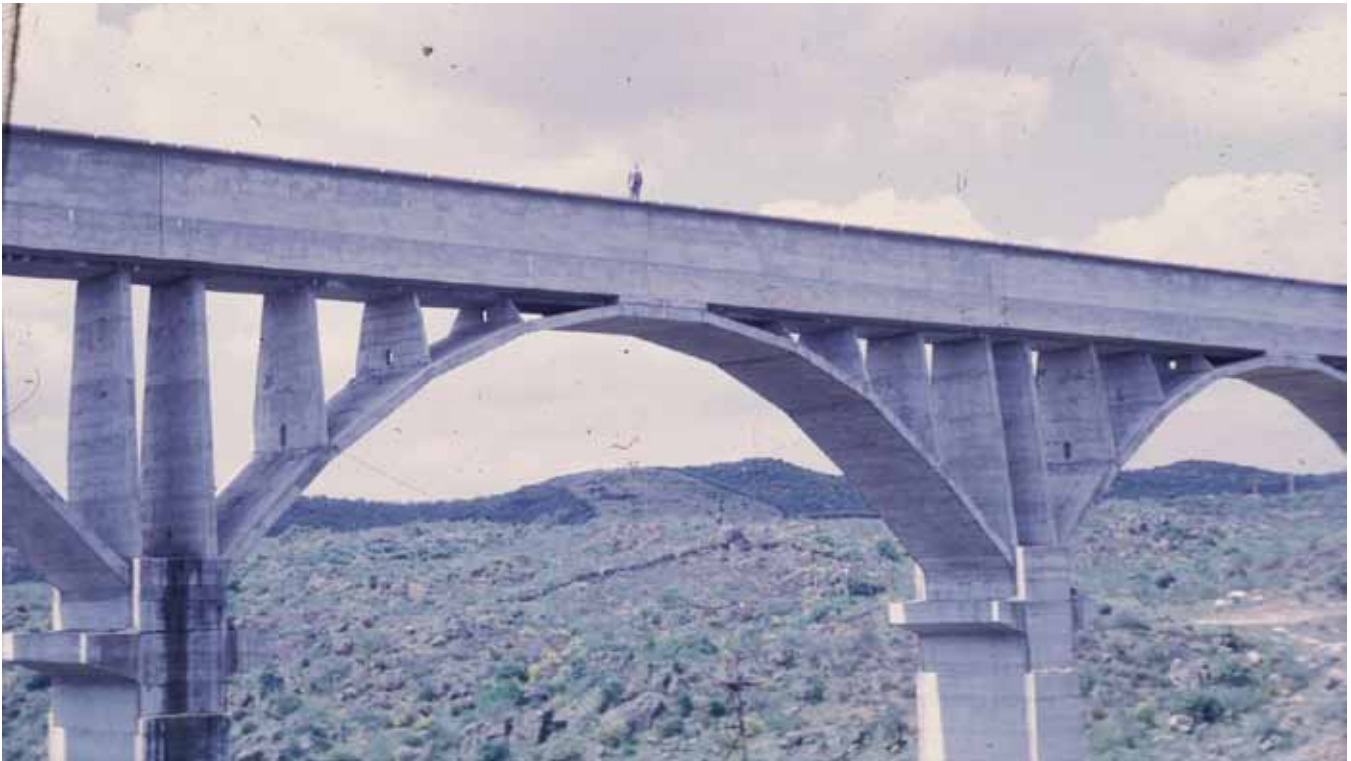


Fig. 40. Acueducto sobre el embalse de Gabriel y Galán

En el acueducto del Najerilla (fig. 39), de 1944, Fernández Casado utiliza la autocimbra metálica impuesta en la tecnología española de puentes arco por Ribera. Se trata de un arco de 60 m de luz y 16 m de flecha que soporta un cajero para el transporte del agua de 1,8 m por 1,8 m. Los arcos eran de canto variable entre 0,6 m en clave a 1,1 m en arranques.

En el acueducto del embalse de Gabriel y Galán sobre el río Alagón (fig. 40), de 1969, utiliza una morfología tipo Maillart, muy adecuada para acueductos ya que la carga es constante; el cajero, obligatoriamente para el transporte del agua, tiene gran rigidez, lo que permite ir a arcos muy delgados. Consta de cuatro grandes arcos de 60 m de luz. Se construyó sobre cimbra apoyada en el suelo, procedimiento molesto, pues la cimbra no se puede quitar hasta que el cajero está terminado.

El tercer procedimiento que utiliza para construir puentes arco es la prefabricación, procedimiento muy utilizado por él en muchas experiencias de puentes y otro tipo de estructuras. Consiste en la fabricación de un arco triarticula-

do, lo que permite su elevación en dos tramos con apoyo provisional en el centro (fig. 41). Esta estructura sirve de apoyo a tímpanos macizos que solidarizan entre sí los arcos y eliminan la rotura de la clave. Sobre ellos, se hormigona el tablero. De esta tipología tenemos el puente sobre el aliviadero de Cubillas (fig. 42), de 1954 y con 49 m de luz; el puente de Mérida (1955), con vanos arcos de 60 m de luz; y, finalmente, el de Mieres (1967), formado por un solo arco tímpano de 70 m de luz.

Eduardo Torroja (1899-1961)

Aunque el legado más importante de Torroja hay que buscarlo en las estructuras laminares, en la construcción de puentes fue notable dejando más impronta personal con los puentes metálicos que con los de hormigón.

El viaducto del Aire (1933) está formado por dos arcos gemelos de 36 m de luz enlazados entre sí en clave, arranques y un punto intermedio (fig. 43).

