



La revista de los
Ingenieros de Caminos,
Canales y Puertos

3562 FEBRERO 2015

REVISTA DE
OBRAS PÚBLICAS

ROP



MONOGRÁFICO

Puentes arco (II). Los puentes arco en la actualidad

Coordinado por Conchita Lucas Serrano



Porque creemos que la innovación es la única manera de ser competitivos.
Porque creemos que el único mercado es el mundo entero.
Si crees como nosotros. **Creemos contigo.**

Sacyr

www.sacyr.com

60 AÑOS DEL COLEGIO

LOS PUENTES ARCO EN LA ACTUALIDAD

- 9 **Puentes arco. Evolución y compresión**
Juan José Arenas
-
- 23 **Construcción de puentes arco**
Luis M. Viartola Laborda
-
- 37 **Los arcos más grandes del mundo**
Santiago Pérez-Fadón y Juan José Sánchez Ramírez
-
- 51 **Algunas consideraciones sobre la intervención en puentes bóveda de piedra o ladrillo**
Javier León
-
- 63 **Incluso los puentes arco se deterioran. Conservación y mantenimiento**
Gonzalo Arias Hofman
-

REALIZACIONES

- 73 **Puente arco de alta velocidad sobre el río Almonte**
Guillermo Capellán Miguel
-
- 83 **Puente sobre el río Tajo en el embalse de Alcántara para ferrocarril de alta velocidad**
Javier Manterola Armisén, Antonio Martínez Cutillas y Borja Martín Martínez
-
- 93 **Rehabilitación del puente-viaducto de Requejo (Puente de Pino)**
José Antonio Llombart Jaques y David Rodríguez Bragado
-

DIRECTORIO DE PUENTES ARCO

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

Dépósito 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>
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

Puente sobre el río Tajo



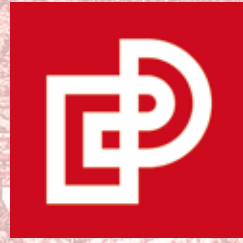
**FUNDACIÓN
CAMINOS**



**FUNDACIÓN
CAMINOS**



**FUNDACIÓN
CAMINOS**



**FUNDACIÓN
CAMINOS**



**FUNDACIÓN
CAMINOS**

La fuerza de los ingenieros de Caminos

El Think Tank que proyecta la profesión en la sociedad

FUNDACIÓN CAMINOS



**FUNDACIÓN
CAMINOS**



**FUNDACIÓN
CAMINOS**



**FUNDACIÓN
CAMINOS**



**FUNDACIÓN
CAMINOS**



**FUNDACIÓN
CAMINOS**

La vicepresidenta del Gobierno, Soraya Sáenz de Santamaría, estuvo presente en la celebración de los 60 años del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

Los presupuestos generales del Estado para 2015 prevén un incremento de la inversión en infraestructuras del 8,8 %

La vicepresidenta del Gobierno, Soraya Sáenz de Santamaría, participó, el pasado 28 de enero, en la jornada 'Cambio en el horizonte económico: recuperación y empleo', con motivo del 60 aniversario del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, "para celebrar la trayectoria de éxito de esta institución, aprovechando para repasar una trayectoria igualmente exitosa y prometedora, como es la de la recuperación económica que hemos inaugurado en España".

Los Presupuestos Generales del Estado para 2015 prevén un incremento de la inversión en infraestructuras del 8,8 %, hasta los 9.469,3 millones –la primera subida desde 2008–. A ello habrá que añadir el Fondo Europeo de Inversiones Estratégicas (EFSI), que movilizará 315.000 millones de euros entre 2015 y 2017 para reactivar la economía de la UE y que se pretende esté operativo en junio.

La vicepresidenta quiso destacar el papel fundamental de los ingenieros de Caminos: "Habéis sido y sois pieza fundamental en el desarrollo de nuestra economía y el progreso del país. Así, la ingeniería es palanca de cambio, desarrollo y prosperidad". Y puso de manifiesto "la capacidad de estos profesionales innovadores que encontraron soluciones audaces a retos que se creían imposibles. Gracias a ellos (a vosotros), la marca España es hoy un referente mundial en ingeniería civil".



Soraya Sáenz de Santamaría saludando a varios miembros de la Junta de Gobierno del Colegio



Juan A. Santamera, durante su discurso



Soraya Sáenz de Santamaría

Nuestro país cuenta con la mayor red de autopistas y autovías de Europa y la segunda red de alta velocidad ferroviaria del mundo. Empresas españolas de ingeniería e infraestructuras acumulan una cartera de contratos en el extranjero que supera los 75.000 millones de euros. Sólo en 2013, obtuvieron contratos por valor de más de 45.500 millones. Más del 80 % de los proyectos de las grandes compañías corresponden a contratos en el extranjero.

“Hoy somos más competitivos en el exterior y hemos recuperado el crecimiento en España”, continuó Sáenz de Santamaría. Nuestra economía acumula cinco trimestres consecutivos de crecimiento. El avance en el tercer trimestre de 2014 fue del 0,5 %, mientras que Alemania creció un 0,1 %, Francia

un 0,3 % e Italia registró un crecimiento nulo. Nuestro país encabeza el crecimiento anual: un 1,6 %, frente al 1,2 % de Alemania, el 0,4 % de Francia o el decrecimiento del 0,5 % de Italia.

“Crecemos, en primer lugar, porque hemos cumplido nuestros compromisos. Crecemos también porque hemos reestructurado el sistema financiero. En los dos últimos años ha crecido el número de empresas constituidas. Estamos creando tejido productivo. Además, hemos hecho reformas estructurales para reforzar nuestra competitividad”, afirmó la vicepresidenta.

El sector exterior merece especial atención porque muestra también un excelente comportamiento. El Gobierno de España ha hecho un esfuerzo por apo-

yar la internacionalización de las empresas españolas –según ha señalado Sáenz de Santamaría– con iniciativas sectoriales, como las planteadas por el Colegio de Ingenieros de Caminos para facilitar su negocio en el exterior. Así, la aprobación del Real Decreto 967/2014 va a permitir que los ingenieros de Caminos de promociones anteriores a Bolonia puedan equipararse al máster; y con ello que los profesionales españoles tengan el más alto nivel exigido en las licitaciones en el extranjero.

“El riesgo y la inestabilidad son los peores enemigos de la inversión, de la riqueza y del crecimiento. Los datos positivos que hoy puedo trasladarles no son sino la consecuencia de las reformas, el fruto del esfuerzo de todos”, concluyó.

Asimismo, acudieron a la jornada Fernando Benzo, subsecretario de Educación; Mario Garcés, subsecretario de Fomento; Jaime Hadad, subsecretario de Medio Ambiente; y Pilar Platero, subsecretaria de Hacienda. Varios patronos de la FUNDACIÓN CAMINOS, como Manuel Manrique, presidente de Sacyr, o Miguel Aguiló, de ACS; y otras personalidades del sector, como Julián Nuñez, presidente de SEOPAN, y Juan Lazcano, presidente de la Confederación Nacional de la Construcción (CNC), también asistieron a este acto.

El presidente del Colegio de Ingenieros de Caminos, Juan A. Santamera, aseguró que “hay en la actualidad, más de 3.000 ingenieros de Caminos que están trabajando por todo el mundo y nuestras grandes empresas de ingeniería, de construcción y concesionarias, casi todas ellas creadas y dirigidas por ingenieros de Caminos, obtienen un elevadísimo porcentaje de sus ingresos en el mercado internacional, llegando



Juan A. Santamera y Soraya Sáenz de Santamaría

a alcanzar en algunos casos más del 90 %”.

“Para las empresas y para nuestros compañeros era de vital importancia que el Gobierno español resolviera la correspondencia o equivalencia de nuestro título pre-Bolonia, al nivel de Máster, lo que está a punto de suceder en breves fechas. Y me consta que la vicepresidenta del Gobierno y los subsecretarios aquí presentes han tenido un papel fundamental para este feliz y próximo desenlace, por lo que quiero reiterarles públicamente mi agradecimiento en este día tan señalado para nuestro Colegio, en nombre de tantos compañeros”, dijo Santamera para finalizar su intervención.

En esta jornada también participaron Pablo Bueno Ruiz, premio Nacional de Ingeniería y presidente de Tyspa, y Juan-Miguel Villar Mir, expresidente del Colegio y presidente de OHL.

Pablo Bueno destacó el papel de los ingenieros de Caminos en la sociedad y ha instado a las autoridades a recuperar el ritmo de la inversión para alcanzar el 1,5 % del PIB. “Es necesario invertir mejor en labores propias de la ingeniería”. Puso de manifiesto la importancia de la creatividad y la innovación al servicio del sector y de la necesidad de renovar el proceso de contratación pública. “Adelantemos con tiempo nuestros proyectos de futuro”, concluyó.

Juan-Miguel Villar Mir, por su parte, repasó la historia de la institución desde que, en 1799, se crea el Cuerpo de Ingenieros de la Inspección General de Caminos, destacando varios hitos como la incorporación de las competencias de canales (1804) y de puertos (1834). Otra fecha de suma importancia para la profe-



Soraya Sáenz de Santamaría, durante su intervención



Pablo Bueno Ruiz



Juan-Miguel Villar Mir



Soraya Sáenz de Santamaría, con Pablo Bueno, Juan-Miguel Villar Mir y Juan A. Santamera, tras el descubrimiento de la placa de los 60 años del Colegio de Ingenieros de Caminos

sión fue el año 1802, momento en el que se funda la Escuela de Ingenieros de Caminos, cuyo primer director fue Agustín de Betancourt. Quiso destacar, además, la satisfacción de los ingenieros por contribuir desde hace más de dos siglos a la economía del país y muy especialmente desde que el Colegio se creara, hace 60 años. El expresidente del Colegio finalizó su intervención “agradeciendo a la vicepresidenta su presencia en este acto así como el impulso de este Gobierno a la economía”.

A continuación, la vicepresidenta del Gobierno y el presidente del Colegio, Juan A. Santamera, descubrieron una placa conmemorativa con el lema: '60 aniversario del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos'. **ROP**



Fernando Benzo, Edelmiro Rúa, Pablo Bueno, Juan-Miguel Villar Mir, Juan A. Santamera, Soraya Sáenz de Santamaría, Pilar Platero, Mario Garcés, Jaime Hadad y José Antonio Torroja

Puentes Arco. Evolución y comprensión



Juan José Arenas de Pablo

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Presidente de Arenas & Asociados

Resumen

El artículo repasa brevemente la evolución histórica de los puentes arco para mejorar la comprensión de su comportamiento estructural y el desarrollo de sus variantes tipológicas. La evolución de la directriz del arco hacia la forma antifunicular de cargas que asegura un comportamiento a compresión. La aparición de los arcos laminares y la diferenciación de arco y tablero, los arcos de tablero inferior, y los arcos atirantados por el tablero tipo bowstring, suponen avances sucesivos que vienen de la mano de la evolución técnica y la aparición y dominio de nuevos materiales. Los procedimientos constructivos posibles para el arco incluyen la cimbra, los procedimientos evolutivos de avance en voladizo con triangulación o atirantamiento provisional y otros. Se analiza finalmente el comportamiento estructural de un puente *bowstring* actual con el ejemplo del puente del Tercer Milenio y se apuntan algunas claves sobre el presente y futuro de estas estructuras.

Palabras clave

Puentes arco, historia, evolución, comprensión, comportamiento, antifunicular, *bowstring*, arco laminar, procesos constructivos

Abstract

The article briefly reviews the historical development of arch bridges to improve the understanding of its structural behavior and the development of its typological variations. The evolution of the arch form towards the antifunicular shape which ensures optimal behavior only under compression forces. The appearance of the shell arch bridges, the differentiation of deck and arc, inferior deck arc bridges and bowstring tied arches, represent successive evolutions that come together with technical developments and mastering of new materials. The possible construction procedures for arch bridges include falsework, cantilever segmental construction through triangulation of temporary bracing, or temporary cable staying. The structural behavior of a current bowstring bridge is finally analyzed using the example of the Third Millennium Bridge, and some clues about the present and future of these structures are targeted.

Keywords

Arch bridges, History, Evolution, Understanding, behavior, antifunicular, bowstring, shell arch, construction procedures

Aproximación a los puentes arco

Escribir sobre los puentes arco sigue siendo un asunto que requiere para mí una extensión mucho mayor que la de un artículo técnico divulgativo, no sólo por la complejidad del tema, sino por la especial admiración y cariño que estas estructuras despiertan en mí. A pesar de ser quizás la forma resistente más sencilla y antigua, llegar a una comprensión intuitiva pero completa de su funcionamiento implica manejar múltiples conceptos como la antifunicularidad, la línea de presión, el núcleo central o la inestabilidad bajo compresión, valorar sus distintas tipologías o alternativas geométricas, tener en consideración la relación de rigideces entre sus elementos, los distintos materiales, los procedimientos constructivos posibles, etc.

Para llegar de forma sintética a este conocimiento no se me ocurre mejor forma que hacerlo siguiendo la propia historia de la construcción de los puentes arco y su desarrollo, es decir, nuestra evolución cronológica hacia el dominio de esta tipología. Necesariamente será un repaso incompleto por lo escueto, pero espero que nos permita poder afrontar con mejor base la comprensión resistente del funcionamiento de un puente arco actual al final del artículo. Y así preguntarnos sobre el presente y el futuro de estos puentes.

Las bóvedas romanas, medievales y renacentistas

Las bóvedas romanas de medio punto aparecen como sustento de puentes construidos como repetición unos de otros. Obviamente, la ignorancia de los ingenieros romanos



Fig. 1. El Puente de Alcántara sobre el río Tajo (Cayo Julio Lacer, 106 d.c.). Foto: Carlos Javier Pérez Bravo



Fig. 2. El Ponte Vecchio sobre el río Arno, Florencia (Taddeo Gaddi, 1345). Foto: Jorge López Tamames

respecto a sus mecanismos resistentes teóricos era completa. Pese a lo cual acumulaban su propia experiencia en la construcción de bóvedas que se arruinaban, lo que les llevaba a evitar los cauces blandos, así como a huir de hacer descansar los arcos sobre pilas esbeltas incapaces de transmitir el empuje horizontal de la bóveda. Así, con el método de prueba y error se debió alcanzar una cierta intuición de que los arcos funcionan por forma como sabemos hoy, y que es su forma curva lo que les permite funcionar sometidos sólo a compresiones que mantienen los sillares unidos entre sí

sin necesidad de argamasa entre ellos. La gran ventaja del arco reside en que precisamente la misma carga del peso a soportar es la que mantiene unido al arco haciéndolo más fuerte. La perfección constructiva que alcanzan en su aplicación queda patente en España en el puente de Alcántara, referencia obligada que no se debe dejar de visitar.

Toda la Edad Media se ve transitada por puentes de piedra que para nada mejoran el sistema romano. Una única diferencia es la forma ojival de las bóvedas, que lejos de

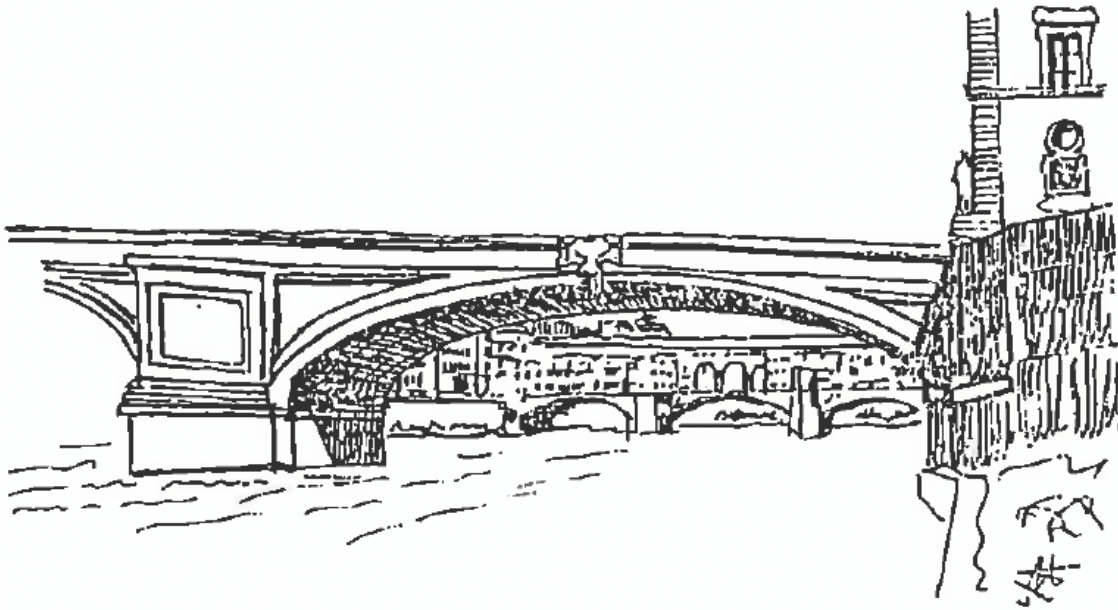


Fig. 3. Arco del Ponte Santa Trinita, enmarcando al Ponte Vecchio, Florencia (Bartolomeo Ammannati, 1569). Dibujo: Juan José Arenas

acercarles a un mejor funcionamiento estructural, empeoraba su estado tensional, debilitándolas. Efectivamente hubo avances o, mejor dicho, algún que otro ejemplar reseñable que supuso una mejora significativa: el Ponte Vecchio de Florencia, tres bóvedas de unos 30 m de luz y un rebajamiento (flecha/luz) del orden de $1/6$, que no tienen nada que ver con el $1/2$ de un puente romano. Se construye hacia 1340, no olvidemos que en la proximidad de la iglesia de Santa María de las Flores, dónde se erige la cúpula de Brunelleschi. Casi nada.

Un siglo después, a escasa distancia del Vecchio, se levanta el puente de Santa Trinidad, con tres bóvedas de 30 m de luz. El avance que se consigue es el de adoptar un intradós semielíptico, de curvatura variable (máxima, en arranques y mínima, en clave). Se ha dado un gran paso en la buena dirección, aunque todo apunta a que los matemáticos florentinos no fueron capaces de integrar lo que esas modificaciones suponían en el equilibrio del puente.

Asistimos también a un esfuerzo secular de los constructores por aproximarse al funcionamiento de esas bóvedas, que cada vez se proyectan para puentes más anchos, lo que lleva a buscar el ahorro de piedra sillar. En algún puente francés, de 20 metros de anchura, se ven sendas bóvedas laterales ocupando puede que un ancho de un 40 % del total, dejando entre ambas un hueco que hay que rellenar y rigidizar. Esta organización de bóveda de ancho reducido prelude en piedra nada menos que los puentes con tableros de sección en PI que van a desarrollarse más tarde con los nuevos y futuros materiales, el hormigón y acero.

Las bóvedas de Perronet

1750 es una fecha crítica del desarrollo de los arcos. Es el año en que el francés Perronet construyó el puente de Neuilly cercano a París, que culminó el proceso de evolución de los puentes de sillería, en busca del máximo rebajamiento de sus bóvedas. Perronet aprovecha la estática gráfica que se ha desarrollado gracias a la Mecánica de Pedro



Fig. 4. Aspecto general del desaparecido Puente de Neuilly sobre el río Sena (Jean Rodolphe Perronet, finales del S.XVIII). Dibujo: Juan José Arenas

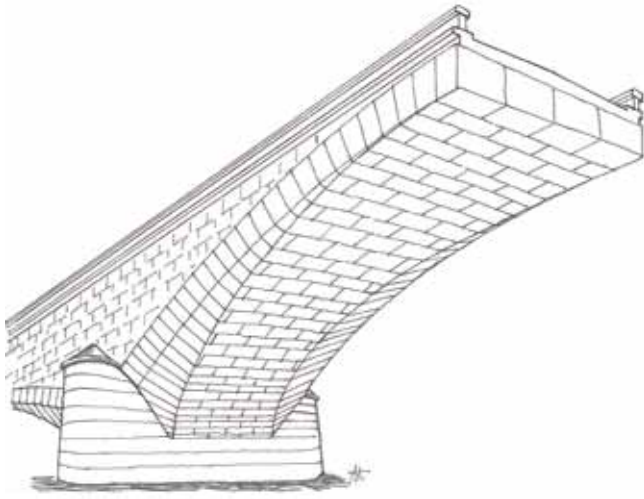


Fig. 5. Bóveda con “cuernos de vaca” (Escuela de J.R. Perronet).
Dibujo: Juan José Arenas

Varignon, para conseguir ejes de bóveda que sean curvas antifuniculares.

Muy brevemente hay que señalar que la estática gráfica muestra cómo las cargas verticales desvían la línea de presión. Si la forma del arco coincide con la línea de presión, estará en su situación óptima, sólo sometido a compresiones, sin excentricidad, ni flexión, ni tracciones que lo debiliten. Las cuerdas y catenarias son los elementos que, por su rigidez despreciable, de forma natural adoptan la forma que les permite estar sometidos sólo a tracciones o fuerzas de tensión. El inverso de esta forma, la curva antifunicular, es la curva óptima de un arco para un determinado conjunto de cargas verticales. Para una única carga puntual, un triángulo. Para una carga uniformemente distribuida, una parábola. Y sucesivamente. Nos vienen rápidamente a la mente las maquetas invertidas de cuerdas y pesos de Gaudí para la Sagrada Familia.

Desde luego, construir con sillares como Perronet una bóveda de flecha igual a la décima parte de la luz es difícil. De hecho, el aspecto de estas bóvedas es bastante parecido en dimensiones relativas al de un paso moderno, puente de hormigón pretensado de canto variable. La comparación no llega a más, siendo sólo una forma de recordar la importancia técnica de estas obras que permitían a los carruajes cruzar un río o un canal de navegación sin necesidad de ganar demasiada cota. Que no eran estructuras sobradas en el plano resistente se demuestra por la desaparición de todos los puentes construidos por Perronet. La exigencia de

geometría en la talla de sillares, para que todo encaje, es tan alta que hoy sería carísimo intentarlo.

Pese a todo, la herramienta más racional de la que se disponía desde el XVII, el llamado polígono de fuerzas o polígono de Varignon, permitía una optimización de la línea media de la bóveda.

Años más tarde, el también francés Paul Sejourné representa la transición entre estos puentes de sillería y los puentes de hormigón modernos. Puentes tan lejanos en el tiempo como el que construyó el ingeniero Sejourné en Toulouse sobre el río Garona, hacia 1900, han sido referencias obligadas para este autor.

Maillart y los arcos laminares

Hasta aquí el arco y el plano de rodadura del tablero formaban un elemento único indiferenciado.

Es en el ambiente de Zúrich y Múnich y en los albores de un nuevo material, el hormigón armado, donde germina esa idea de construir puentes que se desdoblaron en dos estructuras superpuestas, un arco y un tablero. En principio, el arco “inferior” se sitúa siempre bajo el tablero dándole sustento.

Entran en juego nuevas variables como son el número de pilastras o soportes verticales y, sobre todo, la relación de cantos y rigideces del tablero y el arco. El arco se encuentra más cómodo bajo cargas uniformemente distribuidas y sufre bajo cargas concentradas o asimétricas. Maillart comprende que los arcos “laminares” o de canto reducido con relación al tablero filtran las cargas y se ven de forma natural sometidos a cargas uniformes. Es fácil intuir que un arco cáscara sin capacidad para asumir flexiones, da sustento al tablero en forma de apoyo distribuido, casi uniforme. Maillart encuentra soluciones en arcos de 30 metros de luz y 24 cm de canto, sin que el hormigón se vea demasiado apurado.

Los arcos inferiores se apoyan en el terreno y se ven sometidos en todo su desarrollo a una fuerza horizontal H constante igual a la reacción horizontal en la roca. H es el empuje del arco, que los americanos llaman “*thrust*” y los italianos “*spinta*”. No intento presumir de intérprete multilingua. Pero fue en el atrio de una iglesia de Roma donde leí la voz “*spingere*”, comprendiendo que significa empujar. Y más adelante, ya en un libro de arquitectura veo la voz

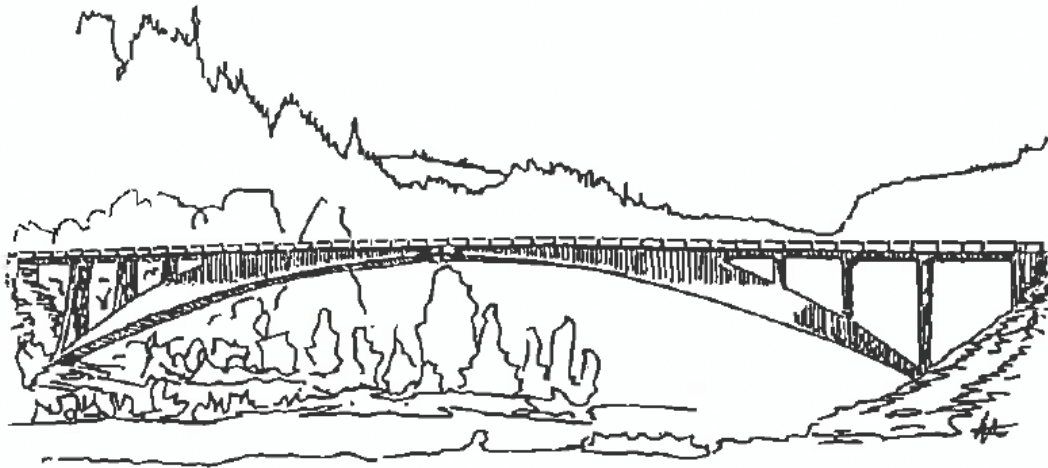


Fig. 6. Puente triarticulado de Rossgraben (Maillart, 1932). Dibujo: Juan José Arenas



Fig. 7. Puente de Salginatobel (Robert Maillart, 1930). Fotografía: Miguel Sacristán Montesinos

“*spinta*”: no sé cómo explicarlo pero, desde entonces y a través de esa voz “*spinta*”, siento más profundo el concepto de la idea estructural asociada a arcos, a bóvedas y cúpulas. Y es que no es lo mismo el empuje de un relleno de tierras que el inmenso empuje concentrado que ejerce un arco. Creo que denominarlo “*spinta*” fue para mí un modo de elevar el nivel de conciencia con relación a los arcos como proyectista.

El terreno que recibe este empuje forma parte de la estructura desempeñando un papel fundamental. Los arcos inferiores se aprovechan por tanto de este elemento “*gratuito*” del terreno que asume la tracción inferior. Un arco no deja de ser un par de fuerzas con compresión superior y una tracción inferior como cualquier viga, en este caso asumida por el terreno. O visto de otra forma, cualquier viga oculta un arco con su fibra inferior traccionada y la línea comprimida

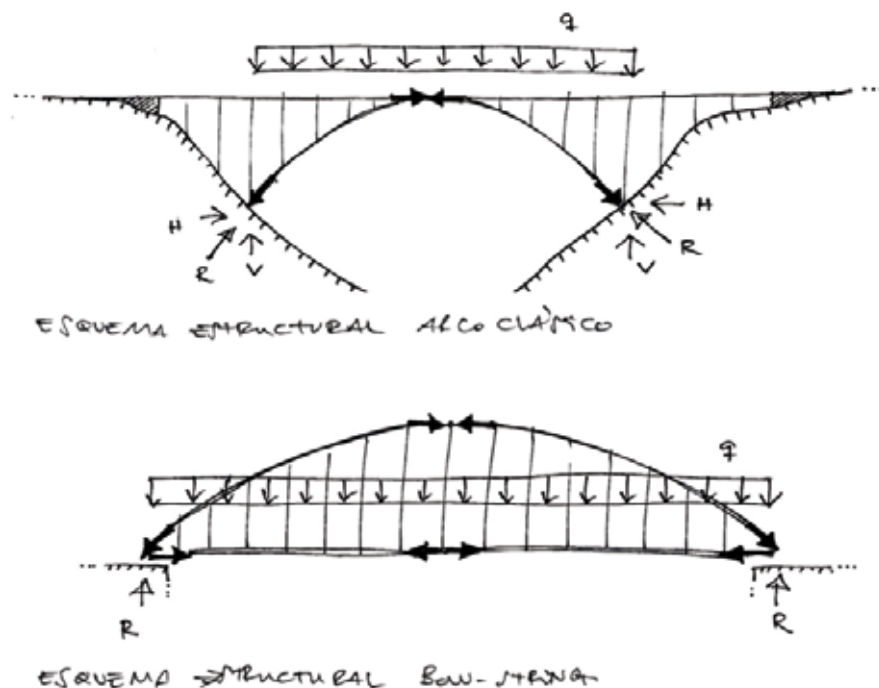


Fig. 8. Comparativa de los esquemas estructurales de un arco clásico y un bow-string. Esquema: Héctor Beade Pereda.

atravesándola tendida con una trayectoria curva. Todas las vigas son arcos.

Con el desarrollo de los puentes arco en el tiempo se diversifican las variantes tipológicas y a los arcos inferiores o de tablero superior se suman los arcos superiores o *bowstring*, los arcos intermedios, etc.

Puentes arco inferiores o de tablero superior

Históricamente, es el modelo con el que se han desarrollado los grandes arcos de hormigón. Hacia 1900, Emil Mörsch proyecta y construye en Suiza el puente sobre el barranco de Gmünder, un arco de 80 m de abertura y flecha teórica f de valor 26 m, lo que supone una relación flecha/luz de 1:3.

La sección hueca del arco es de grandes dimensiones y quizás elevado peso. Aunque aumentar la inercia y el área en el arco no hace más que facilitar la aproximación de su comportamiento resistente al de un arco rígido y aislado, que quiere ofrecer apoyo fijo al tablero. Cuyo cálculo es más sencillo que el del arco y el tablero, como estructuras superpuestas.

Es seguro que Mörsch utilizó estática gráfica para definir las líneas de antifunicularidad del eje del arco. Su objetivo fundamental es conseguir que en todas las hipótesis de carga, y a

todo lo largo de la directriz, la fuerza resultante quede con menos excentricidad que el núcleo central, que, se caracteriza por sus alturas superior e inferior (c y c'). Naturalmente, ese objetivo se alcanza aumentando la altura total, $c+c'$, o adoptando una sección más eficiente, lo que da lugar a definir, como índice de buen aprovechamiento del material utilizado, el concepto de rendimiento de la sección. Que varía desde $1/3$ para la sección losa maciza a valores entre $1/2$ y $2/3$ para secciones cajón o para la doble T simétrica y con tablas muy delgadas.

El aspecto del puente de Mörsch es el de un gran arco, muy meritorio para la fecha en que fue construido. Su estrategia resistente como arco rígido es la opuesta a la de los arcos laminares, pero en cualquier caso efectiva. No puedo dejar de mencionar aunque sea brevemente el Viaducto de Martín Gil en Zamora construido entre 1934 y 1942 con más de 200 m de luz teórica, 63 m de flecha y cargas ferroviarias que culmina nuestra evolución histórica e inicia la época de los puentes arco modernos.

En la actualidad, los arcos inferiores siguen siendo una tipología con un campo de aplicación importante. Un arco actual se concibe como una estructura optimizada. Optimización que debe incluir todas las etapas del proceso constructivo, que resulta definitivo y definitorio. El procedimiento clásico

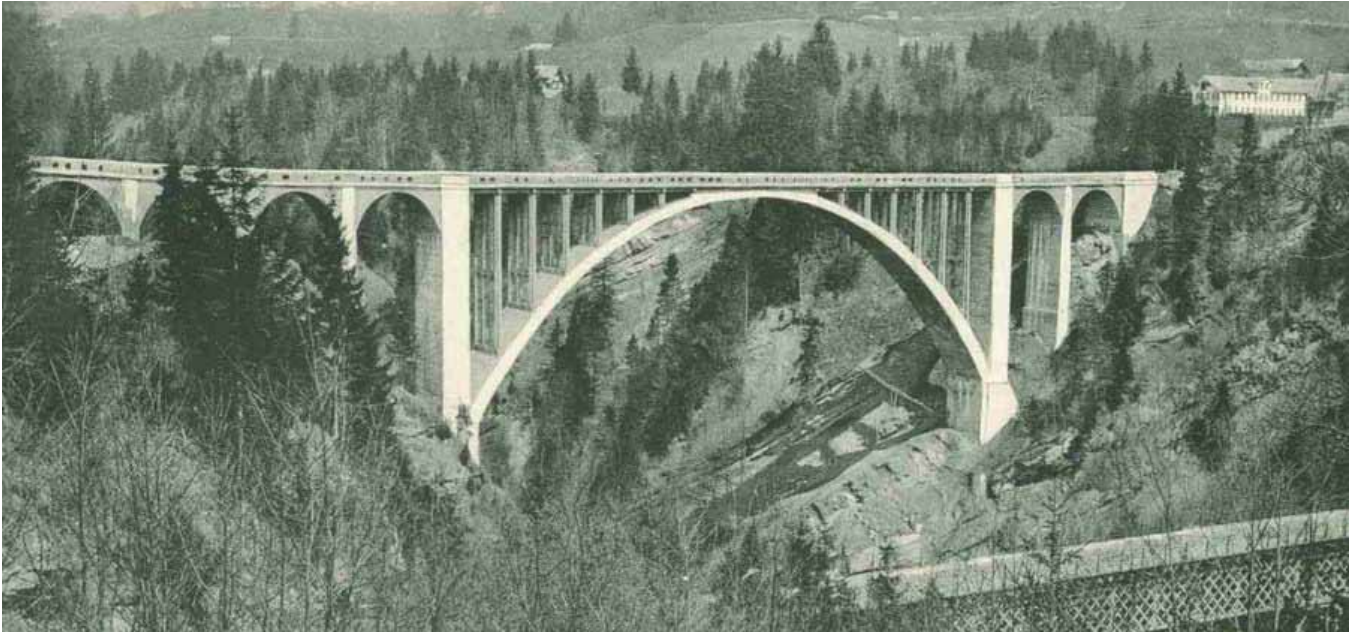


Fig. 9. Puente arco de Gmündertobel sobre el río Sitter (Emil Mörsch, 1908).

Foto: Appenzell Ausserrhoden

de construcción de los arcos ha sido la ejecución sobre grandes cimbras de madera que constituían importantes estructuras en sí mismas. Los puentes arco actuales se construyen mediante avance en voladizo desde sus arranques o por abatimiento, siendo la primera opción la principal para los grandes arcos.

Lo habitual es que el arco se ejecute por dovelas de avance de longitud adecuada de entre 4 m y 6 m ejecutados con un carro de encofrado. Las estrategias de soporte del voladizo son fundamentalmente dos, la triangulación de arco y tablero con las pilastras como montantes verticales, o el atirantamiento provisional del arco desde una torre de atirantamiento.

La primera alternativa consiste en organizar una triangulación temporal al estilo de las grandes celosías tipo Pratt. Piezas esenciales son las barras diagonales a tracción que son elementos temporales que se eliminan en el puente acabado. Durante el proceso constructivo, el aspecto del puente es el de dos inmensos voladizos de canto variable, cuyo arranque es el terreno de cimentación. Por ejemplo, con este procedimiento proyectamos el puente del Pintor Fierros (inicialmente puente de la Regenta) construido en Asturias, con 190 m de luz.



Fig. 10. Puente arco del Pintor Fierros en fase de construcción.

Asturias, 1996

La segunda alternativa de procedimiento constructivo es el atirantamiento provisional en el que se aprovecha la última pila previa al arco como torre de atirantamiento generalmente suplementándola con una torre provisional metálica y anclando las retenidas a las pilas anteriores.

Un gran ejemplo de esta solución, actualmente en ejecución, es el puente sobre el río Almonte en la cola del embalse de



Fig. 11. Viaducto sobre el río Almonte en el embalse de Alcántara, Cáceres. LAV Madrid - Lisboa

Alcántara para el ferrocarril de alta velocidad con una luz de 384 m. Un vano tan importante unido a las elevadas cargas ferroviarias y sus efectos dinámicos requieren de un análisis avanzado que es posible hoy en día gracias a nuestro mayor conocimiento teórico y al uso de programas informáticos avanzados, pero no por ello sin mucha dedicación y esfuerzo.

El cálculo evolutivo, teniendo en cuenta el comportamiento reológico del hormigón en el tiempo y la consideración de los efectos no lineales tanto geométricos como del material son imprescindibles para una estructura de estas características. La consideración de los efectos de las cargas transversales del viento en una estructura de esta esbeltez y reducida anchura llevó a realizar un estudio completo en túnel de viento y a abrir el arco en dos en los arranques aportando una estabilidad fundamental no sólo a nivel puramente resistente sino también a nivel funcional, tomando en consideración los efectos dinámicos y el confort de los usuarios.

Puentes de arco superior del tipo *bowstring*

La evolución en la construcción y el uso de los nuevos materiales de la fundición de acero y luego el acero en chapas y cables, así como la necesidad de salvar vanos importantes con poca altura sobre el terreno llevan a la aparición de los arcos superiores, en los que el arco se sitúa sobre el tablero y lo suspende. Los primeros arcos “*bowstring*” surgen como una evolución de las celosías metálicas de canto variable y por tanto no de la tradición de los puentes arco. Ya que en realidad, esta estructura no es un arco propiamente dicho como hemos entendido hasta ahora, ya que no se apoya en el terreno transmitiéndole su empuje horizontal. Se apoya en el propio tablero que asume esta reacción horizontal en forma de tirante en tracción, de ahí su otra denominación como arcos atirantados por el tablero. El terreno sólo recibe una carga vertical, lo que resulta una gran ventaja en terrenos poco competentes como es habitual encontrar en el entorno de los ríos.

La literatura técnica inglesa nos ha enriquecido con un nombre tan expresivo como “*bowstring*”. Suma de una pieza en arco, “*bow*”, y otra recta y tensa “*string*”, que es la cuerda. Es el puente arco-cuerda. Que, mirado en Alzado, ofrece una imagen de ley de momentos flectores de un tramo simplemente apoyado. La forma del arco adopta la curva antifunicular de estas cargas, que es también equiparable a la ley de momentos. La forma parabólica es la correspondiente a una carga uniforme con péndolas verticales uniformemente distribuidas. La misma estrategia aprendida en los arcos laminares inferiores de disponer arcos más flexibles que el tablero permite que los arcos asuman sólo cargas próximas a la distribución uniforme que permite su comportamiento óptimo.