En un ingeniero tan fino como Torroja sobra la doble pila que se produce en los arranques del arco, los cuales determinan

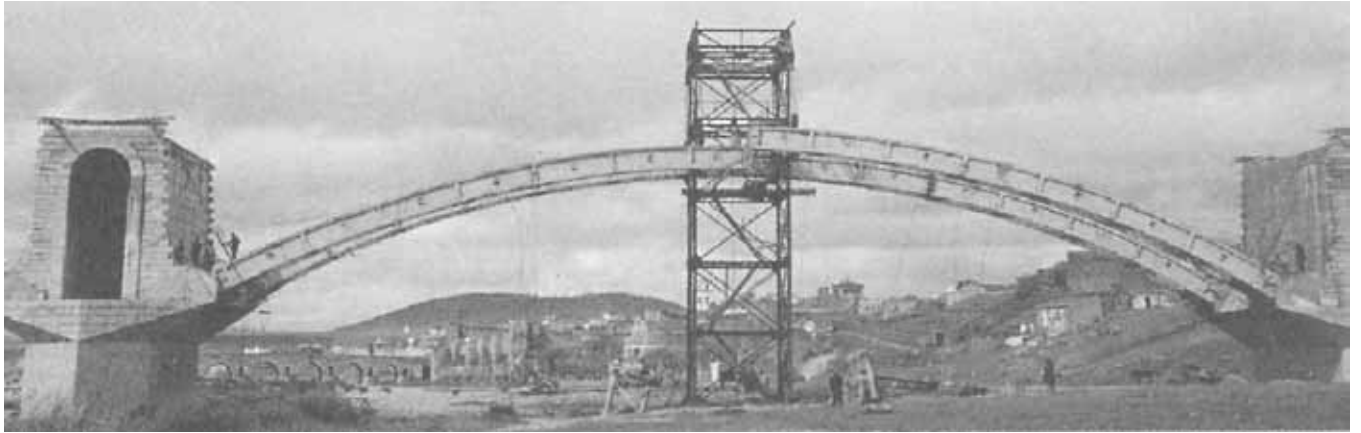


Fig. 41. Puente de Mérida



Fig. 42. Puente sobre el aliviadero de Cubillas



Fig. 43. Viaducto del Aire

una separación entre el tablero apoyado en los arcos y el tablero apoyado en la palizada (fig. 43).

En el viaducto de los 15 ojos (1933), Torroja diseña una estructura clásica y bella (fig. 44). Las luces son de 7 m y la arcada, que no es arcada, está configurada por pilares de 1,7 m en sentido longitudinal.

En esta estructura contradice su primer mandamiento estético: “Se considera mentira y por lo tanto proscrito, el que la apariencia de una construcción induzca a pensar que sus fenómenos funcional y resistente son otros totalmente diferentes a los reales que se ocultan en una estructura interior”. En este caso, lo que parecen arcos son ménsulas. Yo no creo que el puente esté mal, lo que está mal es ese primer mandamiento estético.



Fig. 44. Viaducto de los 15 Ojos

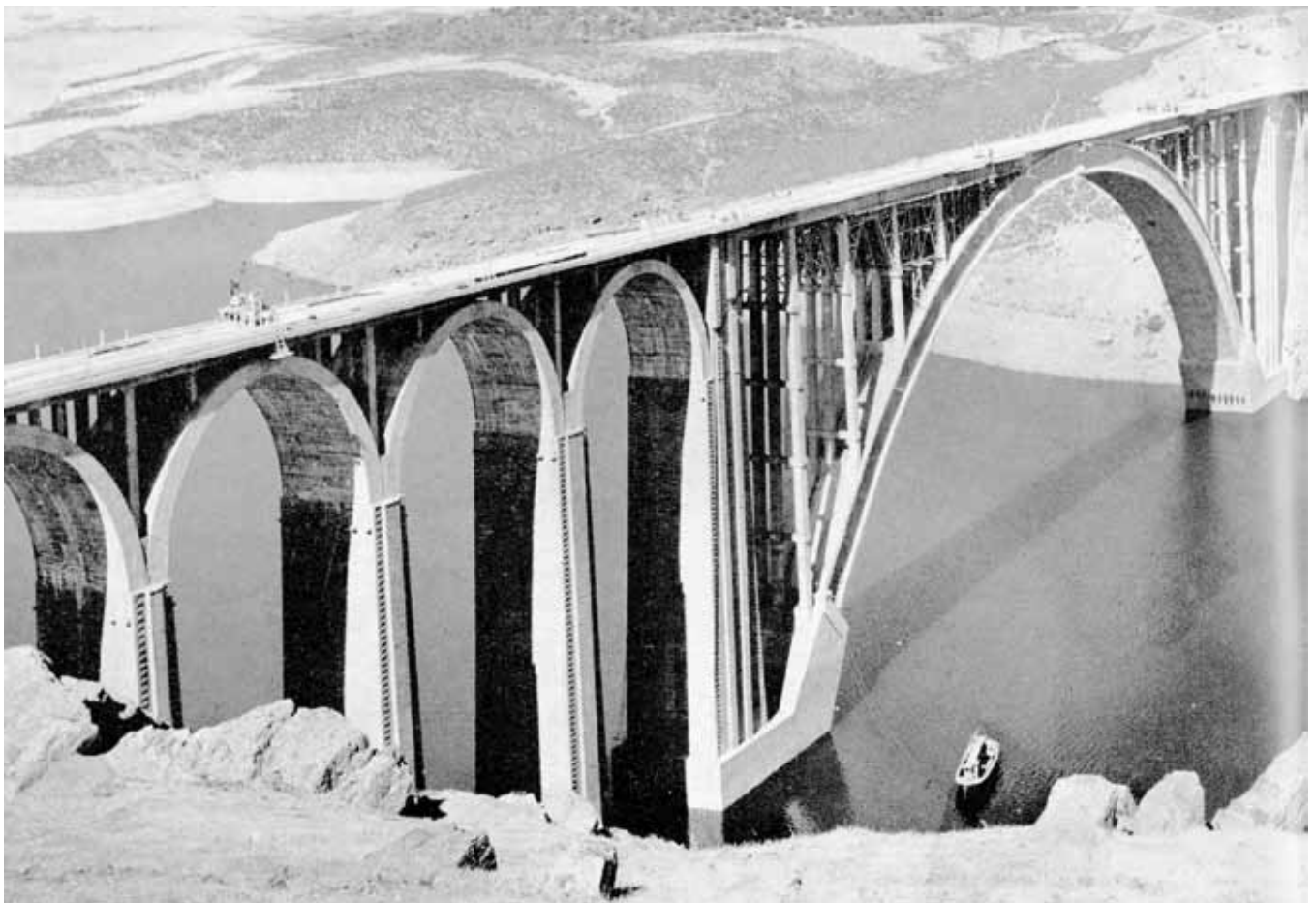


Fig. 45. Viaducto de Martín Gil



Fig. 46a. Construcción del arco de Martín Gil



Fig. 46b. Construcción del arco de Martín Gil

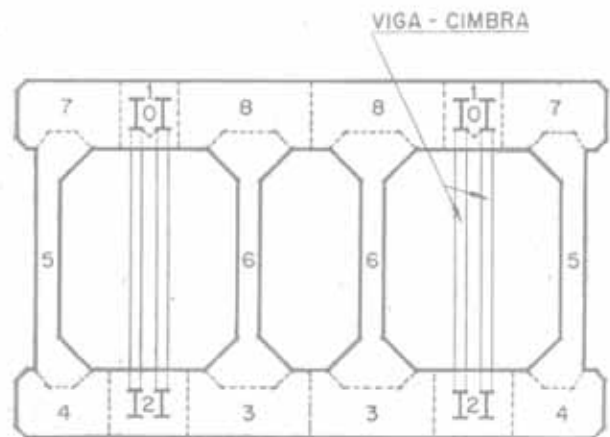


Fig. 47. Sección transversal del arco

Viaducto Martín Gil (1939)

Este viaducto no lo proyectó Torroja, sino Martín Gil (fig. 45). Es antiguo, pesado y un poco torpe siguiendo los pasos de E. Mörsch. Pero la construcción del arco, que sí fue tarea de Torroja, es heroica (fig. 46). La cimbra de madera de Martín Gil no era fiable y Torroja la cambió

por otra metálica que colocó en su sitio con un blondín y apoyándose en la cimbra de madera (fig. 46). Después fue completando poco a poco la capacidad resistente de esa cimbra de madera con hormigonados parciales y escasos (casi con una cucharilla) para no romper la también escasa autocimbra metálica (fig. 47). Una verdadera proeza.

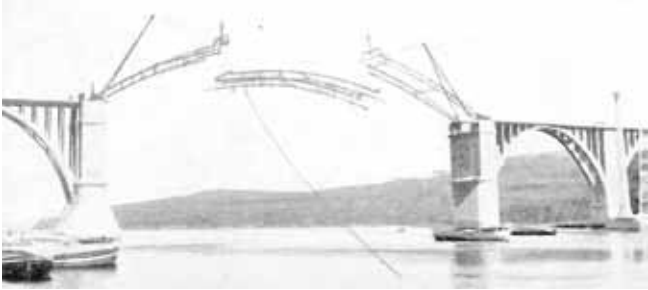


Fig. 48a. Puente del Pedrido y autocimbra

Puente del Pedrido (1943)

De nuevo Torroja soluciona la construcción del arco central del 75 m de luz (fig. 48). La armadura principal del arco formada por perfiles metálicos soldados que constituyen la autocimbra que va a permitir hormigonar el arco, en tres roscas que a su vez se dividen en dovelas para controlar los esfuerzos y las deformaciones de la autocimbra. No olvidemos que Torroja fue discípulo y trabajó con Ribera.



Fig. 48b. Puente del Pedrido



Fig. 49. Puente de Traneberg

Suecia

Por sus características geográficas y morfológicas este país da lugar a un gran número de puentes arco grandes.

El puente de Traneberg (1932-39) fue diseñado por E. Freyssinnet, tiene 181 m de luz y 26,2 m de flecha, relación flecha/luz 1/6,9 (fig. 49).

Su anchura es de 27,4 m, con 19 m para carretera y 8,4 m para vías. Dispone de dos arcos gemelos de 9 m de ancho y separados entre sí 15,2 m.

Se construyó con cimbra en acero que se empleó para los dos arcos.

El puente de Sandó de 264 m de luz es un puente formidable. Se construyó entre 1938-1943. El arco venía de un canto de 5,9 m arranques a 4 m en clave (fig. 50). Se plantea su construcción con una cimbra de madera de luz total, como en los puentes de Caquot, pero ésta se derrumbó el 31 de agosto de 1939 cuando el hormigonado de la losa inferior del arco estaba casi terminado. Hubo que construir una cimbra tradicional cimentada en el fondo del fiordo (fig. 51). **ROP**



Fig. 50. Puente de Sandó

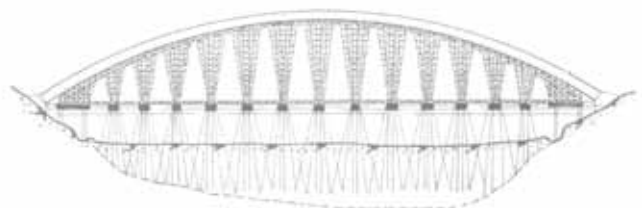
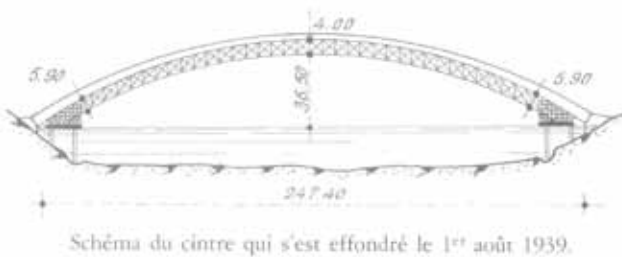


Fig. 51

El desarrollo de los puentes arco de hormigón



Javier Manterola Armisén

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Consejero delegado de CFCSL

Como ya hemos citado, la aparición del hormigón pretensado y, sobre todo, su rápida extensión por todo el planeta, hizo que los arcos de hormigón disminuyesen en número, pues el pretensado, unido a la construcción en avance en voladizo, era una combinación decisiva para derrotar

económicamente cualquier alternativa. Y es precisamente Freyssinet quien, en 1952, construye los dos puentes de la autopista Guaiva (fig. 1), en Venezuela, de 150 m de luz con una relación flecha/luz de 4,75 y un canto del arco constante de $L/50$.