Quizás la primera razón del fuerte desarrollo de los *bowstring* en las últimas décadas es que han venido a cubrir un rango de luces medias mal resuelto con los tramos simples de hormigón pretensado. En efecto, las vigas prefabricadas se han extendido como límite hasta los 60 metros de luz. Pienso en un puente francés de los años sesenta que fue presentado como la última maravilla pero sin haberse repetido nunca más. El canto de esas vigas, quizás dos metros y medio,

su peso a efectos de montaje, la acción del viento, etc. Son todos factores que agravan los problemas.

En cambio, si miramos las posibilidades de un puente *bowstring* de esa misma luz o mayor, su reducido peso y transparencia viene dado por su mayor eficiencia estructural. Esto es debido a que su canto efectivo es igual a la flecha del arco que se mueve entre $1/6$ y $1/10$ de la luz, es decir entre 10 y 6 m para el caso de 60 m, lo cual es del orden 3 o 4 veces superior al canto del puente viga equivalente.

Como primer ejemplo de aplicación reciente de esta tipología quiero incluir el puente de la Barqueta de Sevilla sobre el río Guadalquivir para la Expo de 1992. Se trata de un puente de 168 m de luz con arcos metálicos y tablero mixto con un arco central que se bifurca en dos pies inclinados rectos en arranques formando células triangulares. Esta solución responde no sólo a la búsqueda de eliminar el apoyo del arco en el centro del tablero, sino a una estrategia de estabilización del arco frente al pandeo fuera de su plano ya que para esta luz y esbeltez de la pieza comienza a ser un asunto fundamental. La inclinación de los tirantes de péndolas para anclarse en la parte central



Fig. 12. Puente de La Barqueta sobre el río Guadalquivir. Sevilla, 1992. Foto: José Luis Gil Paradás

+ 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. 13. Vista en alzado del puente del Tercer Milenio sobre el río Ebro. Zaragoza, 2008. Foto: Miguel Sacristán Montesinos

curva del arco tiene una repercusión directa sobre la forma antifunicular del arco.

Continuando con la evolución de la tipología, proyectamos el puente del Tercer Milenio en Zaragoza sobre el Río Ebro, coincidiendo con la Expo de 2008. Estructura imponente y, al tiempo, serena y tranquilizadora. Es, de algún modo, la transcripción del puente sevillano de Barqueta al paisaje árido de Aragón, cambiando el acero de Sevilla por una concepción con piezas de hormigón pretensado en las tres direcciones del espacio euclidiano: longitudinal, transversal y vertical.

Pero es mucho más que una transcripción ya que incluye el avance técnico necesario para salvar una luz significativamente mayor y la comprensión de este tipo de estructuras a lo largo de los años. Una vez más, la continua evolución de los puentes arco necesariamente apoyada en toda la tradición anterior.

La luz del puente son 216 metros, su ancho es de 40 metros incluyendo sendas aceras peatonales de más de 4 metros de ancho, protegidas por una cubierta transparente.

La elección del hormigón no responde sólo al “genius loci” del lugar, sino a una estrategia deliberada de conseguir un puente con una durabilidad máxima con el mínimo mantenimiento. ¿Por qué debemos conformarnos con una durabilidad de 100 años con el dominio actual de la técnica

y los materiales?. En los puentes importantes destinados a perdurar debemos ser mucho más ambiciosos.

El objetivo buscado es conseguir un puente íntegramente en hormigón de altas prestaciones permanentemente comprimido, y por tanto sin juntas, sin fisuras, sin costuras (seamless, como dicen los anglosajones). Esto no es tarea fácil en un puente de esta luz y anchura.

En primer lugar, el arco esbelto y laminar permite un funcionamiento optimizado que reduce las flexiones que recibe. En segundo lugar, usar un tablero rígido tanto a flexión como frente a deformaciones de carga axil utilizando el hormigón permite un control directo de la deformabilidad del puente, aumentando la rigidez axil del dintel. Y, por último, y no menos importante, el peso propio como elemento centrador de cargas. En un puente de estas dimensiones en hormigón, la proporción de las cargas variables frente al peso propio es muy pequeña, esto reduce de forma directa la excentricidad de la carga en el arco y, por tanto, permite reducir su sección, lo que reduce su peso y lo hace más flexible, permitiendo un círculo “virtuoso” hacia la optimización de la estructura.

En esta ocasión, las células o pórticos triangulares del arco en accesos unidos a que los planos de cuelgue de péndolas son dos y se encuentran abiertos e inclinados a los laterales de la sección colaboran aún más a la estabilidad transversal del muy esbelto arco.

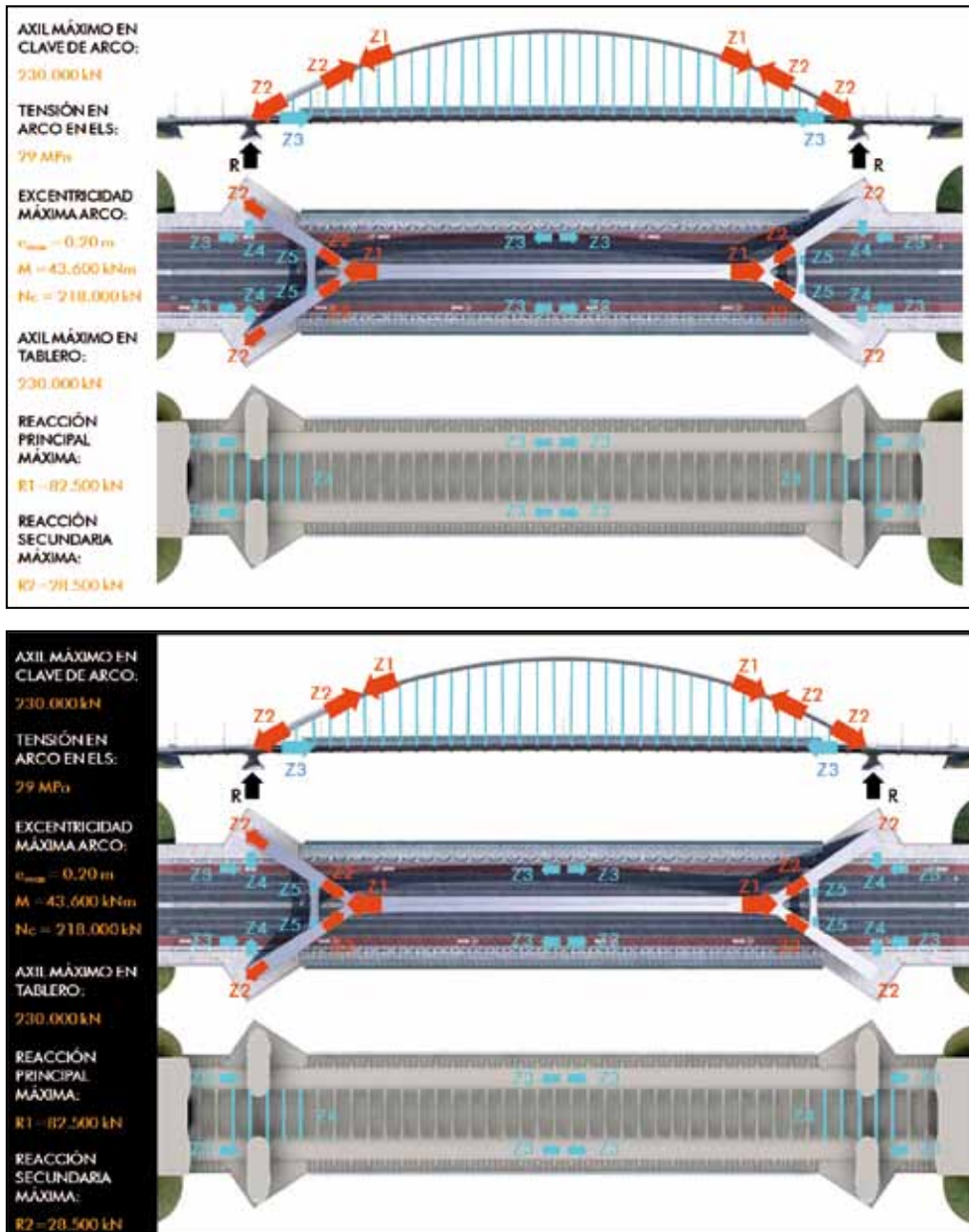


Fig. 15. Comportamiento estructural del puente del Tercer Milenio. Esquema: Héctor Beade Pereda

El cierre en clave de los dos semiarcos es operación imprescindible para poner en carga la totalidad de sus secciones. Observemos que la misma fuerza H con que el sistema de gatos empuja a cada semiarco, es transmitida al tablero en los arranques del arco.

Llegado este punto, creo que nos hemos preparado para ilustrar con algunos números básicos el funcionamiento de

un puente arco de tipo *bowstring* utilizando este puente del Tercer Milenio como ejemplo.

El puente posee una luz (L) de 216 m con una flecha del arco (f) de 36 m que corresponde a 1/6 de la luz. El peso total del puente es de unas 27.000 toneladas, a lo que se suman del orden de 3.600 ton de sobrecarga, lo que supone un 13 % de las 30.600 ton totales. La carga q total por metro de tablero es de 142 ton.



Fig. 16. Puente del Tercer Milenio sobre el río Ebro, Zaragoza. Foto: Miguel Daza

El momento flector máximo en el vano biapoyado de 216 m no es otro que $qL^2/8$, que dividido por la flecha f resulta el esfuerzo horizontal H que es de compresión en el arco y de tracción en el tablero. Haciendo la cuenta, resultan 23.000 ton de fuerza horizontal H .

A la hora de dimensionar el arco con la sección más compacta posible se utilizó un hormigón avanzado de alta resistencia HA-75 con 75 Mpa de tensión de rotura característica. Teniendo en cuenta la mayoración de acciones y la limitación de tensiones en el hormigón el arco debería trabajar por debajo del 40 % de esta tensión, es decir 30 MPa. Eso supone una sección mínima de 5,75 m² por efecto del axil. La sección final hexagonal de ancho 5,40 m y altura 1,88 m es sólo ligeramente superior a este valor, y recibe tensiones máximas de 29 MPa teniendo en cuenta todos los esfuerzos. Que no haya sido necesario aumentar el canto o la sección del arco por efecto de la flexión indica su correcto funcionamiento laminar, así como la antifunicularidad de su directriz, unido al hecho de la reducida excentricidad que suponen los fletores que las sobrecargas inducen en el arco, que es sólo de 20 cm, quedando la línea de presión dentro del núcleo central y por tanto el arco permanentemente comprimido, consiguiéndose el objetivo buscado de resistencia y durabilidad.

Llegado a este punto, si nos interrogamos con referencia al presente y al futuro de los puentes arco, algunas cla-

ves han ido apareciendo por sí solas: los materiales más resistentes (aceros y hormigones de altas prestaciones) unidos a la correcta concepción geométrica de los arcos permiten reducir su sección y su peso. Según avanza este proceso, los fenómenos de no linealidad e inestabilidad a compresión y frente a efectos dinámicos del viento o las sobrecargas se vuelven más importantes. En este sentido, análisis más rigurosos y avanzados son necesarios, que tengan en cuenta todos estos efectos considerando imperfecciones, secciones fisuradas, todas las fases del procedimiento constructivo, etc.; y, por otro lado, configuraciones de las péndolas o los propios arcos que mejoren su comportamiento como, por ejemplo, los *network arch* que aumentan la rigidez del conjunto por medio de la inclinación y el cruce de las péndolas, permitiendo mayor esbeltez. Éstos son sólo algunos ejemplos del camino que queda por recorrer.

En cualquier caso no debemos renunciar a las formas clásicas de los arcos y a sus virtudes, por el sólo hecho de serlo. De igual forma, tampoco debemos buscar la originalidad de directrices nuevas para los arcos, nacidas sin ninguna consideración por la antifunicularidad. Me vienen a la mente costosas y recientes estructuras en Oriente Próximo. Éstas y otras frivolidades no resistirán el paso del tiempo. En el correcto emplazamiento, los arcos son y serán la respuesta a determinados enunciados técnicos, por lo que podremos seguir disfrutando de ellos por mucho. **ROP**

Construcción de puentes arco



Luis M. Viartola Laborda

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director Técnico de Dragados

Resumen

Es quizá en los puentes arco donde más claramente destaca la importancia que tiene el proceso constructivo en la concepción y viabilidad de un puente. En este artículo se hace un recorrido por la evolución de los procedimientos de construcción de arcos a lo largo de la historia, y cómo esta evolución ha ido impulsando, a su vez, el desarrollo de la tipología del puente arco para situarla como una alternativa viable en el desafío de las grandes luces. Se cuenta en la actualidad con un amplio abanico de procedimientos para construir arcos cuya combinación con materiales resistentes de mejores prestaciones hace prever una importante evolución de estos puentes en el futuro.

Palabras clave

Arco, construcción, historia, cimbra, autocimbra, voladizos sucesivos, hormigón, acero

Abstract

It is perhaps in arch bridges that we may best appreciate the importance of the building process in the design and viability of a bridge. This article outlines the evolution in the construction of arches throughout history and how this evolution, in turn, has marked the development of the characteristics of the arch bridge to the extent that it may now be considered as a feasible alternative for large span bridges. There are currently a wide range of procedures to construct arches and their combination with high performance materials makes it possible to foresee considerable development in these bridges in the future.

Keywords

Arch, construction, history, formwork, self-climbing formwork, incremental launch, concrete, steel

Introducción

El arco es una estructura que resiste por forma y, por tanto, mientras no está acabada no es capaz de resistirse a sí misma, de ahí la importancia que en el caso de los arcos tiene el procedimiento constructivo, cuya correcta elección está íntimamente ligada a la viabilidad del arco como solución.

Hay, principalmente, dos formas de enfrentarse a la construcción de un arco. La primera de ellas consiste en utilizar un medio de sacrificio que sea capaz de resistir todo el peso del arco hasta que éste, una vez finalizado, sea capaz de soportarse por sí mismo. El medio de sacrificio por excelencia ha sido la cimbra, no sólo en la construcción de arcos, y su uso ha sido el método tradicional de construcción desde los primeros arcos de piedra de la antigüedad clásica.

El otro planteamiento busca el aprovechamiento de la capacidad resistente de las secciones parciales de la estructura durante la etapa del proceso constructivo que, a través de

esquemas estructurales evolutivos, culminan el cierre de una estructura que alberga el arco ya conformado. En este grupo se engloban los procedimientos basados en la construcción por voladizos sucesivos, con o sin recurso a elementos resistentes y dispositivos auxiliares. Fue a finales del siglo XIX, con la construcción del puente sobre el río Mississippi en San Luis, cuando se utilizó, por primera vez, procedimiento de montaje por voladizos sucesivos en sus tres arcos, de 157 m de luz máxima, conformados por celosías de tubos metálicos.

A partir de ese momento ambos procedimientos han convivido, pero con un claro desplazamiento de las cimbras a favor de sistemas constructivos evolutivos. A continuación, se exponen alguno de los hitos relevantes en la construcción de arcos a lo largo de su historia que, a través de soluciones innovadoras, han elevado la base de un conocimiento que ha permitido a los arcos seguir presentes hoy en día en el desafío de las grandes luces.



Fig. 1. Puente de los franceses



Fig. 2. Puente Eads o de San Luis sobre el río Mississippi



Fig. 3. Cimbra de Salginatobel

Las cimbras

Los primeros arcos, formados por dovelas de piedra, se construían recurriendo a cimbras de madera, el único procedimiento disponible para la construcción de arcos hasta finales del siglo XIX.



Fig. 4. Cimbra del puente de Plougastel

Con la aparición del hormigón, “piedra hecha por el hombre” que decía Steinman, los arcos construidos con este nuevo material adoptaron la tecnología clásica usada en los puentes de piedra, a los que se asimilaban inicialmente.

La madera, que casi había desaparecido como material de construcción de puentes, encuentra en las cimbras, particularmente en las cimbras para arcos de hormigón, una nueva oportunidad de desarrollo. Surgieron diversas tipologías de cimbras, desde las clásicas de palizadas con pies derechos o de recogida, a cimbras de celosía más evolucionadas.

La cimbra del puente de Salginatobel en Schiers (Suiza) sirve de ejemplo para evidenciar cómo se incrementaban las dificultades para materializar la cimbra conforme aumentaban la luz y la altura del arco, y cómo el problema para la construcción del arco residía, básicamente, en la construcción de la cimbra.

Estas nuevas exigencias hicieron que se volcaran en el diseño de las cimbras grandes dosis de ingenio, probablemente mayores que en el de la estructura definitiva del arco al que sirven, dando lugar a estructuras magníficas que por desgracia estaban condenadas a desaparecer. Se trasladaban a la construcción de este medio de sacrificio todas las dificultades de la construcción del arco, aprovechando la ventaja de la ligereza de la madera o el acero que las constituía, que simplificaba las labores de montaje y los medios necesarios para el mismo.

En 1930 se finaliza el puente de Plougastel sobre el río Elorn en Francia, formado por tres arcos de hormigón armado de 186 m de luz, con proyecto de E. Freyssinet y construido por la empresa Limousin. La cimbra utilizada constituye quizá una de las estructuras de madera más destacadas de la historia de la construcción. Fue concebida por el propio Freyssinet quien desarrolló un sistema de maderas delgadas claveteadas cuyas juntas se recibían con mortero. Tiene 176 m de luz, y estructuralmente era un arco de madera con atirantamiento inferior. Se utilizó en los tres arcos del puente, para lo que se trasladaba flotando apoyada en sus extremos sobre unas pontonas de hormigón.

En la Segunda Guerra Mundial, una explosión destruyó uno de sus tres arcos y en 1950 se abordó su reconstrucción para la que, tras un estudio de diversas alternativas, se concluyó que la mejor opción era la misma que sirvió para su levantamiento inicial, por lo que se construyó de nuevo una cimbra de madera con atirantamiento inferior como la ideada veinte años atrás.

Una cimbra similar a la de Plougastel se utilizó en 1938 para la construcción del puente de Sando en Suecia, un arco de hormigón llamado a ser ré cord del mundo con sus 264 m de luz. La cimbra colapsó durante el hormigonado por lo que hubo de diseñarse una segunda cimbra, estabilizada lateralmente y mucho más rígida que la inicial, con la que en 1943 pudo finalmente completarse el arco.

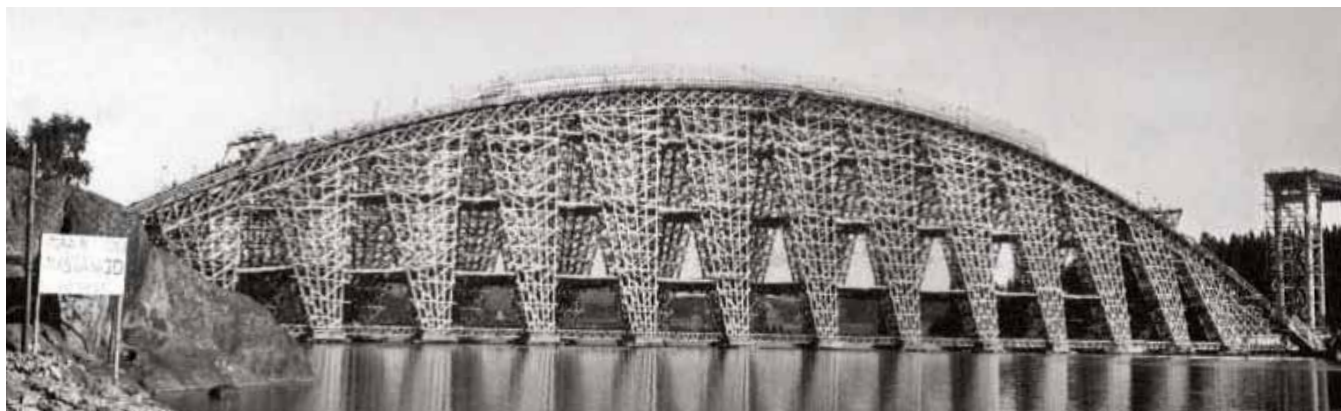


Fig. 5. Puente de Sando (Suecia), segunda cimbra



Fig. 6. Posicionamiento de la cimbra del puente de Longeray (Francia)

Otro caso interesante es el del puente de Longeray sobre el Ródano, un arco modesto de 60 m de luz finalizado también en 1943, donde la cimbra de madera se fabricó por mitades en ambas márgenes del río en posición vertical y se colocó mediante el procedimiento de volteo o abatimiento de semiarcos.

Ya en 1953 se finalizaron los arcos de hormigón de la Guaira en las proximidades de Caracas (Venezuela), construidos



Fig. 7. Cimbra de La Guaira



Fig. 8. Cimbra de la Arrábida

por Campenon Bernard, con Jean Muller al frente, bajo la dirección de E. Freyssinet. El arco de mayor luz alcanzaba los 152 m de luz y colapsó en 2006 por el empuje desestabilizador de su ladera sur. El sistema utilizado para el posicionamiento de la cimbra fue también novedoso como combinación de dos procedimientos diferentes: el de avance en voladizo con atirantamiento desde las pilas laterales para los arranques de la cimbra, mientras que la parte central era, como en Plougastel, un arco de madera con atirantamiento inferior que se izaba a su posición definitiva por medio de un sistema de gatos dispuestos en los extremos de los tramos volados.

Un sistema similar, pero con una cimbra metálica, se utilizó para los dos arcos del puente de la Arrábida en Portugal, de 270 m, finalizados en 1963.

Aunque todas estas cimbras hayan desaparecido, el esfuerzo invertido en ellas no fue en vano pues, como se verá posteriormente, muchos de los sistemas ideados para la construcción de las cimbras se utilizan en la actualidad directamente como procedimientos para la construcción de arcos.

Autocimbras

La irrupción del acero como material para la construcción de arcos, permitió ampliar el escenario de posibilidades para abordar el reto de su construcción. El acero ofrecía piezas más ligeras y fáciles de montar, con capacidad de resistir axiles, flexiones y cortantes desde el mismo momento de su colocación, capacidad que se podía aprovechar para prescindir de las cimbras durante su montaje, usando en su lugar elementos y dispositivos temporales más sencillos.

Basándose en estos principios, fue el ingeniero austriaco Joseph Melan quien patentó, en 1892, un sistema constructivo, denominado sistema Melan, de armadura rígida o autocimbra para arcos de hormigón. El procedimiento consiste en construir en primer lugar un arco metálico ligero con capacidad para soportar su peso propio y el del hormigón del arco definitivo, que queda luego embebido en el arco como armadura. Los primeros arcos construidos con este sistema se terminaron en 1894 y 1895 en los Estados Unidos: se trata de dos realizaciones modestas, los puentes Rock Rapids, en Iowa, y Stockbridge, en Massachusetts, que enseguida llamaron la atención por su esbeltez. El sistema se extendió rápidamente, sobre todo en Norteamérica, pero también en Europa, donde quizá la realización más destacada sea el arco del Ammer en Echelsbach, de 130 m de luz y construido en 1929.



Fig. 9. Viaducto de Martín Gil sobre el embalse del Esla

En España, este mismo sistema fue utilizado por Ribera, del que obtuvo en 1902 patente de invención, que sostenía que nunca tuvo conocimiento previo de los desarrollos de J. Melan y que sólo se enteró de ellos posteriormente¹.

Con este procedimiento, que se incluyó en los Modelos Oficiales de Puentes, se construyeron muchos puentes arco en nuestro país, con el puente de María Cristina en San Sebastián, el de San Telmo en Sevilla o el del Manzanal sobre el Esla en Palencia, como ejemplos destacados.

Pero la realización española por excelencia utilizando este sistema constructivo es el puente de Martín Gil sobre el Esla, de 210 m de luz, que fue el arco de hormigón de mayor luz cuando se terminó en 1942, debido al retraso en la construcción del puente de Sando. Su proyecto inicial de 1930, año en que se finalizó el puente de Plougastel, se aprobó en 1932 y contemplaba la ejecución del arco de hormigón armado sobre una cimbra de madera. El proyecto lo realizaron Francisco Martín Gil, Francisco Castellón, César Villalba, Antonio Salazar y Eduardo Torroja, que se hizo cargo de la obra al fallecer el ingeniero que da nombre a la obra. La construcción se inició en 1934 y tuvo que suspenderse tras estallar la guerra civil, con parte de los accesos construidos, terminados los arranques del arco y la cimbra colocada.

En la reanudación de los trabajos, en 1939, se decidió prescindir de la cimbra, debido a su defectuoso estado, y adoptar el método constructivo de armadura rígida o autocimbra. En este caso, la cimbra se colocó con medios muy sencillos, un

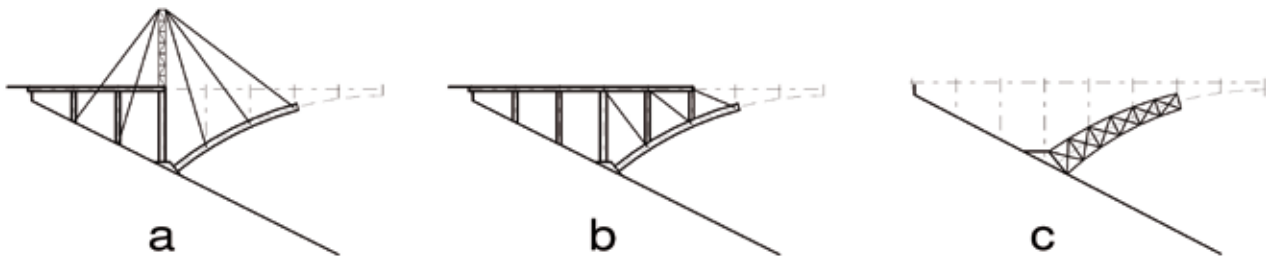


Fig. 10. Esquemas evolutivos

cable tendido y sus correspondientes pendolones. Quizá una de las principales aportaciones de este puente fue la detallada secuencia de hormigonado que se siguió para aligerar al máximo el peso de la cimbra metálica hasta los 500 kg/m. El hormigonado se iniciaba convirtiendo en mixtos los cordones de la celosía metálica para reclamar su concurso en la resistencia de las siguientes fases de forma que el peso del hormigón de estas nuevas etapas recaía no sobre la celosía metálica sino sobre un arco mixto de capacidad resistente creciente.

Construcción por voladizos sucesivos

Como se ha dicho anteriormente, fue en el puente de San Luis, también llamado de Eads –en honor al Capitán James Eads que fue el artífice de este proyecto–, en el que se utilizó por primera vez el procedimiento de voladizos sucesivos para construir sus tres arcos. El puente se finalizó en 1874 y la audacia de esta empresa caló en los ingenieros de la época que empezaron a usar este nuevo procedimiento profusamente, y no sólo en arcos. Cabe destacar que sólo nueve años después de la finalización del Eads se inició, usando el método de voladizos sucesivos, el puente de ferrocarril sobre el Firth of Forth, que con sus 561 m, se alzó con el liderazgo en la tipología de puentes viga.

En el puente de San Luis se combinaban el avance por voladizos dobles compensados y el avance por voladizo simple. Así, los arcos del Eads se construían avanzando de forma compensada desde las pilas centrales, y de forma simple desde las pilas extremas del tramo principal, compensando estos voladizos extremos con la parte de estructura de acceso ya construida. Para ello, se recurría a unas torres provisionales de madera sobre las pilas desde las que se atirantaban los voladizos en varios niveles conforme avanzaba la construcción.

Pero el método de avance por voladizos sucesivos no siempre necesita recurrir a una torre o mástil de atirantamiento. En el caso de los arcos de tablero superior pueden conseguirse grandes voladizos configurando durante el proceso construc-

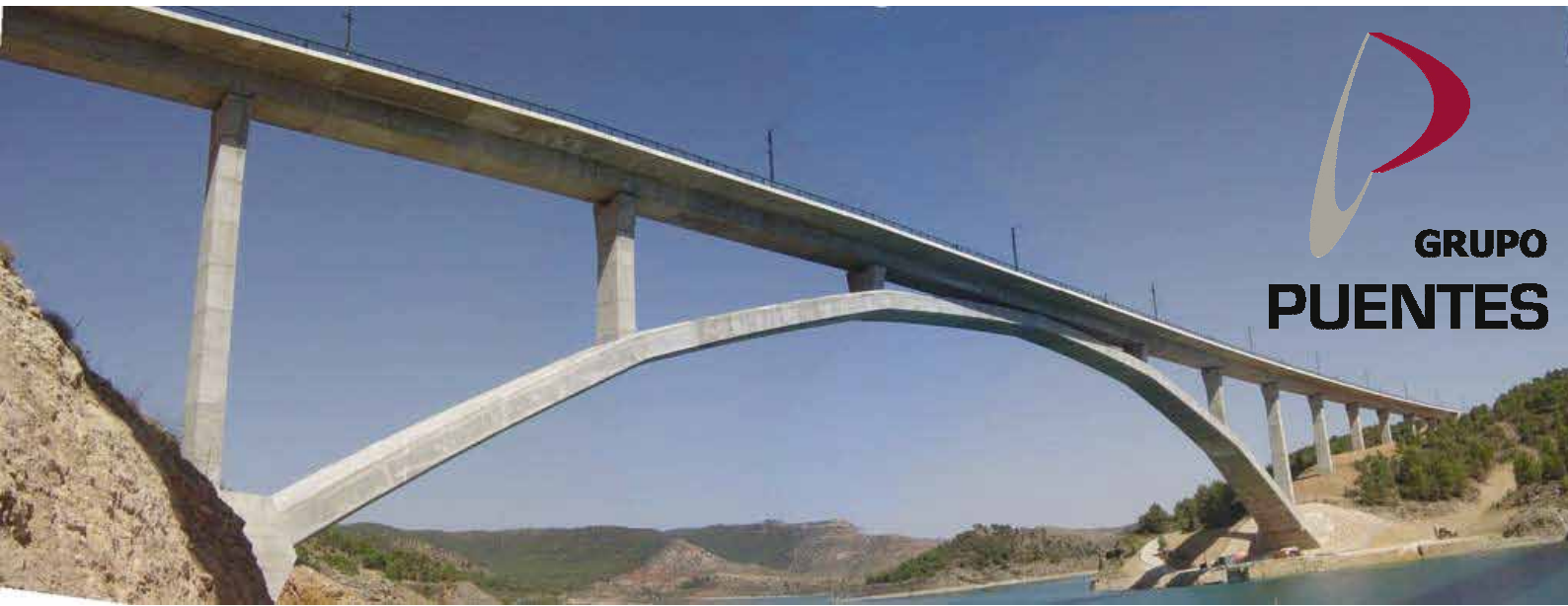
tivo una viga de celosía temporal en la que su cordón inferior comprimido es el propio arco, el cordón superior traccionado es el tablero, o un tirante que lo sustituya durante la construcción, y como elementos para transmitir el cortante entre ambos cordones se cuenta con las pilastras del arco trabajando a compresión y unas diagonales provisionales trabajando a tracción que triangulan los trapecios formados por el tablero, el arco y las pilastras. Y también, en algunos casos, como en los grandes arcos de celosía metálica, la propia celosía es capaz de por sí sola de soportar el voladizo máximo previo al cierre sin necesidad de elementos auxiliares.

Así nos encontramos con tres variantes de un mismo procedimiento, el de los voladizos sucesivos, en función de los elementos auxiliares adicionales requeridos por el arco para poder alcanzar en el esquema estructural de ménsula el centro de su luz.

De todos ellos, el uso de torres de atirantamiento ha sido, y es, el más utilizado y se ha usado tanto en puentes de hormigón como en puentes metálicos.



Fig. 11. New River Gorge




**GRUPO
PUENTES**





Fig. 12. Lupu

Dependiendo del peralte del arco, la función del mástil de atirantamiento podía desempeñarla el pilar extremo del arco. Están los ejemplos históricos del puente de María Pía, en Portugal de 160 m de luz, terminado en 1877, y el de Garabit en Francia de 165 m de luz, terminado en 1884, que se sucedieron como los arcos de mayor luz en su momento. En ambos casos, con proyecto de Eiffel, la pila extrema se estabilizaba horizontalmente con el tablero de los vanos de acceso. También destaca el arco de New River Gorge, en West Virginia, en el que se utilizaba como elemento de retenida un sistema de atirantamiento independiente del tablero, que discurría paralelo al mismo. Este puente fue con sus 518 m de luz record de mundo desde el año 1977 en que finalizó su construcción hasta el año 2003, cuando fue superado por los 550 m del puente de Lupu sobre el río Huangpu, en Shanghai.



Fig. 13. Chaotianmen

Tanto Lupu, como el arco de Chaotianmen sobre el río Yangtze, en Chongqing, que con dos metros más de luz ostenta el liderazgo de los puentes arco desde su finalización en 2009, se construyeron recurriendo al sistema de torres provisionales de atirantamiento. En el caso de Lupu, con un atirantamiento muy cerrado debido a la esbeltez de la sección del arco, formado por dos vigas cajón de alma llena, y en el caso de Chaotianmen con un atirantamiento más ligero gracias a que la capacidad resistente de la sección en celosía permitía mayores tramos de voladizo entre tirantes.

La triangulación interna del sistema arco-tablero fue el sistema elegido para construir, entre otros, los arcos KRK en Croacia. Se



Fig. 14. Arcos KRK



Fig. 15. Arco de los Tilos



Fig. 16. Viaducto del río Ulla

terminaron en 1980 y el mayor de ellos, con 390 m de luz (413 m si se tiene en cuenta la longitud del puntal que une el arranque del arco con la cimentación) fue el de mayor luz en hormigón hasta que los superó el puente de Wanxian. Se utilizaron tirantes provisionales tanto para las diagonales temporales como para el tirante superior que, una vez cerrado el arco, se retiró para y se construir el tablero definitivo de hormigón.

Cada vez en más casos se utiliza el tablero definitivo para desempeñar las labores de tirante durante la etapa constructiva. Aunque este sistema es más propio de los puentes de tablero metálico o mixto, también se extiende al caso de tableros de hormigón. Como ejemplo de los primeros figura el arco de los Tilos, de 255 m luz, terminado en 2004 y situado en la isla de La

Palma, en el que el tirante de construcción está formado por la parte metálica definitiva de su tablero mixto. Mientras que en la construcción del arco del Ulla para la LAV Santiago-Orense, de 170 m de luz y finalizado en 2011, se utilizó como tirante el propio tablero de hormigón anclado a los estribos.

El avance en ménsula del propio arco sin necesidad de elementos adicionales fue el método utilizado en la construcción del puente sobre la bahía de Sídney, de 503 m de luz, finalizado en 1932. El puente de Sídney tuvo como predecesor al de Hell Gate, en Nueva York, de 298 m de luz, que se había construido en 1917 también en ménsula, aunque utilizando torres de atirantamiento para los primeros tramos junto a los arranques que también se empotraron provisionalmente, y como sucesor con



Fig. 17. Puente de Sídney



Fig. 18. Puente de Bayonne



Fig. 19. Pasarela sobre el río Lérez, Pontevedra. 1997

510 m de luz, al puente de Bayonne, también en Nueva York, que aunque se finalizó el mismo año que Sídney, su construcción se había iniciado en 1928, cinco años después de aquél. En Sídney se empotró el arco en arranques mediante el anclaje del cordón superior de la celosía al terreno, de forma que pudiera soportar las tracciones de su trabajo en voladizo, mientras que en Bayonne se recurrió a apuntalamientos provisionales que se iban desplazando conforme avanzaba el voladizo.

Otros métodos de construcción

Muchos de los procedimientos que, al margen de las cimbras o los voladizos sucesivos, se utilizan hoy en día para construir arcos tienen su origen, como se decía anteriormente, en aquéllos que se idearon para la construcción de las cimbras.

Así, en la cimbra de Plougastel estaría el antecedente del posicionamiento de estructuras en tipología de arco-tirante por medios de traslación, bien flotantes o rodantes. Como ejemplos en los



Fig. 20. Arco de Bonpas. TGV Mediterranee



Fig. 21. Arco de Lanjarón

que se utilizó un medio flotante estarían la pasadera de la Barqueta, en Sevilla, de 180 m de luz y finalizada en 1992, o la más modesta sobre el río Lérez, en Pontevedra. El arco de Bonpas para el TGV Lyon-Marsella o el Monastery Bridge en Irlanda serían los ejemplos de posicionamiento utilizando medios rodantes.

Otro ejemplo de este tipo es el proceso de lanzamiento que se utilizó para posicionar el arco de Lanjarón, de 140 m de luz, en el que uno de sus extremos se movía sobre carriles de rodadura mientras que el otro era suspendido desde una torre dispuesta en el estribo opuesto.

El procedimiento del volteo o abatimiento de semiarcos, tiene también su referente en la cimbra de Longeray. Se utilizó, por vez primera, como procedimiento de construcción para el arco definitivo por Morandi en la pasarela sobre el Lussia en Italia y posteriormente en el puente sobre el río Storms, en Sudáfrica, ambos en 1954. Hoy tenemos excelentes ejemplos españoles contruidos con este sistema, como el arco para el ferrocarril metropolitano sobre el río Nervión o los arcos utilizados como puntos fijos en los viaductos para el ferrocarril de alta velocidad. El arco de Alconétar sobre el embalse de Alcántara es también un ejemplo de la aplicación de este sistema de volteo precedido de una ingeniosa maniobra para el emplazamiento de los semiarcos sobre sus arranques.

Mientras que el método utilizado para la construcción de las cimbras de La Guaira o Arrábida está en el origen del proce-

dimiento usado para construir el puente arco de la Vicaría, entre otros.

Situación actual y evolución futura

Como se ha expuesto anteriormente, la correcta elección del procedimiento constructivo es determinante para hacer del arco una solución viable. De hecho, la evolución en los procedimientos de construcción de los arcos hay que analizarla ligada a la evolución del arco en todos sus aspectos: morfológicos, de tipo, o en sus materiales constitutivos. Y viceversa, la evolución a la que estamos asistiendo en los arcos está condicionada por su proceso constructivo, muy enfocada a simplificarlo en la medida de lo posible.