Fig. 1. Puente en la autopista Guaiva (Venezuela)



Fig. 2. Puente en la autopista Guayra (Venezuela)



Fig. 4. Cimbra del puente de la Fiumarella



Fig. 3. Puente de la Fiumarella

Este puente tiene una particularidad importante, es un arco cimbrado y construido en avance en voladizo, lo que se realiza sobre el tercio lateral del puente, mientras que el centro del arco se apoya en una cimbra central la cual se sube y se cuelga de la parte ya construida (fig. 2).

El arco es biarticulado. Quizás Freyssinet no se fiaba del control de la deformación del arco en su arranque debido a los cambios de temperatura sobre los tirantes de cuelgue.

El puente de la Fiumarella, de Ricardo Morendi (1961), tiene 231 m de luz. Se desarrolla sobre un valle muy profundo, con la rasante del puente a 100 m del fondo. Es un arco

triarticulado, en clave y próximo a los arranques del arco, el cual se bifurca en dos patas. La relación flecha/luz es muy grande 1/3.5 (fig. 3).

La cimbra es de tubos, enormemente grande, apoyada en castilletes inferiores, muy al estilo italiano los cuales son grandes especialistas en este tipo de cimbras cuajadas (fig. 4)

Este puente presenta una particularidad única –sólo desarrollada por Morandi–: las pilas que soportan el tablero no son verticales sino normales al arco, las cuales hacen juego con las pilas de los viaductos de acceso.



Fig. 5. Pasarela del torrente de Lussia



Fig. 6a. Giro y abatimiento del arco del torrente Lussia

En la pasarela sobre el torrente Lussia (fig. 5), de 1953-54, Morandi desarrolla, por primera vez, según mi conocimiento, el giro de los dos semiarcos de un arco de 77,5 m de luz, desde una posición vertical a su situación definitiva (fig. 6a).

Esto ya lo habían hecho los franceses pero sólo con la cimbra de madera (fig. 6b).

Este mismo procedimiento lo realiza Morandi el mismo año (1953-1955) en el puente sobre el río Storms en Sudáfrica (fig. 7). El puente de 100 m de luz y 20 m de flecha se construye girando los semiarcos desde una rótula provisional dispuesta en el punto donde la segunda pila inclinada, contada desde



Fig. 6b. Giro de la cimbra de madera de un puente francés de ferrocarril



Fig. 7. Puente sobre el río Storms



**Fig. 8. Puente sobre el río Storms.
Giro de los arcos principales**

el estribo, se une al arco. Allí dispone una pila provisional vertical (fig. 8).

Como en el puente de la Fiumarella, las pilas existentes entre el dintel y el arco son normales al arco. Yo creo que no hay ventaja con esta disposición y descompensa visualmente al puente. El espesor del arco en clave es de 1,21 m y en arranque de 2,5 m.

El puente de la Arrábida, de Edgar Cardoso, tiene 270 m de luz y se terminó en 1963. Es un puente formidable en la desembocadura del Duero, en Oporto. Tiene una relación de flecha/luz de 1/5,19 y un espesor en clave de $L/90$ y en arranques de $L/60$ (fig. 9), dimensionamiento muy normal en aquella época.

Está formado por dos cajones bicelulares, casi sin armadura longitudinal pues la compresión del arco y la forma de la sección permite que bajo las flexiones máximas, la resultante del axil no salga del núcleo central de la sección (fig. 10).

La cimbra fue un arco metálico completo, carísimo pues pensaba usarse en otros puentes similares, lo que no ocurrió.

El puente de Parramatta (1964) fue récord mundial de luz en arcos de hormigón con sus 304,7 m. Se trata de un puente con una flecha en el centro de 41,3 m lo que le proporciona una relación flecha/luz de 1/7,46 lo que le hace especialmente hermoso si no fuese por las vigas cabezal existentes sobre las pilas. El espesor en clave del arco es $L/75$ y en arranques $L/43,5$ (fig. 11).

Todo está prefabricado y cimbrado (fig. 12). Se construyó una cimbra metálica apoyada sobre soportes verticales (se dejó entre ellos un ancho mayor en un punto para el galibo de paso de barcos en el puerto Sídney).

Las dovelas se unen a 'hueso' sin ninguna armadura pasante y sólo tuvo un cosido transversal del arco por diafragmas prefabricados.

El arco está formado por cuatro cajones que soportan un tablero de vigas prefabricadas (fig. 13).

Yugoslavia

De los años 40 a los años 80 del siglo pasado, el trabajo en arcos de hormigón de un equipo formado por yugoslavos



Fig. 9. Puente de Arrábida



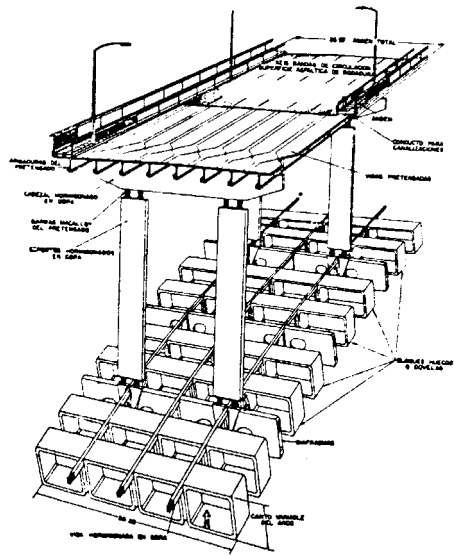
Fig.10. Puente de Arrábida. Elevación de la parte central de la cimbra metálica



Fig. 11. Puente de Parramatta



Fig. 12. Puente de Parramatta



PUENTE DE PARRAMATA L = 304.0 M (1964)