Como muestra de este binomio que forman el arco y su proceso constructivo, y de la influencia de este último, se podría citar el resurgimiento de los arcos mixtos en las dos últimas décadas, debido a las ventajas que esta tipología aporta al proceso constructivo. La presencia del acero como elemento portante de las fases constructivas y el hormigón, sumado al acero, como materiales resistentes de las compresiones de servicio, configura un escenario que simplifica la construcción sin perder la ventaja que históricamente ha aportado el hormigón como elemento más apropiado para el trabajo a compresión propio de los arcos.

La evolución en los arcos contruidos con tubos metálicos rellenos de hormigón (CFST por sus iniciales en inglés) es un



Fig. 22. Arco de Alconétar



Fig. 23. Arco de la Vicaría

claro exponente de esta tendencia. Puede considerarse como una evolución del procedimiento de autocimbra desarrollado a finales del siglo XIX por Joseph Melan, y que ha encontrado su campo de desarrollo en la mejora de las prestaciones de los materiales, tanto en resistencia como en su mejor aptitud para la puesta en obra.

La parte metálica del arco se construye por avance por voladizos sucesivos, que es el procedimiento más utilizado para la construcción de arcos en la actualidad, quedando las cimbras relegadas a las luces pequeñas y medias. Una vez finalizado el arco, además de servir de estructura portante, los tubos metálicos que lo forman son a su vez el encofrado para el hormigón. El tubo se rellena con hormigón autocompactante, de sencilla puesta en obra, y su capacidad resistente en la sección mixta se ve muy incrementada por el confinamiento que le proporciona el tubo metálico.

El puente de Wanxian, un arco de hormigón que, con sus 420 m de luz, es el más grande del mundo desde su finalización en 1997. Se construyó con un sistema muy similar al utilizado en Martín Gil, con la diferencia de que la autocimbra era una celosía de tubos metálicos que, una vez alcanzada la forma resistente de arco, se rellenaron de hormigón para hacer frente, como estructura mixta, a la carga del hormigón del arco definitivo.

En 2005 se finalizó el puente de Wushan, situado en Chongqing (China), que tiene 460 m de luz, y puede considerarse como una evolución del puente de Wanxian desde el punto de vista constructivo. En este caso, la celosía de tubos metálicos no



Fig. 24. Puente de Wanxian

queda embebida en un hormigón exterior. Las dimensiones de los tubos, de hasta 1.200 mm de diámetro, permiten que el hormigón que rellena su interior sea capaz por sí solo, junto con el acero, de resistir toda la carga del arco definitivo aprovechando, como se ha dicho, la ventaja de su confinamiento.

El puente de Wushan, que se situó justo detrás del puente de Sídney, consiguió la inclusión de los arcos de tubos metálicos rellenos de hormigón en un rango de luces hasta entonces reservado a los arcos metálicos. Tan sólo unos años después, en 2012, se finalizó el arco de Bosiden sobre el río Yangzte en Sichuan (China), con una solución muy parecida a la utilizada en Wushan. En este caso, la luz del



Fig. 25. Puente de Wushan

arco se incrementó hasta los 530 m, lo que lo coloca como tercer puente arco de mayor luz tras Chaotianmen y Lupu, y fue la constatación de que esta tipología de puentes arco CFST está ahí por méritos propios.

Esta experiencia de los arcos con tubos metálicos rellenos de hormigón muestra cómo los procedimientos constructivos de puentes arco se encuentran en un proceso de actua-

lización y mejora permanente, adecuándose a las técnicas y medios disponibles. Todo hace pensar que la adopción de nuevos materiales más ligeros, las mayores prestaciones de los materiales convencionales y el incremento en la capacidad de los medios auxiliares traerán consigo, como así ha sido hasta ahora, una mejora progresiva de los procedimientos constructivos actuales y, con ella, veremos a los puentes arco superar sus propios límites. **ROP**



Fig. 26. Puente de Bosiden

Notas

(1) Para facilitarnos la construcción de los arcos de H.A. y liberarnos al mismo tiempo de la onerosa tutela de las patentes de Hennebique, de que era entonces uno de los concesionarios, el autor obtuvo en 1902 patente de invención por veinte años (ya caducada) por este sistema de armaduras para arcos. Con estas disposiciones ha construido todos los puentes arco que tuvo ocasión de proyectar, y asimismo los propuso para los modelos oficiales de puentes en arco para carreteras y caminos vecinales, cuya redacción le encomendó la Dirección de Obras Públicas, que describiremos en el capítulo siguiente. Posteriormente se enteró de que el ingeniero austriaco Melan aplicó igual procedimiento en algunos puentes, cuyo empleo se extendió en Alemania y América con el nombre de sistema Melan, aunque con menores ventajas que en España por ser en aquellos países mucho más barata la madera.

Referencias

- Arenas de Pablo, Juan José et al. "Puente de la Barqueta". Sevilla-Puentes del 92. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1992.
- Del Valle Pérez, José Andrés, et al. "Viaducto sobre el río Ulla". Hormigón y Acero, nº 258. ACHE, 2010.
- Manterola, Javier. "Situación actual del puente arco". Informes de la Construcción, Vol. 40 n.º 398. CSIC, 1988
- Fernández Troyano, Leonardo. "Tierra sobre el Agua. Visión Histórica Universal de los Puentes". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 1999.
- Fernández Troyano, Leonardo et al. "Puentes arco sobre el río Nervión en Bilbao para el ferrocarril metropolitano de la Ciudad". Revista de Obras Públicas, nº 3445. 2004.
- Llombart Jaques, José A. et al. "Puente sobre el río Tajo, en el embalse de Alcántara (Arcos de Alconétar)". Hormigón y acero, nº 242. ACHE, 2006
- Pérez-Fadón Martínez, Santiago et al. "El Arco de los Tilos en la Isla de La Palma (Canarias)". Hormigón y acero, Nº 236. ACHE, 2005.

- Pérez-Fadón Martínez, Santiago et al. "Puente arco de la Vicaría". Hormigón y acero, Nº 255. ACHE, 2010.

- Ramondenc, Philippe et al. "Le bow-string de Bonpas sur le péage de l'A7 à l'échangeur d'Avignon". Pont métalliques, bulletin 19, 1999.

- Ribera, José Eugenio. "Puentes de Fábrica y Hormigón Armado. Tomo IV. Puentes de Hormigón Armado. Obras Especiales". Madrid, 1932

- Serna García-Conde, José et al. "Los puentes del Tren". Fundación Esteyco, 2006

- Siegrist Ridruejo, Guillermo. "Arco de Almonte. Autovía de la Plata." Hormigón y Acero, nº 240. ACHE, 2006

- Steinman, David B. et al. "Puentes y sus constructores". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, 2001.

- Torroja, Eduardo. "Razón y ser de los tipos estructurales". Ed. 4ª. Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento, 1976.

- Viartola Laborda, Luis M. "La industrialización de los procesos de construcción de puentes y su evolución". La vida de los puentes. AEC. San Sebastián, 2005

Los arcos más grandes del mundo



Santiago Pérez-Fadón
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Director técnico de Ferrovial



Juan José Sánchez Ramírez
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Jefe del departamento de Puentes en la
Dirección Técnica de Ferrovial

Resumen

En los últimos años se han construido en Asia un elevado número de puentes de gran luz, de todas las tipologías. Particularmente en China se han ejecutado una gran cantidad de arcos. Allí están ahora los arcos más grandes del mundo. En este artículo vamos a intentar hacer más conocidas esas lejanas obras orientales.

Palabras clave

Arco, China, gran luz, CFST

Abstract

In recent years, an extensive number of long span bridges with different typologies have been built in Asia. China, in particular, has constructed a great number of arch bridges. The world's largest arch bridges are there now. In this article we will attempt to make better recognized these far eastern infrastructures.

Keywords

Arch, China, long span, CFST

1. Realizaciones en función de la luz

En este apartado vamos a hacer una breve descripción de los siete puentes arcos más grandes del mundo, cinco de los cuales se encuentran en China.

1.1. Puente arco de Chaotianmen

Chaotianmen es un puente de carretera y ferrocarril sobre el río Yangtze, en la populosa ciudad de Chongqing (China). Abierto al tráfico el 29 de abril de 2009, es el puente en arco más grande del mundo por longitud del vano principal

(552 m de luz), relevando en ese puesto al puente Lupu en Shangai que, con 550 m, era hasta esa fecha el de mayor luz. El puente principal es de tres vanos (190 + 552 + 190 m) y cuenta con sendos viaductos de acceso a ambos lados. El arco, una celosía metálica del tipo *bowstring*, cuenta con una relación luz/flecha de 4,3. Tiene dos tableros en dos pisos con un ancho de 36 m y lleva tirantes horizontales para el arco en cada tablero. El piso superior lleva tirantes hasta los estribos y el piso inferior lleva tirantes sólo en la proyección del cordón inferior del arco. El tirante inferior



Fig. 1. Puente arco de Chaotianmen, Chongqing (China)

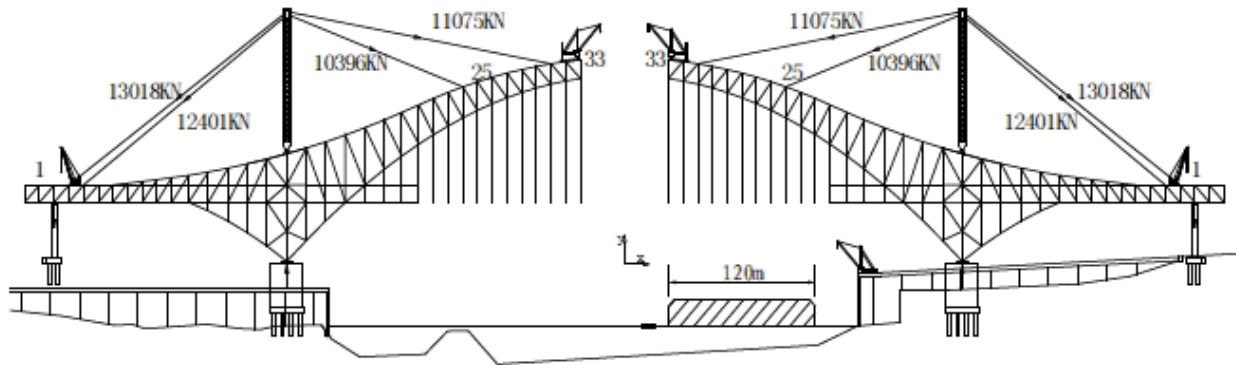


Fig. 2. Construcción del arco de Chaotianmen

toma dos tercios del empuje del arco y el superior sólo el tercio restante.

La configuración de los apoyos responde a la idea del *bowstring* de tablero intermedio, de manera que sólo una pila es fija, se permiten los movimientos en la otra y en los estribos. De esta manera, el conjunto arco-tablero se mueve como un sólido único adaptándose perfectamente a las dilataciones por temperatura.

La construcción del puente se realizó en sus dos mitades. Primero se montaron los vanos laterales, luego se montaron unas torres temporales sobre la pilas para colocar unos tirantes que garantizaran la estabilidad. A continuación, los arcos se fueron montando mediante unas grúas móviles que corrían sobre los mismos y que fueron constituyendo el vano principal.

Después del cierre de la celosía del arco, se colocaron cables temporales horizontales. Finalmente, se usaron como tirantes barras rígidas en ambos tableros, el superior y el inferior, para proceder, seguidamente, a cerrar estos tableros.

1.2. Puente arco de Lupu, Shanghai, China

El arco de Lupu en Shanghai es casi tan grande como el de Chaotianmen pues, con 550 m de luz, sólo tiene 2 m menos que éste. Se trata de un arco de tablero intermedio que, al igual que el arco de Chaotianmen, lleva los empujes del tablero a través del arco y de los vanos laterales hasta los estribos, para desde allí pasar al tirante horizontal del arco. El 28 de junio de 2003 fue abierto al tráfico el puente Lupu ostentando el record de luz en su tipología hasta que se inauguró el puente Chaotianmen que le quitó el récord.



Fig. 3a. El arco de Lupu, finalizado



Fig. 3b. El arco de Lupu, en construcción

El arco de Lupu fue ejecutado con ayuda de sendas torres temporales, pero en este caso hubo una realización singular en relación con los suelos blandos de la zona. Los suelos tienen tan baja capacidad portante, que no aguantaban los empujes del arco ni siquiera mínimamente, así que había que colocar el tirante del arco antes de que se cerrara el mismo. Para ello, se colocaron los cables de extremo a extremo de la figura 4 y se llevaron hasta los estribos. A fin de evitar la catenaria, estos cables se sujetaron de las péndolas del arco.

Como hemos señalado, los suelos de la zona eran muy blandos, por lo que el arco debía ir pilotado en sus tres apoyos. Uno de ellos (una de las dos pilas) es el punto fijo a movimientos horizontales, los otros tres son deslizantes. Con este sistema, las reacciones en las cimentaciones son verticales, ya que todas las fuerzas horizontales se anulan.

1.3. Puente arco de Bosideng

El arco de Bosideng cruza sobre el río Yangtze, en Hejiang, Sichuan (China). Se trata de un *concrete filled steel tubes* (CFST) *arch*, es decir, un arco de tubos metálicos rellenos de hormigón expansivo. Con un vano de 530 m, es el actual récord del mundo en este tipo de arcos. La dificultad en la fórmula de trabajo de este hormigón radica en el tipo y la cantidad de agente expansivo a emplear, algo que hay que estudiar en cada caso teniendo en cuenta el cemento y los áridos que realmente se vayan a emplear. Hay un par de productos que se pueden utilizar como agentes expansivos, uno se basa en la formación de etringita primaria; el otro, en el óxido de calcio.

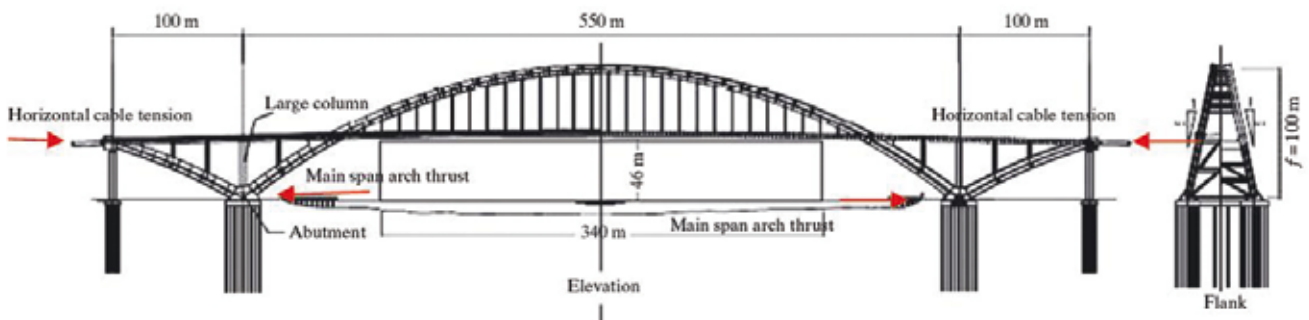


Fig. 4. Esquema estructural. Arco de Lupu, Shangai (China)



Fig. 5. El arco de Bosideng, río Yangtze, Hejiang, Sichuan (China)

La construcción se realizó con ayuda de dos torres temporales y un blondín. Posteriormente, una vez cerrado el arco, el tablero se montó colgado de las péndolas del arco.

1.4. El puente de New Gorge, West Virginia, EE. UU.

El siguiente puente que encontramos, según el orden por luces, es el puente New River Gorge, en las montañas Apalaches, cerca del condado de Fayette (Virginia Occidental), en el este de los EE. UU. Esta estructura forma parte de la Ruta 19, que conecta el golfo de México con el lago Eire, y, con un tráfico medio de 16.200 vehículos al día, supuso un gran avance en el sistema de comunicaciones de esta área.

Se trata de un puente en arco de celosía de acero de 518 m de luz que fue, durante muchos años, el puente en arco

de un solo tramo más largo del mundo. Las montañas que forman el cañón sirven de sólidos estribos para el arco que forma el puente. La vía del mismo discurre a 267 m sobre el río New River Gorge, lo que supone sea uno de los puentes para circulación de vehículos más altos del mundo.

Este puente fue pionero en el empleo de acero tipo corten. Durante sus primeros años se utilizaba cloruro sódico como agente de deshielo, lo que provocó que parte de la pátina de óxido de cobre que protegía al acero se deshiciera. Efectivamente, al tener más afinidad con el cobre, la sal forma cloruro de cobre, lo que induce que el acero pierda su protección. A partir de que se detectó, se emplea otro tipo de sales.

1.5. Los puentes de Sídney (Australia), Hell Gate y Bayonne (EE. UU.)

La historia del diseño y construcción de los puentes arcos de Sídney, Hell Gate y Bayonne hace que estén estrechamente ligados entre sí. En efecto, cuando el Dr. John Jacob Crew Bradfield se planteó por primera vez el puente de Sídney tenía una preferencia clara por un puente de voladizos. Pero por aquel entonces se planteó hacer un viaje a Nueva York para estudiar los puentes de Manhattan y fue en aquella visita cuando descubrieron un arco mucho más pequeño que el que ellos iban a construir, pero con unas proporciones que los iba a dejar prendados: era el puente arco Hell Gate, un puente ferroviario de 310 m de luz. A partir de ese momento, sólo hubo sitio para una idea de puente: el puente de Sídney sería un arco similar en todo a Hell Gate.



Fig. 6. Arco de New River Gorge, West Virginia, EE. UU.



Fig. 7. Puente de Hell Gate, New York, EE. UU.



Fig. 7. Arco de Sidney, Australia



Fig. 9. Construcción del arco de Sidney



Fig. 10. Arco de Bayonne, New York (EE. UU.)

Así pues, la construcción del puente arco de la bahía de Sídney comenzó en 1923 y acabó en 1932. Tiene 503 m de luz y sendos arcos de celosía, siendo el inferior el que recibe más carga, ya que el superior, al igual que en el Hell Gate, no llega directamente hasta los apoyos.

Para la construcción del puente de Sídney se prolongó temporalmente el arco superior por sus tangentes, consiguiendo así la estabilidad necesaria para construir los semiarcos en voladizo. Una vez cerrados éstos, se construyó el tablero colgándolo por módulos desde el centro hacia los estribos.

Pero ahí no se terminó la historia, pues los neoyorquinos, celosos porque su arco Hell Gate había sido copiado, le encargaron otro más grande al gran proyectista Othmar Ammann: el arco de Bayonne, de 511 m de luz. Lo hicieron con menor coste y también más rápido, porque empezaron en 1928 y acabaron en 1931. Sin embargo, por dificultades económicas, se vieron obligados a eliminar el revestimiento de piedra de las torres, algo que marca una diferencia estética notable si se le compara con el puente de Sídney a favor de este.

1.6. Wushan Yangtze River Bridge

Este arco cruza el río Yangtze en un paraje muy agreste cerca de Wushan, Chongqing (China), en las proximidades de la nueva y enorme presa de las Tres Gargantas. Terminado en el año 2005, era entonces el arco CFST más grande del mundo, pero ahora, con sus 460 m de luz, se queda comparativamente muy pequeño frente a los 530 m del arco de Bosideng, construido después. De todas formas, su encaje

en el terreno es tan acertado y su cimentación en la roca de las laderas tan potente, que se diría que el valle ha estado esperando este arco durante siglos.

Por otra parte, no se puede dejar de comentar el color. Los chinos son muy aficionados a destacar sus grandes arcos mediante su colorido, bien sea con el rojo de los cordones superior e inferior del arco de Chaotianmeng, o bien con la celosía en rojo del arco de Bosideng, muy parecido en la tonalidad a este de Wushan.

La construcción de este arco se hizo por avance en voladizo mediante tirantes. Los tirantes iban a unas torres que a su vez se ventearon a la roca de la ladera. Para colocar las piezas



Fig. 11. Arco de Wushan, Chongqing (China)

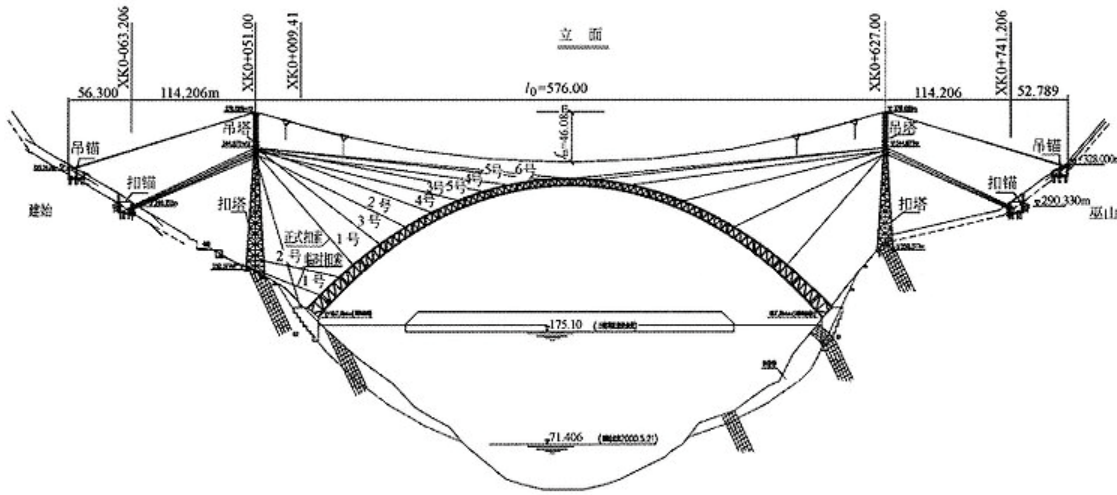


Fig. 12. Construcción del arco de Wushan, Chongqing, China

de acero se utilizó un blondín que se apoyaba un poco más alto en las mismas torres. (Ver la figura 12)

1.7. El arco de Wanxian

Terminado en 1997, el arco de Wanxian se encuentra en las proximidades de la Presa de la Tres Gargantas, en Chongqing (China). Con sus 420 m de luz es el arco de hormigón más grande del mundo, aunque cabría objetar que es un arco mixto de hormigón y acero, ya que se montó con una cimbra perdida de celosía de tubos metálicos construida con un blondín. Una vez cerrada la cimbra en el centro del arco, los tubos metálicos fueron rellenos de hormigón. Después, se procedió a hormigonar el arco por roscas, dejando la cimbra perdida. De hecho, está inspirado en el arco de ferrocarril (1942) de Martin Gil que, con sus 210 m de luz, fue record del mundo en su día.



Fig. 13. Arco de Wanxian, Chongqing, China

2. Evolución de los puentes arco en China

China cuenta con una larga historia en la construcción de puentes arco. Durante el pasado siglo XX, esta tipología se empleó con bastante frecuencia por su gran versatilidad para salvar grandes luces. De hecho, un estudio estadístico muestra que hasta 1990 casi un 30 % de estos puentes se resolvieron con arcos. En los últimos 30 años, a pesar del avance de los puentes colgantes, atirantados o de tableros de cajón postesados, como soluciones para puentes de grandes luces, el puente de arco sigue siendo un tipo estructural de gran actualidad y aplicación en la construcción moderna en China.

2.1. Puentes arco de piedra

A lo largo de la historia, China ha construido miles de puentes. Entre ellos, algunos puentes arco de piedra aún se con-

servan hasta nuestros días, como es el caso del puente de Zhaozhou, de unos 50 m de longitud, 7,3 m de altura, 9 m de ancho y un arco central de 37 metros. Situado en la provincia de Hebei, es el puente más antiguo de toda China, de hecho, su construcción se atribuye al artesano Li Chun entre los años 595 y 605 de la dinastía Sui.

Los arcos de piedra fueron un recurso ampliamente utilizado en la construcción de puentes de carreteras entre los años 1950 y 1970. Incluso en la actualidad también se utilizan en zonas montañosas de difícil acceso. Así, por ejemplo, el nuevo puente Danhe, situado en la provincia de Shanxi y abierto al tráfico en el año 2000, ¡con una luz de 146 m! y un



Fig. 14. Puente arco de piedra en Zhaozhou (izquierda) y nuevo puente Danhe (derecha)

tablero de 24,8 m de ancho, es el puente de arco de piedra más grande del mundo.

2.2. Puentes arco de acero

La producción de acero en China fue muy escasa hasta finales del siglo XX, razón por la cual, hasta 1980, sólo se construyeron unos pocos puentes arco en acero. Sin embargo, durante el periodo de transición al siglo XXI, los puentes arco de acero y mixtos comenzaron a desarrollarse muy rápidamente. Desde la finalización del puente Lupu, se han construido varios puentes arco de acero de gran luz, y hay algunos más que aún están en construcción o en licitación.

El puente arco de acero más grande en construcción es el puente Xiangxi, que cruza el río Yangtze, aguas abajo del embalse de las Tres Gargantas. En este caso, los ingenieros han optado por un espectacular arco similar al puente de

Wushan. La estructura principal consiste en un puente arco de tablero intermedio de 498 m de luz. Se estima que la obra esté concluida en 2018.

El puente Xijiang, en Zhaoqing (Guangdong), pertenece a la línea de alta velocidad Nanning-Guangzhou. Con sus 450 m de luz, batirá el record que tiene en la actualidad el puente de Dashengguan.

El puente Mingzhou, en Ningbo (Zhejiang), de 450 m de luz, se abrió al tráfico el 5 de mayo de 2011. Se trata de sendos arcos de acero en cada borde, referidos entre sí. Con una típica configuración de tablero intermedio, que sirve de tirante horizontal para los arcos, más dos planos de tirantes, uno para cada arco.

El puente Xinguang, inaugurado en 2008, cruza el río de la Perla en la ciudad de Guangzhou. Con un paso principal



Fig. 15. Puente Xiangxi (izquierda) y puente Xijiang (derecha)



Fig. 16. Puente Mingzhou (izquierda) y puente Xinguang (derecha)



Fig. 17. Puente Caiyuanba (izquierda) y puente Daninghe (derecha)

sobre el río que se resuelve mediante tres arcos, con una luz de 428 m para el arco central. El arco es una celosía de acero de canto variable desde los 12 metros en su conexión con los pórticos triangulares, hasta los 7.5 m en clave.

El puente de Caiyuanba, sobre el río Yangtze, en Chongqing, es un puente urbano cuya estructura principal es un puente arco de 420 m de luz. El esquema estructural es de tipo *bowstring* intermedio, con un tablero doble mixto en celosía tipo Warren, y un arco de acero de sección rectangular sobre el tablero, y de hormigón postesado bajo el mismo. Fue abierto al tráfico el 29 de octubre de 2007.

El puente Daninghe sobre el río Daning en Wuxia, se inauguró el 10 de octubre de 2009. Se trata de un arco de tablero superior de 400 m de luz, con celosía de 10 metros de canto constante. Su proceso constructivo fue el de avance en voladizo con atirantamiento provisional.

2.3. Puentes arco de hormigón

En China también se han construido muchos arcos de hormigón armado. En las décadas de los sesenta y setenta, debido a la carestía de materias primas, cemento y acero principalmente, se hicieron muy populares los arcos aligerados y los de doble curvatura. El mayor de éstos es el puente Qianhe, de 150 m de luz, construido en 1968 en la provincia de Henan.

El puente arco Jiangjiehe, sobre el río Wujiang (afluente del Yangtze), en la provincia de Guizhou, fue inaugurado en 1995 y es uno de los arcos de celosías de hormigón armado y pretensado que hay en China. Construido mediante avance en voladizo, cuenta con 330 m de luz y 256 m de altura, por lo que está considerado como uno de los arcos de hormigón más grandes y más altos del mundo.

El empleo de cimbras de acero como armadura de los arcos de hormigón armado se usó por primera vez en 1983 en el puente Yibin Xiaonanmen, de 240 metros de luz. El 7 de

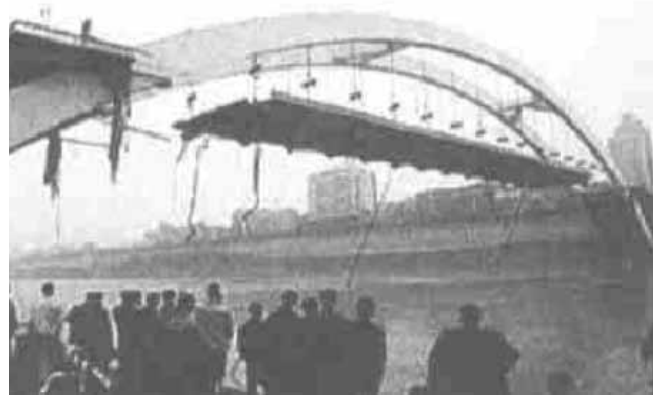
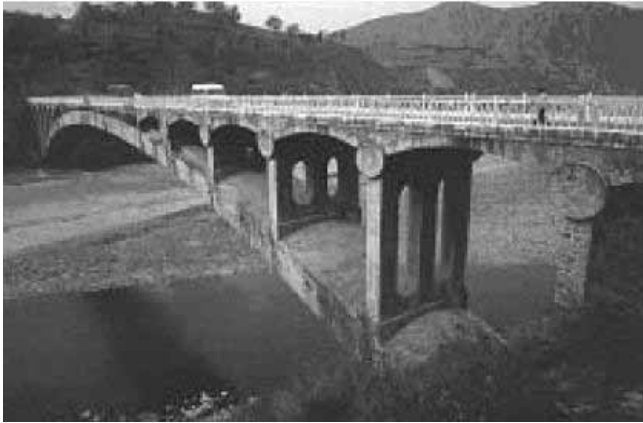


Fig. 18. Puente Qianhe (izquierda) y colapso puente Yibin Xiaonanmen (derecha)



Fig. 19. Puente Jiangjiehe



Fig. 20. Puente Yongjiang

noviembre de 2002, este puente colapsó debido a la rotura de las péndolas más cortas (ver figura 18 derecha).

En 1996 se concluyó el puente Yongjiang, de 312 m luz. Se trata de un puente arco de tablero intermedio que empleó una cimbra perdida de CFST. Como hemos comentado antes, el puente Wanxian también se construyó con esta técnica.

Sobre el río Beipanjiang, al norte de la ciudad de Qinglong, se está construyendo el puente Beipanjiang, que no será sólo el puente ferroviario más alto del mundo (283 m sobre el cauce), sino que, con una luz de 445 m, será también el arco de hormigón más grande jamás construido, batiendo el actual record de Wanxian (410 m).

El arco tiene una flecha de 100 m, con lo que se obtiene una relación luz/flecha de 4,45. La sección transversal del

arco es un cajón tricelular de canto constante de 9 metros, con ancho variable de 18 metros en clave a 28 metros en arranques. El procedimiento constructivo es similar al del puente de Wanxian, con una celosía tubular a modo de cimbra perdida. Su construcción se completará en 2016.

El puente ferroviario Beipanjiang es gemelo del Nanpanjiang, que está cerca de Qiubei (Yunnan). Ambos puentes han sido proyectados por los mismos equipos de ingeniería, con similares diseños y métodos de construcción. Cuando concluya su construcción, en 2015, el puente de ferrocarril Nanpanjiang, con 416 m de luz, será el tercero más grande del mundo.

Una estadística reciente muestra que en las últimas dos décadas se han construido en China 8 arcos de hormigón armado con luces mayores de 200 m, de los cuales, sólo 2 de ellos corresponden a la última década. Parece que esto



Fig. 21. Puente Beipanjiang (infografía)



Fig. 22. Puente Beipanjiang (izquierda) y puente Nanpanjiang (derecha)

quiere decir que ha bajado la competitividad de este tipo de estructuras frente a otras como los puentes colgantes o los puentes atirantados, e incluso si se recurre a un arco, lo más habitual hoy en día es que sean de acero o CFST.

2.4. Puentes arco de CFST

La tendencia al alza en el uso de acero en construcción, unido al descenso de la mano de obra que ha experimentado China desde 1990, ha provocado que los puentes arcos de tubos de acero rellenos de hormigón o CFST se hayan convertido

en una alternativa francamente competitiva para lograr un equilibrio entre los arcos de hormigón y los de acero. El primer puente arco CFST construido en China fue el puente Wanchang, de 110 m de luz, terminado en 1990. Desde entonces, se han construido más de 200 puentes de esta tipología, de los cuales 16 de ellos tienen luces mayores de 250 m.

El puente Yajisha, localizado en la ciudad de Guangzhou, es un puente arco CFST de 360 m de luz, terminado en junio del 2000. Fue el puente más grande de China hasta que se



Fig. 23. Puente Lianxiang (izquierda) y puente Yajisha (derecha)

concluyó el Wushan (ver figura 11), que superó en más de 100 metros la luz del Yajisha. Cada arco está compuesto por una celosía de 6 tubos de 750 mm de diámetro, rellenos de hormigón C60. Esta celosía presenta ancho constante de 3,45 m y canto variable de 8 metros en arranques a 4 metros en clave.

El puente Lianxiang, en Xiangtan (Hunan), es un puente con un vano principal de 400 m. El vano principal tiene una tipología muy particular que lo hace único en el mundo, ya que consiste en un puente arco de tubos de acero rellenos de hormigón, que además se atiranta, integrando de esta manera dos tipologías. Se abrió al tráfico el 12 de julio de 2007.

Localizado a unos 80 km al sur de la garganta del río Yangtze, en la montañosa provincia de Hubei, se encuentra el puente sobre el río Zhijinghe, que es el puente arco más alto hasta la fecha. Inaugurado el 28 de noviembre de 2009, supera el puente de ferrocarril Beipanjiang por 12 metros y al New River Gorge Bridge, de Virginia Occidental, en 27 metros.

La estructura principal consiste en un arco en doble celosía CFST de canto variable de 430 m de luz con una relación luz/ flecha de 5,5. Cada celosía está formada por 4 tubos de 1.200 mm de diámetro y 35 mm de espesor, rellenos de hormigón C50.

3. Evolución futura de los arcos

De todo lo anterior se pueden sacar algunas conclusiones para el futuro próximo, ya que el futuro a largo plazo es imprevisible. En primer lugar parece fácil predecir que se



Fig. 24. Puente Zhijinghe

van a seguir construyendo arcos de hormigón de luces medias entre 125 y 250 m, dado que los tres métodos actuales de construcción sin cimbras (atirantamiento, diagonales temporales y rotación) los hacen muy competitivos en este rango de luces frente a otras tipologías.

El problema es económico, por las dificultades de construcción y la posibilidad de emplear otras tipologías. ¿Dónde están los límites de construcción en voladizo de las cimbras? ¿Desde qué luces empiezan a ser más competitivas otras tipologías? O, dicho de otro modo, ¿cuáles son las ventajas e inconvenientes competitivos esenciales de estas tipologías respecto de los arcos? Si fijamos el rango de luces actual para los atirantados entre 200 y 1.000 m,

y las de los colgantes entre 750 y 3.500 m, tendríamos las siguientes comparaciones conceptuales:

1. En comparación con los atirantados: para grandes luces las torres de un atirantado están en torno al 20 % de la luz, lo cual penaliza el coste de estos puentes. En el caso de los arcos, para las luces máximas, habría que adoptar la tipología de tablero intermedio como en el puente Lupu, ya que para un arco de tablero superior se necesitaría un valle muy profundo y cruzarlo a mucha altura.
2. En cuanto a materiales, parece que los hormigones de altas resistencias, y los hormigones superfluidificados y autocompactables, serán los más utilizados. En el caso de arcos habría que ir a arcos de hormigón ejecutados sobre cimbra metálica perdida o de CFST también perdida.
3. Para lograr la estabilidad fuera de su plano, se puede conseguir mediante parejas de arcos separados y arriostrados el uno contra el otro. La estabilidad en su plano es más fácil de conseguir con la colaboración de las pilas o de los cables.

En estas condiciones parece que un puente en arco de hormigón de alta resistencia, mixto o con cimbra metálica o de CFST perdida, de tablero intermedio con relaciones

luz flecha en torno a 7, y con un buen cimiento para absorber la reacción horizontal de arco, podría competir con los atirantados hasta cerca de 600 m de luz.

Así pues, en lo que a luces se refiere, el rango medio de luces, o sea, las luces óptimas o rango de luces en que los arcos de hormigón serán más competitivos, serán del orden del doble de las actuales, en torno a los 300 o 400 m.

En cuanto a las luces máximas en arcos de acero, parece que el campo actual (hasta 552 m de luz) puede avanzar en las realizaciones más punteras hasta cerca de 1000 m; lo cual quiere decir que el campo que se nos ofrece a la imaginación de los ingenieros estructurales es todavía muy grande en este particular asunto de los arcos.

A modo de ejemplo, Jean Muller y Alain Spielmann presentaron una solución en arco de hormigón de 602 m de luz en el concurso del viaducto de Millau, en Francia.