Fig. 13. Axonometría de la estructura del puente de Parramatta

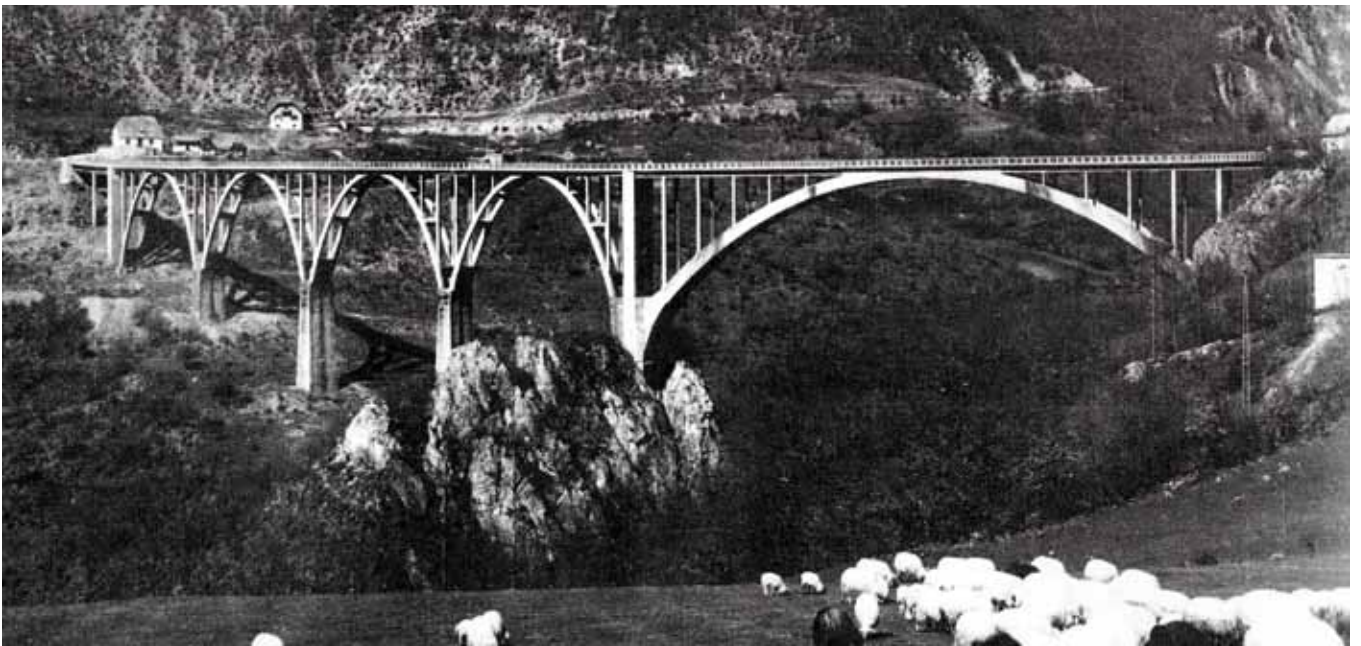


Fig. 14. Puente de Durdevica

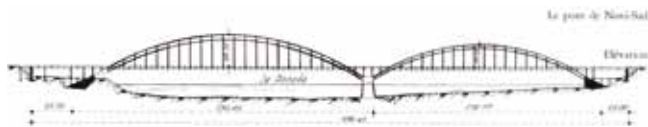


Fig. 15. Puente de Novi Sad

es formidable, no sólo batieron todos los récords sino que, además, sus puentes fueron muy hermosos.

Empezaron en 1938-40 con el puente de Durdevica sobre Tara. Se trata de un viaducto formado por cuatro arcos parabólicos de 40 y 50 m de luz que se rematan por otro arco de 136,4 m de luz (fig. 14).

Este hecho no es casual. En 1959/61 hacen el puente de Novi Sad con dos arcos intermedios de 235 y 178 m de luz sobre el río Danubio (fig. 15). Es uno de los pocos puentes arco de hormigón con tablero intermedio.

Para la ejecución de este puente no se utilizó cimbra alguna sino que se construyó en avance en voladizo atirantado con un pequeño carro que hormigonaba los arcos.

A continuación, en 1964-66 construyen el puente de Sibenik de 246 m de luz y una flecha de 30,3 m $f/L=1/8$ (fig. 16).

El puente de Pag es de 1964-66 tiene 193 m de luz, 27,5 m de flecha y una relación flecha/luz de 1,7 m.

Finalmente, de esta familia el más importante es el puente que une Croacia con la isla de Krk formado por dos arcos separados por un promontorio, el más grande, récord mundial durante muchos años, de 390 m de luz, y el más pequeño



Fig. 16a. Construcción del puente de Sibenik



Fig. 16b. Julio Martínez Calzón y Miguel Aguiló ante el puente de Sibenik

de 244 m de luz (fig. 17), ambos construidos por avance en voladizo atirantado, con unos atirantamientos curiosos pues, para no levantar mucho la torre, se quebró el tirante que sostiene las partes más adelantadas.

También en Yugoslavia, pero en Serbia, se encuentra el puente sobre el río Tisa, puente arco con tablero inferior de 154 m de luz y tipo Maillart a la inversa, con el arco superior muy delgado, 0,7 m de espesor, y el tablero grueso para absorber las flexiones de las cargas no funiculares (fig. 18). Otro raro puente de hormigón en tablero inferior.

República Sudafricana

Entre los años 1980-1987 del siglo pasado, se construyen tres arcos excepcionales en la república sudafricana. El