Actualmente, está en fase de licitación el Sheikh Rashid bin Saeed Crossing, en Al Jaddaf (Dubai). En realidad, se trata de dos estructuras en arco, uno de 610 m luz y 190 m de flecha, y otro de 380 m de luz y 75 m de flecha, con lo que se convertirá en el arco más grande del mundo. **ROP**

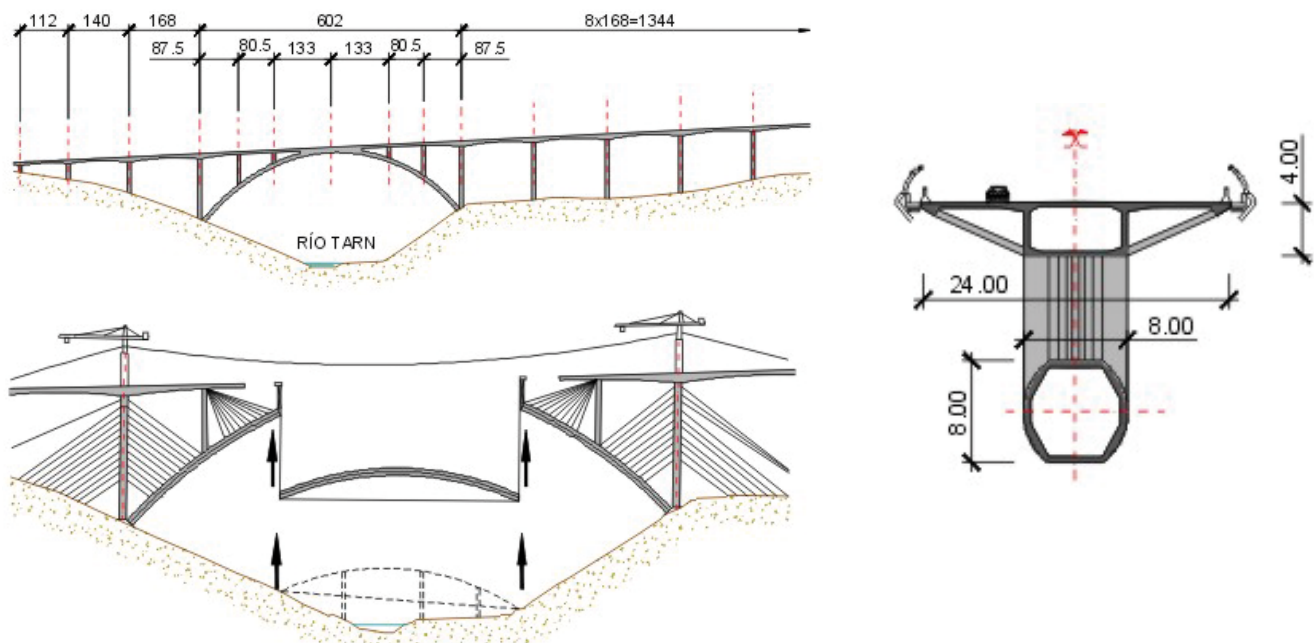
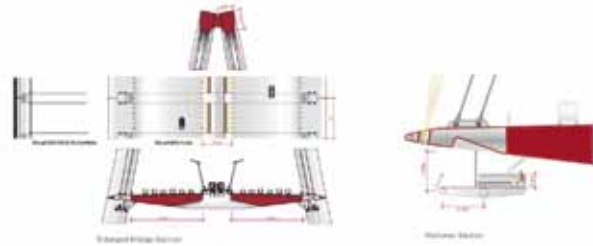


Fig. 25. Arco de Millau. Plano general y construcción



Referencias

- "A Survey of Steel Arch Bridges in China"; Sep. 2011, Volumen 5, pp. 799-808, Journal of Civil Engineering and Architecture.
- "New development of long span CFST arch bridges in china"; Baochun CHEN, College of Civil Engineering, Fuzhou University.
- "Recent development of arch bridges in China", Maorun Feng, Ministry of Transportation of China, Beijing, China.
- "An overview of concrete and CFST arch bridges in China", B. Chen, College of Civil Engineering, Fuzhou University.

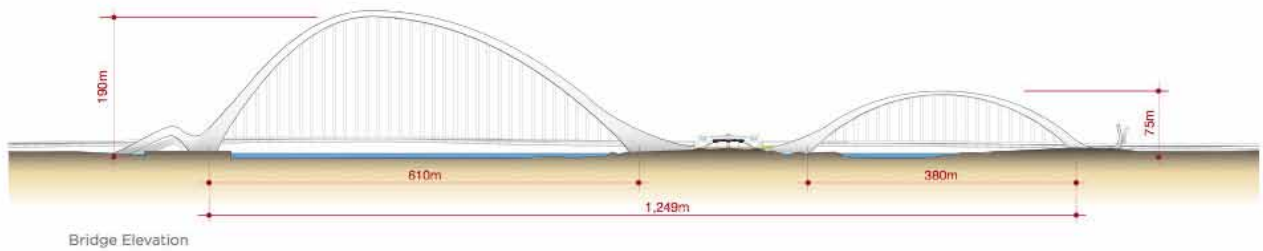


Fig. 26. Sheikh Rashid bin Saeed Crossing

Algunas consideraciones sobre la intervención en puentes bóveda de piedra o ladrillo



Javier León

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Grupo de Hormigón Estructural. ETSICCP-UPMI

Resumen

Se plantean en este artículo unas consideraciones acerca del valor de los puentes de piedra y ladrillo, no siempre bien entendidos por la sociedad y, lo que es peor, por los propios ingenieros. Eso ha conducido a que las actuaciones sobre los puentes de fábrica se hayan hecho, frecuentemente, con poco criterio y peor fortuna. Se hace una primera referencia a su valor patrimonial, concepto algo etéreo, pasando luego a la componente estructural que comporta la belleza de estos puentes, de comportamiento resistente asombrosamente generoso aunque a veces frágil, apelándose a la necesidad, casi obvia, de entender bien estos puentes antes de intervenir o, mejor dicho, antes de analizar si es preciso intervenir, cuándo y cómo hacerlo. Por todo ello, ya en las conclusiones, se reivindica la necesidad de incorporar a la oferta docente el estudio de estos puentes, de formar a gestores y técnicos y de difundir hacia la sociedad el valor y el papel de estas nobles construcciones, dispuestas a seguir jugando un papel de primer orden en las infraestructuras de la sociedad actual.

Palabras clave

Puente de fábrica, bóveda, arco, valor patrimonial, formación

Abstract

The author raises a series of aspects related to the value of stone and brick bridges, that are not always understood by the public and, what is worse, by engineers themselves. This has led to interventions on masonry bridges that have often been made with poor criteria and mixed fortune. The article starts out by referring to the somewhat intangible concept of the heritage value of these bridges, before passing on to the structural component that encompasses the beauty of these bridges, and which, while sometimes fragile, incorporate a truly outstanding bearing capacity. The author makes the case in support of the almost obvious need for a correct understanding of these bridges prior to any intervention or, preferably, to establish whether any intervention is in fact required and, if so, when and how. The article concludes by arguing the need to include the study of these bridges in engineering coursework, to train administrators and technicians and to inform the public of the value and role of these noble structures that are destined to play an essential role in the infrastructures of modern society.

Keywords

Masonry bridge, vault, arch, heritage value, education

1. Ámbito y propósito

Marco Vitruvio Polión [1] estableció los tres principios en los que se basa la arquitectura: la belleza (*venustas*), la firmeza (*firmitas*) y la utilidad (*utilitas*) o función. Afirmaba que las tres virtudes han de estar en equilibrio, sin sobrepasar ninguna de ellas a las otras dos. ¿Participan los puentes de la condición de objeto arquitectónico y, por tanto, del equilibrio de belleza, capacidad resistente y funcionalidad? La percepción de la sociedad, alimentada en gran parte por los propios ingenieros, es que de los puentes sólo deben esperarse prestaciones funcionales y resistentes. Ése ha



Fig. 1. Puente de Narbarte, sobre el Bidasoa (Navarra)



Figura 2. Viaducto de El Lledoner, N-340. Barcelona

sido, por desgracia, el énfasis que ha primado en muchas administraciones, autores de reglamentos, constructores, docentes e investigadores. También hay que decir que, en tiempos recientes, se ha violado en alguna ocasión el equilibrio en la búsqueda de la belleza entendida con cierto carácter exhibicionista. No siempre fue así, ni es un sino inexorable que los puentes queden fuera del aludido equilibrio de los principios vitruvianos.

Los puentes romanos, medievales, renacentistas y barrocos, y también los de la Ilustración y su heredera la Revolución Industrial, buscaron el citado equilibrio, y es preciso admitir que, en líneas generales, lo consiguieron, dejando un legado que la sociedad del s. XX maltrató por la vía de la destrucción impuesta por guerras devastadoras y por actuaciones no siempre afortunadas aunque, dicho sea en descargo de sus responsables, bienintencionadas y fuertemente condicionadas por la escasez de recursos y la exigencia de satisfacer crecientes demandas.

En este artículo¹ se quiere centrar el objeto de las reflexiones en los puentes de piedra o de ladrillo, los más antiguos de todos los supervivientes que han llegado hasta nosotros de

épocas pasadas y a los que más atención y buena pluma han dedicado ilustres ingenieros, historiadores, arqueólogos y responsables del patrimonio. El *leitmotiv* es el de la aplicación de los principios de Vitruvio y cómo cabe interpretarlos en el tratamiento que cabe dar a los puentes de fábrica en el s. XXI.

2. Acerca del valor patrimonial de los puentes de fábrica

Es preciso admitir que el concepto de valor patrimonial es difuso porque se entremezclan conceptos estéticos, utilitarios, científicos, históricos, paisajísticos, económicos, sociológicos, políticos, simbólicos y hasta de metáfora del lenguaje [3]. Afecta, pues, a aspectos tangibles, no siempre cuantificables, y a aspectos intangibles, casi nunca cuantificables. La referencia [4] contiene, a estos efectos, una propuesta de acercamiento a este concepto que concita los tres referidos principios vitruvianos.

El capítulo 2 de la referencia [2] contiene un conjunto de criterios de actuación que, en sintonía con documentos como la carta de Venecia de 1964 o del Consejo de Europa de finales del s. XX, permiten al ingeniero valorar los aspectos patrimoniales del puente en el que se plantea una intervención.



Fig. 3. El ciego de Toledo. Sorolla, 1906. Sitúa al puente como nexo entre dos partes de la ciudad, para comunicar personas, entre la ciudad y el campo, integrado de manera equilibrada en su entorno. Meadows Museum, Dallas, Texas, EE. UU.



Fig. 4. El puente de Ponteceso sobre el río Anllóns, indisolublemente vinculado a su entorno



Fig. 5. Puente de Urnieta, durante el ensayo hasta rotura



Fig. 6. *Le viaduc*. Van Gogh, 1887. Solomon R. Guggenheim Museum, Nueva York



Fig. 7. Construcción de un puente sobre el río Tera, en Zamora (Foto: Laurent, mediados del s. XIX)



Fig. 8. Autopsia del puente de Urnieta tras su ensayo hasta rotura

La belleza (*venustas*) de un puente de fábrica está muy fuertemente condicionada por el paisaje en que se ubica el puente, pero más aún por la armonía de sus formas, las proporciones de sus elementos constitutivos o por la textura de sus paramentos. Esa belleza se nutre también, para las sensibilidades de los ingenieros, de los aspectos constructivos y resistentes que lee y goza quien tiene formación para hacerlo. En ese sentido, la bóveda (término mejor que el arco en los puentes de piedra) siempre fue motivo de fascinación por su forma de trabajo.

En ocasiones, son otros los que ven belleza en obras de fábrica de apariencia modesta, funcional y resistente, lo que obliga a ser especialmente modesto y cauto en la interpretación de la *venustas*, concepto abierto al enriquecimiento de puntos de vista que se aportan desde fuera de la ingeniería. Es una actividad interesante detectar cómo han sido representados los puentes en la historia del arte, lo que tiene que ver con la integración de éstos en el circuito cultural que se reclama en este artículo.

Elemento de gran importancia es la correcta adscripción temporal de un puente o de sus diferentes elementos, pues es muy frecuente que estas estructuras hayan tenido adita-

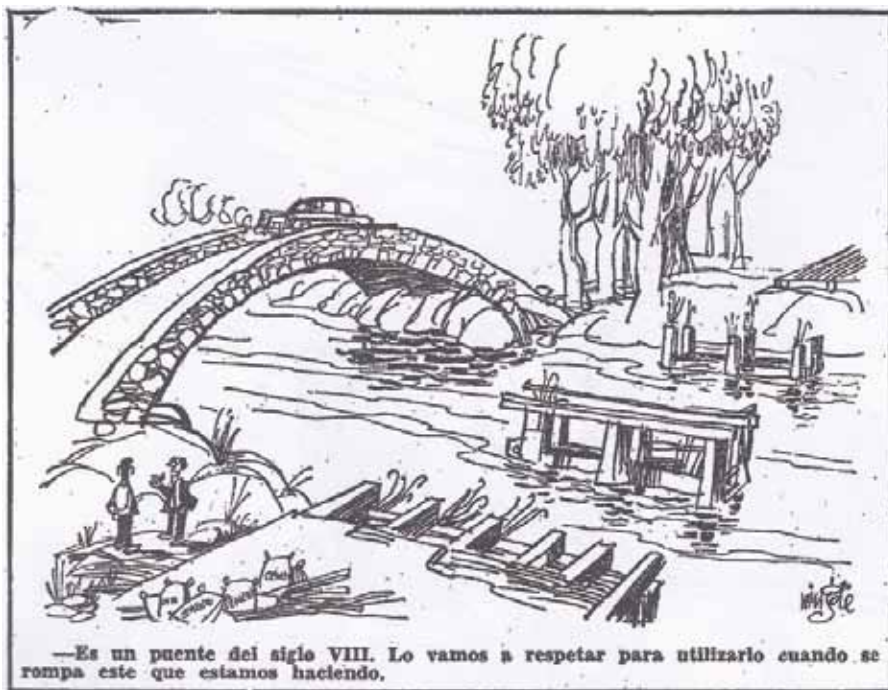


Fig. 9. Visión de Mingote en ABC a propósito de los puentes de fábrica

mentos, mutilaciones, refacciones e intervenciones de épocas muy diferentes. El capítulo 4 de la referencia [2] contiene una propuesta en esa dirección que no se había encontrado en la literatura especializada. Como ya se ha dicho [5], situar correctamente un puente en el momento temporal de su construcción aporta implícitamente mucha información acerca de la tipología probable de su cimentación, de sus pilas y estribos, de la morfología de sus tímpanos, bóvedas y rellenos, así como de los procesos constructivos utilizados. Eso es de gran utilidad para historiadores, ingenieros, arqueólogos y para la sociedad en general.

3. Acerca de la capacidad resistente

Los puentes de piedra o ladrillo tienen una propiedad que les diferencia notablemente de los más modernos de hormigón, metálicos o mixtos: su enorme capacidad resistente, que les permite aceptar sobrecargas muy superiores a las consideradas en el momento de la construcción. Como es sabido, eso es debido tanto a su tipología, la bóveda, como al hecho de que las sobrecargas, incluso las más exigentes de la actualidad, sean una fracción pequeña de las cargas permanentes que aportan el peso propio, los rellenos, el pavimento, etc.

Esta cualidad ha hecho de los puentes de fábrica objeto claro de ensanches y paso preferente de cargas pesadas en detrimento de obras más modernas construidas, como es natural, para los trenes de cargas vigentes en el momento de su proyecto, pero no para los requisitos de mayor exigencia que requieren los códigos más modernos.

La intervención elegida, o incluso la no intervención, ha de ser el resultado de un estudio previo suficientemente prolijo

de las alternativas posibles, lo que suele llamarse ‘estudio de soluciones’, como señala el capítulo 5 de la referencia [4], que se sigue de cerca en este apartado. A ese estudio debe contribuir el análisis estructural del puente, tanto en el estado previo como el posterior a la intervención para cada una de las situaciones imaginadas posibles para el puente. El análisis desempeña, pues, la bien conocida función justificativa de cada una de las soluciones técnicas planteadas. Sin embargo, en este contexto, el análisis juega otro papel mucho más importante y lamentablemente descuidado por los ingenieros desde que dejaron de proyectarse y construirse estas nobilísimas construcciones: el de permitir entender cómo funcionan, calibrar los órdenes de magnitud de los esfuerzos y, tras ello, aprovechar las capacidades estructurales del puente. El entendimiento debe servir también para rendir tributo a la sabiduría de aquellos que los proyectaron y construyeron.

Sólo desde la comprensión del fenómeno resistente de las obras de fábrica y del papel resistente que tiene cada uno de sus elementos se puede discernir qué es importante y qué no lo es tanto, base esencial en la toma de decisiones. La experiencia demuestra que, en general, muy pocas cosas son prescindibles. También enseña la experiencia que muchas de las no siempre afortunadas intervenciones del pasado ponen de manifiesto la ignorancia de sus autores acerca de cómo funcionan estos puentes. De la ignorancia se derivan, automáticamente el desprecio, es decir, la falta de aprecio y el desdén. De ahí al desamor y al desmán sólo hay un paso. Es, por desgracia, un comportamiento humano cuyas lamentables consecuencias están bien probadas.

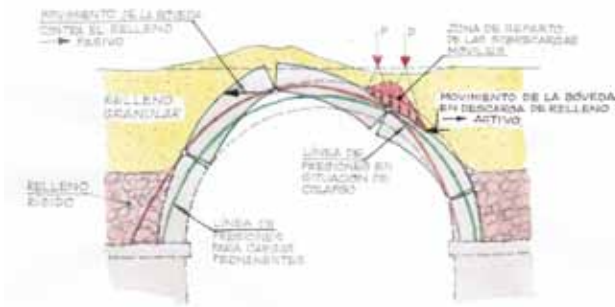


Fig. 10. Esquema del comportamiento de una bóveda de fábrica frente a sobrecargas [2]

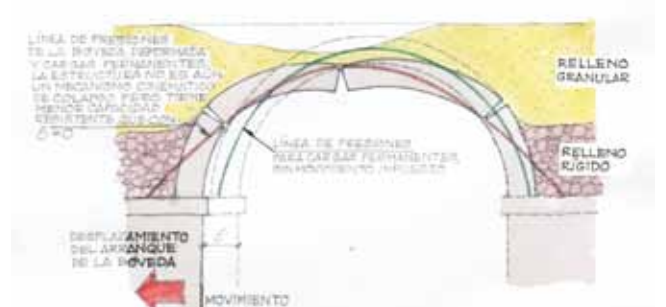


Fig. 11. Esquema del comportamiento de una bóveda de fábrica frente a movimientos impuestos [2]



Fig. 12. Socavación de la pila de un puente ferroviario

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 el río Almonte.

Equipos especiales para ejecución del arco del puente (384m) sobre el río Almonte para la LAV Madrid - Extremadura.

Alsina
SOLUCIONES EN ENCOFRADOS

Distribuidor Oficial para Internacional



Fig. 13. Pérdida de durabilidad de una bóveda de ladrillo

Resulta paradójico que el progreso, asociado apriorísticamente al avance del conocimiento, haya traído a la ingeniería un retroceso en el saber y un desapego de la comprensión de la forma de trabajar de los puentes de piedra o ladrillo y, por extensión algo simplificada, de todas las construcciones que no son de hormigón o acero.

Por fortuna, son cada vez más fuertes las voces de ingenieros y expertos de otras disciplinas que reivindican que el verdadero progreso de la ingeniería pasa por saber del *ethos* de estos puentes, incluida muy principalmente la faceta estructural, que llega a ser, incluso, comprensiva de todas las demás. En ese proceso se hace necesario destacar la necesidad de que el ingeniero sepa identificar las amenazas que se ciernen sobre los puentes de fábrica [6, 7] y, muy en particular, los riesgos derivados de la socavación de sus cimentaciones. Éstas son, sin duda alguna, el talón de Aquiles de estas construcciones; a ese problema se dedica con extensión la referencia [8].

Pero también hay que incluir en este apartado la durabilidad, porque influye en la capacidad resistente tanto como puede hacerlo en la apariencia. Hay poca documentación, con excepción de las referencias [6] y [7], y es preciso hacer también en este campo un esfuerzo de pedagogía que permita superar las importantes lagunas formativas de los técnicos, lo que resulta paradójico porque hay cada vez mejores técnicas de reconocimiento y materiales, pero poca formación en los proyectistas.