Fig. 17a. Puente de la isla Krk



Fig. 17b. Puente de la isla Krk

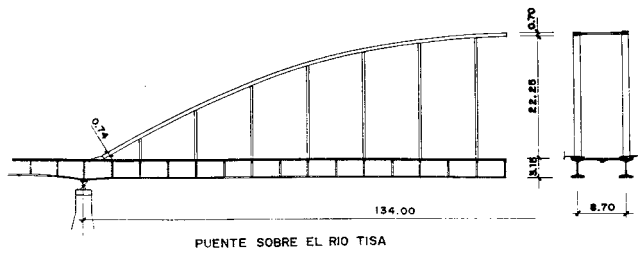


Fig. 18. Puente sobre el río Tisa



Fig. 19a. Puente de Bloukrans

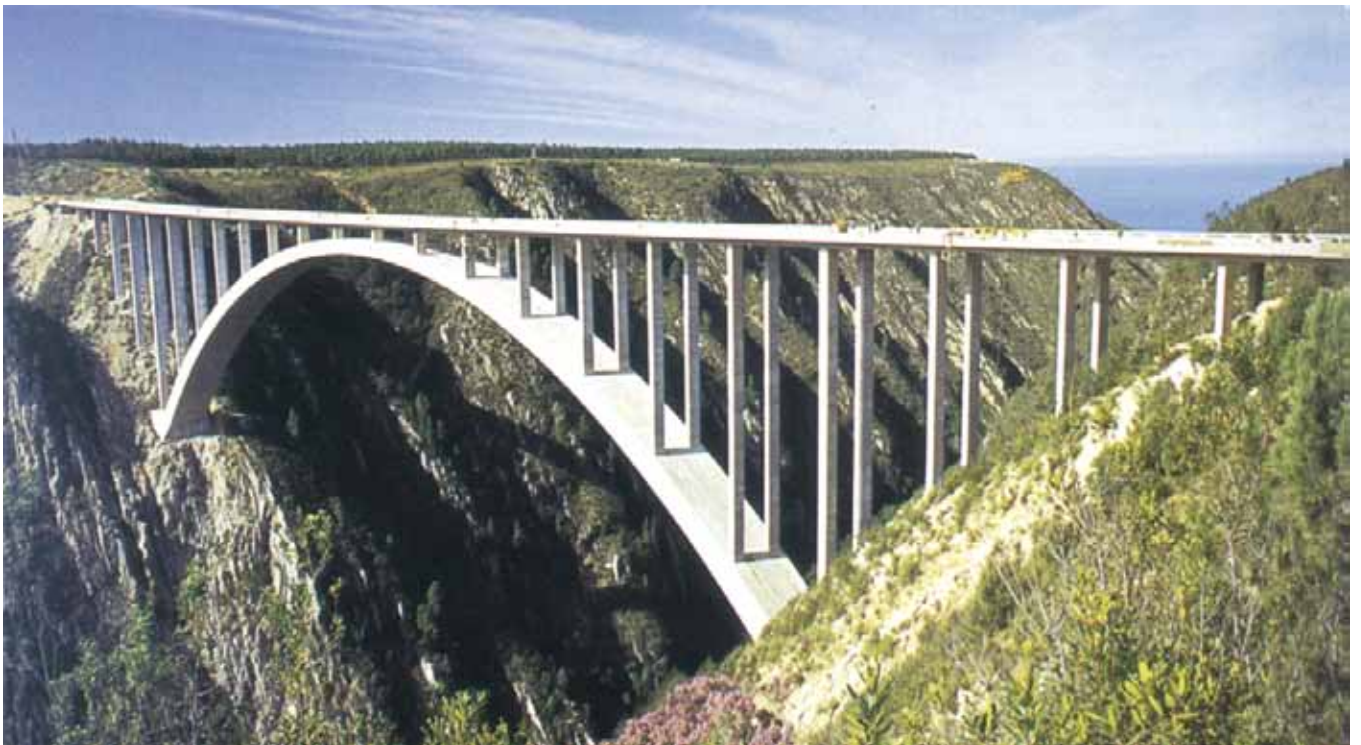


Fig. 19b. Puente de Bloukrans



Fig. 20. Puente Romita

puente sobre el Bobbejans de 165 m de luz y 34 m de flecha, el puente sobre el Groot de 189 m de luz y 33 m de flecha y el más grande de todos el puente sobre el Bloukrans de 272 m de luz y 62,00 m de flecha. Este último se desarrolla a 216 m sobre el lecho del río Bloukrans y los otros dos a 170 m (fig. 19).

Todos los puentes tienen la misma morfología, sección cajón completa para el arco construido en avance en voladizo y doble pila para soporte del dintel separados 19 m entre sí, en sentido longitudinal.

Directrices singulares

El puente arco clásico con directriz curva antifunicular de una carga más o menos uniformemente repartida empieza a no ser indiscutible. Existe una frontera, a veces difícil entre los arcos y los pórticos de patas inclinadas cuya geometría es bastante funicular. Silvano Zorzi (1921) realiza dos puentes arco sobre el Arno que corresponden a este nuevo planteamiento. El puente Romita sobre el Arno (1964), de 136 m de luz, sigue una directriz poligonal (fig. 20) que canaliza perfectamente las compresiones de arco poligonal. Las vigas prefabricadas utilizadas tienen 36 m de luz.

Lo mismo podemos decir del arco puente sobre el río Bacunayagua de 114 m de luz (fig. 21), en Cuba (1962), de L. Sánchez J. R. Cancio, cuya construcción se realizó girando la cimbra metálica sobre la que se hormigonó (fig. 22)

Otra obra más compleja, también de Silvano Zorzi, es el puente sobre el río Arno (fig. 23), de 112 m de luz y construido en 1963.



Fig. 21



Fig. 22



Fig. 23

Con esta configuración resuelve bien el problema que ocurre en todo puente arco cuando es pequeño, en los cuales el antifunicular curvo obliga a una separación de pilas muy pequeña que no encaja bien con un diseño adecuado de los tramos de acceso. Aquí Zorzi utiliza una luz de 36 m para las vigas, el arco se convierte en un pórtico con pilas inclinadas algo curvas que lo asemejan a los arcos. Recordando la pasarela sobre el torrente del Llusia (fig. 5), Morandi hace lo mismo. Es un puente nuevo y muy hermoso.

En el puente sobre el Glen (fig. 24), de 114 m de luz, el dintel en lugar de ser prefabricado como los de Zorzi, es una viga cajón continua, peor diseñado a mi entender.



Fig. 24



Fig. 25a . Puente de Natchez



Fig. 25b. Puente de Natchez

Un planteamiento similar se encuentra en el puente de Santiago, en Zaragoza, de Tomas Mur, con vanos de 65 m.

En el Natchez Bridge (fig. 25), de 1995, los dos arcos de 177,4 m y 140,8 m tienen cada uno dos únicos apoyos para soportar el tablero de sección cajón. Toda la obra está realizada por dovelas prefabricadas y los arcos construidos en avance en voladizo con dovelas de 5 m de anchura y canto de 3 m en clave y 4 m en arranques. El dintel varía entre 4,4 m de canto en el apoyo en el arco y 2,3 m en el centro del vano.

Otra disposición heterodoxa y que nosotros hemos utilizado en algunas ocasiones se configura en el puente Juan de Austria de 120 m de luz, de 1986 (fig. 26).

La forma responde también al mismo principio, hacer los vanos de acceso grandes y el arco compensado visualmente. No como en el puente de Glen (fig. 24), donde no existe



Fig. 27

ninguna intención de hacer un todo conjunto sino todo lo contrario, por un lado el arco y por otro el dintel.

Un viaducto de ferrocarril absolutamente fundamental para muchas obras del AVE y que inició toda una tipología es Alemania (fig. 27), en el que se utiliza un arco apuntado que



Fig. 26



Fig. 28. Viaducto sobre el río Deza

en unos casos sirve para absorber frenado o en otras y, además, para cruzar algún obstáculo importante. En este caso, el arco apuntado determina los mismos luces estándar en el viaducto de acceso que en el vano principal, con lo cual empujar el tablero se realiza sin problema complementario. En el viaducto sobre el río Deza, en Orense, de 1.175 m de longitud y 75 m de luz normal y 150 m de luz en arco, es uno de los muchos ejemplos realizados en España (fig. 28).

Tres arcos tipo Maillart

Empezamos por un clásico, el puente de Viamala sobre el Rin en Suiza de Christian Menn de 86 m de luz (fig. 29). Este puente está mejor equilibrado visualmente que los de Maillart, pues los arcos, delgados, y el dintel grueso para recoger la rigidez del puente ante las sobrecargas, están mejor que los de su maestro. Christian Menn ha construido muchos otros puentes de este tipo como los del acceso sur del paso de S. Bernardino de 112 m de luz.

El segundo es el puente Infante D. Enrique, en Oporto, de F. Millanes, Fernández Ordoñez y Aldao da Fonseca, es muy grande,



Fig. 29. Puente de Viamola



Fig. 30. Puente Infante D. Enrique



Fig. 31

280 m de luz y es el típico puente de arco delgado y dintel grueso (fig. 30), se construyó por avance en voladizo triangulando los trapecios configurados por pilas, arco y dinteles.

Asombra un poco su encaje en el terreno estando situado entre el puente S. Luis, de Seyrig, y el puente de Eiffel, los dos van a cimentar al río, mientras que éste se queda colgado en la parte superior (fig. 31).

El tercero es un puente, el puente de S. Sebastián (2006) en México, de Leonardo Fernández Troyano. Tiene 137 m de luz y el problema es el mismo que Maillart se planteó en Salginatobel (fig. 32). Naturalmente, los años han pasado,



Fig. 32. Puente San Sebastián



Fig. 33. Puente de los Tilos

70 exactamente, y los medios y posibilidades también. La gigantesca cimbra de madera se sustituyó por un arco metálico montado con un blondin y se elimina la palizada entre arco y tablero del puente de Maillart.

Dos maneras de construir un arco en avance en voladizo

En el puente de los Tilos (fig. 33), de 255 m de luz, arco clásico, precioso, de Santiago Pérez-Fadón y en el puente de Hokawatsu de 170 m de luz (fig. 34), triangulan los trapecios haciendo una celosía completa que funciona muy bien, procedimiento utilizado por muchos puentes en España.

Tiene una variante en la cual no se realiza el dintel para poder crear la viga en celosía, sino que se hace una triangulación artificial como en el viaducto de Almonte, de C. Siegrist, con 185 m de luz (fig. 35).

El segundo procedimiento consiste en mantener el atirantamiento por medio de una torre artificial que mantenga la inclinación de los tirantes (fig. 19).

Tres puentes grandes

El puente Waxian sobre Yanstze, de 420 m de luz, de 1997 (fig. 35), es el mayor puente arco de hormigón del mundo. Se realizó con una autocimbra de tubos que se hormigonó a la manera en que trabajaba Ribera (fig. 36).

El puente de la Regenta de J. J. Arenas fue el primer puente arco grande construido en España, tiene 190 m de luz y fue construido en avance en voladizo triangulando los trapecios.

El puente sobre el embalse de Contreras tiene 264 m de luz y se construyó en 2009. Tiene todo lo que entendemos por un hermoso puente arco, fig. 37, es muy poco peraltado, la relación $f/L = 1/6,8$.



Fig. 34. Puente Hokawatsu



Fig. 35. Viaducto de Almonte

El dintel es continuo, con las mismas luces cuando discurre sobre el terreno o sobre el arco, lo que sólo se puede hacer cuando los arcos son bastante grandes. Es delgado, con el canto del arco próximo al $L/100$, una sola pila en sección transversal para evitar el cruce visual de pilas en la visión oblicua (fig. 38). Incluso es ligeramente poligonal para significar la acción de la pila sobre el arco.

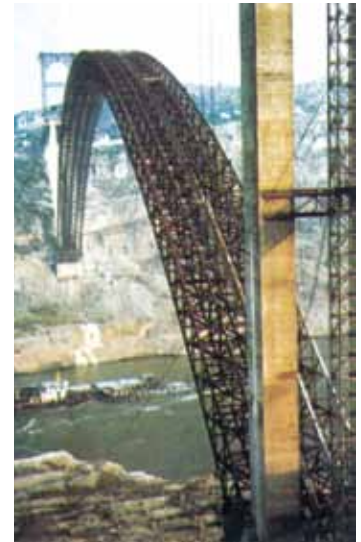


Fig. 36. Puente de Waxian



Fig. 37. Puente de Contreras



Fig. 38. Puente de Contreras

La construcción se realiza en avance en voladizo con un voladizo más corto que la longitud del semiarco pues tuvimos la suerte de que el pantano de Contreras estaba muy bajo y se pudo cimentar la pila provisional que ahorró mucho atirantamiento (fig. 39). Además, la ejecución no experimentó retraso ni encarecimiento.

Puentes de hormigón con tablero inferior

Es muy poco frecuente este tipo de puentes en hormigón, el arco hay que cimbrarlo normalmente sobre un tablero que también está cimbrado. Alguna vez se ha hecho construyendo el arco en voladizo y después colgar allí el tablero. Los dos puentes que presento, uno pequeño y otro grande, se construyeron de la primera de las maneras indicadas.

El puente de Alcantarilla está constituido por un viaducto muy largo que se desarrolla sobre la zona inundable al río Segura en Alcantarilla. El viaducto se ordena según dos losas aligeradas de 33,5 m de luz y 1,3 m de canto. Cuando se llega al río Segura, la luz debe crecer hasta 66 m. Como queríamos mantener el dintel le añadimos un arco superior de hormigón (fig. 40).

El arco se sitúa en el eje de los dos dinteles y es necesario disponer un tejido transversal de vigas (fig. 41) que transmiten la carga de los dinteles al arco. Como los dinteles son continuos, al llegar al apoyo del arco descargan al mismo de parte de la carga de los dos dinteles en las proximidades al apoyo y el tejido de vigas transversales puede reducirse. Los tirantes están recubiertos por camisas de acero inoxidable y el apoyo provisional del dintel formado por parejas de pilas provisionales se volaron para descimbrar –después de haberlos despegado del dintel– (fig. 42).

El puente de la exposición de Zaragoza 2008 de J.J. Arenas es un puente formidable y de una gran luz $L= 215,6$ m. Sigue el ejemplo que ya desarrolló con M. Pantaleón para el puente de Sevilla de la Expo, pero agrandándolo y ensanchándolo, confiriéndole monumentalidad característica a que es proclive el Prof. Arenas (fig. 43). A la anchura necesaria para un puente de autopista le ha añadido unas aceras generosas que ha cubierto con gran maestría. El dintel se construyó empujándolo sobre apoyos provisionales sobre el que se cimbró el arco y su descimbramiento se realizó por apertura en clave, fig. 44



Fig. 39. Construcción del puente de Contreras



Fig. 40. Puente de Alcantarilla



Fig. 41. Puente de Alcantarilla



Fig. 42. Voladura del puente de Alcantarilla



Fig. 43. Puente del Tercer Milenio

Dos puentes arco que no son arcos

El puente Rij en Australia tiene tres luces de 73 m +183 m + 73 m con dos articulaciones deslizantes en el centro del arco donde acaban las triangulaciones (fig. 45).

Realmente se diferencia de otros puentes triangulados como el mismo puente de Veurdre (fig. 31, 1ª parte) de Freyssinet, en la articulación deslizante del dintel. Si Freyssinet hubiese unido entre sí los tableros de sus tres arcos, tendríamos un puente continuo en celosía sin apenas empuje horizontal sobre los cimientos, pero los dejó con articulaciones deslizantes y el mismo mecanismo de trabajo que le quedó es funcionar como arco. También es la configuración resistente



Fig. 44. Puente del Tercer Milenio



Fig. 45. Puente Rij



Fig. 46. Puente Rij



Fig. 47. Construcción del puente Rij

de todos los arcos construidos en avance en voladizo cuando se triangulan los trapecios. Toda la estructura es prefabricada y construida en avance en voladizo (fig. 46, 47).

El segundo puente arco que no es arco es nuestro puente de Zamora configurado por tres luces centrales sobre el río de 90 m y dos laterales en la margen derecha (fig. 48). Nuestra primera intención, bueno la segunda, fue hacer una arcada múltiple a imagen del puente viejo medieval de Zamora situado a menos de 1 km aguas arriba.

Pero vimos que si a esa arcada se le daba continuidad con pretensado por el cordón superior se convertía en una viga cajón de canto variable que no introducía esfuerzos horizontales en cimientos. La elección no fue difícil y construimos un dintel continuo en voladizos sucesivos (fig. 49) con carros de avance normales.

El puente presenta varias particularidades que no afectan al tema de que estamos tratando (fig. 50). **ROP**



Fig. 48. Puente de Zamora



Fig. 49



Fig. 50



▲ Línea de Alta Velocidad Ankara-Estambul. Turquía.



▲ Puente Arcos de Alconétar. España.

▼ Puente Fernández Casado. España.



Más de cien años comprometidos
con el crecimiento y el progreso



OHL

La **fuerza** de un gran grupo **internacional**
de **concesiones** y **construcción**

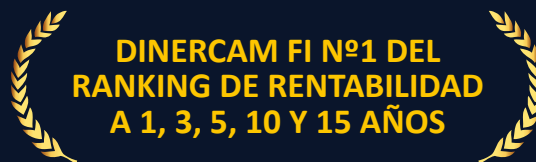
www.ohl.es



Los Fondos de Inversión Foncam FI y Dinercam FI de nuevo en lo más alto gracias a la confianza y apoyo de nuestros clientes que siempre han mostrado.



Foncam FI (Nº REG. CNMV 659), el Fondo de Renta Fija de Gestifonsa más galardonado, recibe 5 estrellas de Morningstar, la categoría más alta que concede la firma de calificación y que sólo 7 Fondos españoles más han recibido este curso 2013. Morningstar es un proveedor líder de análisis independiente para la inversión, una fuente reconocida de información exhaustiva a través de una amplia gama de disciplinas de inversión que opera en 27 países.



Dinercam FI (Nº REG. CNMV 3449), el Fondo monetario de Gestifonsa, se encuentra en el número 1 del ranking de rentabilidad a 1, 3, 5, 10 y 15 años, según Informe de Inverco primer semestre de 2013.

Disclaimer: IMPORTANTE: para invertir en estos productos es necesario tener conocimientos y experiencia en los Mercados conforme a la Normativa MiFID. Existe riesgo de pérdida de capital invertido. Rentabilidades pasadas no aseguran rentabilidades futuras. Las cifras y datos contenidos en este anuncio no constituyen recomendación de compra o venta de una inversión y tienen estricto contenido publicitario. Los Fondos de Inversión disponen de un folleto informativo y documento con los datos fundamentales para el inversor (DFI) que pueden consultarse en las oficinas de GESTIFONSA SGIC, S.A.U., Nº Registro Administrativo CNMV-123, C/ Almagro 8 planta 5ª, 28010 Madrid, en la página web de la Entidad (www.gestifonsa.es) y en la página web de la Comisión Nacional del Mercado de Valores (www.cnmv.es). La Entidad Depositaria de los Fondos de Inversión es Banco Caminos S.A., Entidad de Crédito registrada en el Banco de España con el código de Entidad 0234.