Dentro de este apartado parece oportuno plantear asimismo la necesidad de investigar, tanto hacia atrás (profundizando

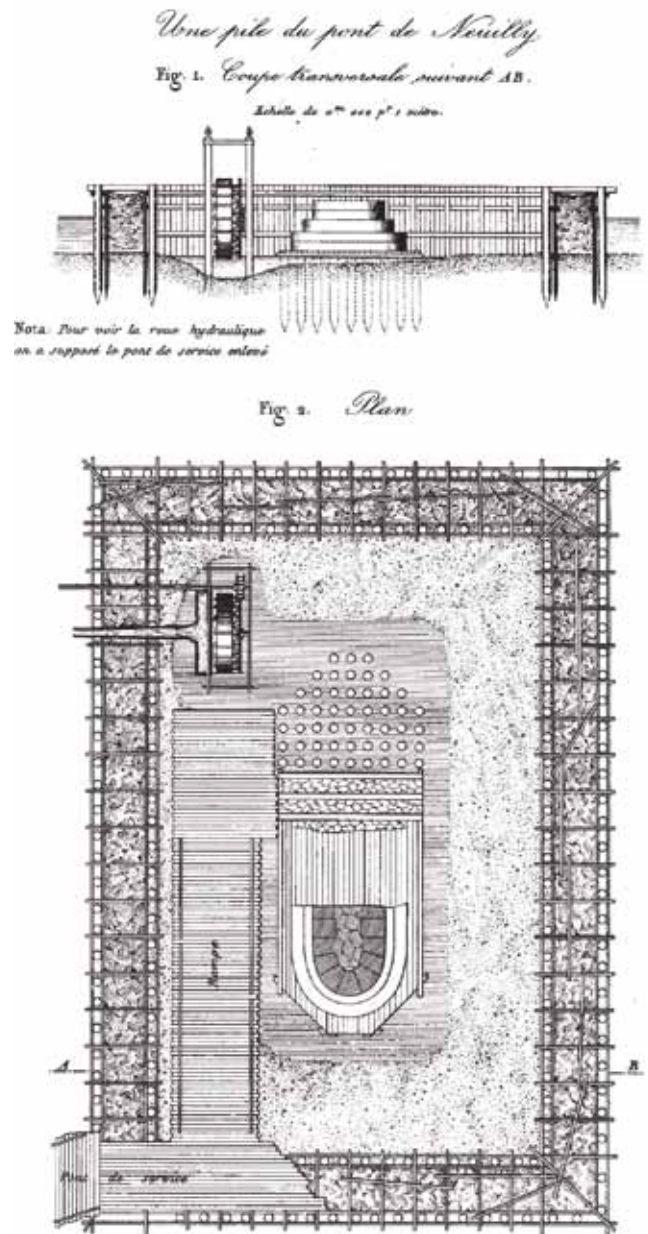


Fig. 14. Cimentación del puente de Neuilly. Perronet. Biblioteca de la
ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid

en el conocimiento de los procedimientos de proyecto y construcción, de los materiales utilizados o de los criterios de conservación de los puentes), como hacia adelante. En efecto, no cabe una visión meramente retrospectiva de la historia, sino que el conocimiento de ésta debe ayudar, junto con modernos procedimientos no destructivos, a la

TASSEMENTS DES VOÛTES

Fig. 2. *Pont de St. Edme construit en 1768 sur la Seine à Nogent*

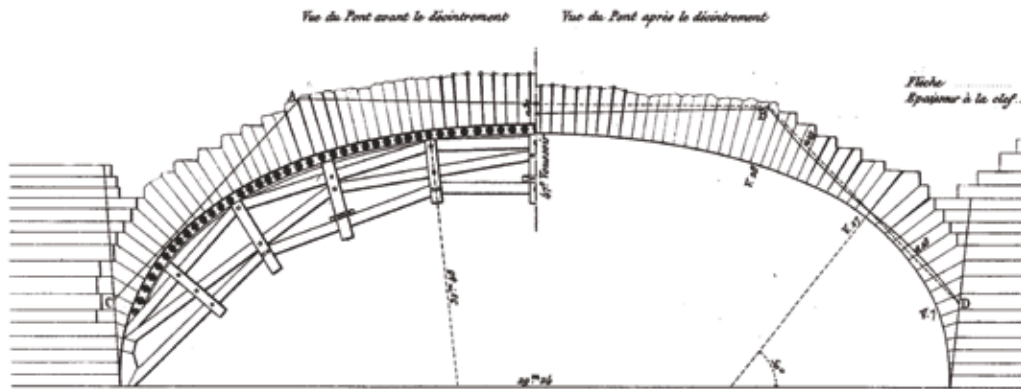


Fig. 15. Recursos para considerar a priori el ajuste de las dovelas tras el descimbrado y los movimientos posteriores por fluencia. Morandière, 1874. Biblioteca de la ETS de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Madrid

identificación geométrica de los elementos ocultos de los puentes, los rellenos, las lengüetas, etc.). También puede ser de enorme utilidad conocer cómo fueron los procesos constructivos y el porqué de ciertos detalles aparentemente insignificantes.

Aunque se es consciente de la dificultad que comporta el tratamiento de las construcciones existentes en general, y de los puentes de fábrica en particular, es oportuno suscitar la conveniencia de arbitrar documentos normativos que permitan ayudar a los técnicos, como sucede en obra



Fig. 16. Ensanche del puente de Algete, sobre el Jarama. Si bien el resultado formal es impecable y el proceso está muy bien documentado, se echa de menos un esfuerzo mayor por haber aprovechado más las posibilidades estructurales de las bóvedas



Fig. 17. Aspecto del puente de Ponteceso, ensanchado y documentado, pero con una conducción intrusa que no fue posible reubicar

nueva, a proceder en el contexto de unos procedimientos sancionados por el conocimiento previo para evaluar las capacidades resistentes de estas construcciones. En ese sentido, el capítulo 5 de la referencia [2], que se basa, a su vez, en las referencias allí citadas, está planteado con carácter pre-normativo de auxilio al ingeniero que ha de enfrentarse con este problema y sea capaz de sacar el máximo partido posible a estas construcciones.

4. Acerca de las posibilidades funcionales

Se trata del tercer principio de Vitruvio: *utilitas*. Los puentes, a diferencia de los edificios, no son objetos arquitectónicos por sí mismos. Cumplen la función de dar soporte a una vía que se encuentra con el obstáculo que salva el puente, lo que condiciona en gran medida el tipo de intervención.

Así, es frecuente que el tablero sea más estrecho que la plataforma de la carretera a la que da soporte, lo que ha hecho considerar la posibilidad de ensanchar el tablero. El documento [2], capítulos 3 y 6, trata el problema con suficiente extensión, dando algunas ideas para la intervención que, en general, no es deseable porque desnaturaliza el puente y, como muestra la experiencia, ha provocado daños de carácter irreparable. Pero el uso es vida para el puente, por lo que dicho documento ha preferido aportar, por encima de

todo, criterios que ayuden al técnico a analizar si verdaderamente no es posible acudir a otras soluciones alternativas al ensanche o, si el ensanche es ineludible, documentar la intervención y asegurar la reversibilidad de la actuación que se emprende para que, en un futuro, se pueda devolver al puente la configuración que tuvo.

Cada vez es más frecuente que el puente de fábrica sea objeto de intervenciones restauradoras cuando, reconocido el valor patrimonial y resuelto el problema funcional del tráfico, se da al puente un uso menos exigente pero no menos importante, como ruta peatonal, ciclista o de tránsito reducido de vehículos a motor. Es decir, se plantea la posibilidad de revertir una actuación anterior, si fue poco afortunada, a una más cercana a la asociada al puente primigenio. La cuestión tampoco es sencilla, porque se corre el riesgo de eliminar elementos añadidos de algún valor y porque, si no hay documentación que lo avale, la restauración puede generar 'falsos históricos' que es preciso evitar igualmente. La referencia [2] da, en los capítulos 3 y 6, criterios para la actuación en ese siempre deseable supuesto.

Además, es preciso tratar de conciliar otros requisitos funcionales importantes, como los sistemas de contención de vehículos, con la configuración formal de un puente de este



Fig. 18. Desprendimiento de la hoja de intradós de un puente de ladrillo

tipo, evitando en la medida de lo posible la implantación de sistemas que provoquen no sólo un grave deterioro a la imagen del puente, sino que resulten además poco eficaces puesto que el anclaje de los dispositivos de contención no sea posible o tenga pocas garantías. En ese mismo saco se ha de meter la interacción con otros servicios, con frecuencia 'intrusos' en el puente, como conducciones de diferente tipo.

5. Conclusiones

Relativas a la gestión del patrimonio:

a) La gestión de los puentes de fábrica, y esto es extensivo a cualquier otro tipo de puente, ha de incorporar los elementos que caracterizan su valor patrimonial, en los términos apuntados en el apartado 2 de este artículo.

b) Estos puentes han de ser incorporados al circuito cultural al que ya pertenecen edificios objeto de valoración social, turística y de conocimiento.

Relativas a la docencia y la formación de los técnicos:

a) Se hace necesario apoyar la incorporación, si aún no se ha hecho, de asignaturas que traten de los valores de estos

puentes, de su historia, de su funcionamiento estructural, de su inspección y diagnóstico, de las posibles intervenciones que cabe emprender en ellos. La sociedad precisa de ingenieros que sepan entender y valorar estos puentes y de situarlos en un contexto más amplio.

b) Por las mismas razones, se hace aconsejable formar a los ingenieros de las administraciones, consultorías y empresas constructoras.

c) También se hace preciso fomentar la preparación de técnicos, encargados y oficiales en técnicas de restauración, de materiales y procedimientos ancestrales, en un contexto actualizado, obviamente.

Relativas a la investigación teórica y aplicada:

a) Es preciso mejorar en ámbitos como el de las técnicas de reconocimiento, mediante técnicas no invasivas, de este tipo de puentes, así como los procedimientos de control de actuaciones como inyecciones para rigidizar rellenos o impermeabilizar el trasdós de bóvedas, estribos, tímpanos, etc.

b) Hay todavía mucho recorrido en la investigación de los procesos históricos de dimensionamiento y construcción

de los puentes de fábrica. El hecho de que sean ya objetos construidos no resta valor al conocimiento necesario de las técnicas de proyecto y construcción para entender por qué son así los puentes.

c) Se hace necesario conocer fenómenos como la fluencia y los fenómenos de cansancio en fábricas, especialmente las de ladrillo, que, aunque menos frecuentes, comportan algunas amenazas a la seguridad estructural.

d) Es preciso profundizar en las técnicas de evaluación de la sensibilidad de este tipo de estructuras frente a acciones sísmicas y los procedimientos para su adecuación.

e) Igualmente es necesario aún profundizar en los procedimientos de análisis frente a deformaciones impuestas, especialmente porque los modos de rotura frecuentemente condicionantes de la capacidad portante de estas estructuras son los de la formación de mecanismos. Las deformaciones impuestas adelantan la formación de éstos, reduciéndose drásticamente la seguridad estructural.

f) Estudio del papel de los rellenos, esencial y sorprendentemente poco analizado en la literatura especializada.

Relativas a las posibilidades futuras de estas obras:

a) La eventual redacción de códigos estructurales que regulen el tratamiento que los técnicos pueden dar al análisis y la intervención en este tipo de puentes.

b) Explorar las posibilidades de obras nuevas de fábrica, siquiera en un cierto rango de tipologías y luces, teniendo en cuenta los medios disponibles en la actualidad para la producción de sillares o ladrillos, los morteros, el montaje, etc. a la luz de consideraciones de sostenibilidad y muy reducidos costes de mantenimiento.

c) Avanzar en la definición de criterios y técnicas que permitan armonizar, con imaginación, los puentes existentes frente a la capacidad de desagüe, la sensibilidad frente a las socavaciones, la contención de vehículos, etc. **ROP**

Notas

(1) Coincide en el tiempo la redacción de este artículo con la presentación del documento [2], acto en el cual se rindió merecido homenaje a Ramón del Cuvillo, maestro de muchos de nosotros e inspirador de ese documento. Fue ingeniero que sintió los puentes y que buscó siempre el referido equilibrio, dando un ejemplo que debe perdurar.

(2) Los romanos establecieron la figura del 'curator viarum', funcionarios de alto nivel, precisamente para asegurar desde la administración la conservación, es decir, la seguridad y funcionalidad de la calzada, de la que los puentes eran pieza esencial.

Referencias

- [1] Vitruvio Polión, M. Los Diez Libros de Arquitectura. Traducción del latín y comentarios de Don Joseph Ortiz y Sanz. Madrid, 1787. Reedición de Akal. Madrid, 1992.
- [2] Grupo de trabajo "Puentes de Fábrica" del Comité de Puentes de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC-AIPCR). Criterios de intervención en puentes de fábrica. Madrid, 2014.
- [3] Bauder, E. Las edades del puente de fábrica. Terminología y metáfora. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, 2007.
- [4] Bernabéu J.; Berrocal, A.; Hernández P., López A., Hernández, V. La consideración patrimonial de las obras públicas. Fundación Miguel Aguiló. <http://www.fundacionmiguelaguilo.org/2011/06/la-consideracion-patrimonial-de-las-obras-publicas/>, 2011.
- [5] León, J.; Corres, H.; Prieto, F. Inspección y evaluación de estructuras existentes: una tarea para ingenieros valientes. Revista de Obras Públicas, nº 3.492. 2008.
- [6] ADIF. Inspección y diagnosis de puentes ferroviarios de fábrica. Madrid, 2008.
- [7] García de Miguel, J.M^º. El tratamiento y conservación de la piedra, el ladrillo y los morteros en monumentos y construcciones. Consejo General de la Arquitectura Técnica de España. Madrid, 2009.
- [8] Grupo de trabajo "Puentes de Fábrica" del Comité de Puentes de la Asociación Técnica de Carreteras (ATC-AIPCR). Cimentaciones de fábrica en puentes. Madrid, 2008.

Incluso los puentes arco se deterioran. Conservación y mantenimiento



Gonzalo Arias Hofman

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
 Director de Ingeniería de Conservación de
 INES Ingenieros

Resumen

Los puentes arco, como cualquier infraestructura existente, se construyen y se mantienen en unas determinadas condiciones de servicio a lo largo de una vida útil, hasta que desaparecen o se transforman.

El mantenimiento es, de todas las tareas a llevar a cabo, la tarea que más se prolonga en el tiempo. Por la importancia que adquieren dichas tareas, se dedica este artículo a describir las principales tareas de conservación y mantenimiento para el caso de los puentes de tipo arco ‘modernos’, como un elemento más de una infraestructura lineal, aunque de singular importancia.

Por último, en el artículo se muestra cómo se valora un puente arco en el marco de los sistemas de gestión de puentes, que es una de las herramientas necesarias para la gestión de activos.

Palabras clave

Arco, conservación, mantenimiento, gestión de puentes, vida útil

Abstract

Arch bridges, like all structures, are built and maintained to suit certain load conditions throughout their service lives until they either disappear or are transformed.

Of all the activities to be carried out on a structure, maintenance is the one that extends the longest in time. In view of the importance of these actions, this article establishes the main conservation and maintenance activities for “modern” arch type bridges which, while serving as yet one further element of a linear infrastructure, are elements of vital importance.

The article also describes how an arch bridge is assessed within a bridge management system, this being one of the necessary systems for asset management.

Keywords

Arch, conservation, maintenance, bridge management, service life

1. Introducción

La gestión de activos (*asset management*) es una metodología de trabajo aplicable a múltiples sectores de trabajo. Llevado al caso de las infraestructuras civiles de comunicación (carreteras, ferrocarril) implica valorar el activo como un bien que se construye pero que, sobre todo, se mantiene en unas determinadas condiciones de servicio a lo largo de una vida útil hasta que desaparece o se transforma. Un mejor ajuste en la estimación de los costes de conservación y mantenimiento permite tomar la decisión más adecuada en la planificación de la infraestructura, por lo que el conocimiento de las actividades necesarias para llevar a cabo una correcta conservación de la misma es el primer paso para centrar la estimación de dichos costes.

En este artículo se van a describir las principales tareas de conservación y mantenimiento para el caso de los puentes de

tipo arco ‘modernos’, como un elemento más de una infraestructura lineal, aunque de singular importancia. Por puentes arco ‘modernos’ se consideran en este artículo todos aquéllos construidos a partir de las primeras décadas del siglo XX con nuevos materiales (acero, hormigón armado y pretensado), diferentes de los empleados en puentes históricos (fábrica de sillería, ladrillo, mampostería, hormigón en masa, hierro) y que, normalmente, dan respuesta a la necesidad de salvar grandes luces. También se incluyen los puentes arco en los que el componente estético u ornamental justifica la elección de esta tipología, por encima de una razón técnica. Se distingue esta excepción porque suelen ser los casos en que los costes de conservación y mantenimiento se disparan y aparece un mayor número de elementos implicados en la conservación. Finalmente, en el artículo se quiere mostrar cómo se valora un puente arco en el marco de los sistemas de gestión de

puentes, que es una de las herramientas necesarias para la gestión de activos.

2. Conservación y mantenimiento de puentes

Los términos de conservación y mantenimiento aluden a todas las tareas que permiten mantener en las condiciones para las que fue diseñada y construida una infraestructura. Normalmente, se consideran dos niveles de intervención: ordinario y extraordinario, siendo las tareas englobadas bajo el primer término todas aquéllas que se pueden programar y que no requieren el empleo de medios auxiliares especiales, mientras que las tareas extraordinarias implican acciones no previsibles o con necesidad de movilización de medios auxiliares singulares.

2.1. Mantenimiento ordinario

En [1] ya se citaban las operaciones más habituales para el mantenimiento ordinario de los puentes, y los puentes arco no son una excepción. La mayoría tienen que ver con el mantenimiento de los elementos de la plataforma, que fácilmente

se pueden llevar a cabo con los medios habituales de conservación y explotación de una infraestructura (limpieza de elementos, pequeñas reparaciones, aplicación de pinturas, etc.). Nada se puede resaltar de los puentes arco con respecto a las actividades llevadas a cabo en los puentes de otras tipologías, pero se llama la atención sobre una de las tareas relativa al “estado de dispositivos que facilitan la inspección”, que en puentes de gran envergadura o difícil acceso cobra gran importancia. Se conocen pocos puentes arco que contemplen este tipo de dispositivos de acceso, salvo que se trate del interior de elementos visitables, en cuyo caso suelen existir escaleras internas y elementos de iluminación.

2.2. Mantenimiento extraordinario

Dentro de las tareas de mantenimiento extraordinario, se deben distinguir las siguientes:

1. Puesta a cero. Se trata las tareas que implican el mantenimiento de todos los elementos del puente (y no sólo de los ele-



Fig. 1. Vistas de los accesos los diferentes elementos de los arcos de Alconétar (autovía A-66, Cáceres)

mentos de la plataforma, como sucede con el mantenimiento ordinario), con el uso de los medios auxiliares de acceso que sean necesarios para poder acceder a todos ellos.

La degradación de los materiales constitutivos de los diferentes elementos del puente, o el deterioro de ciertos elementos por el desgaste a que se ven sometidos por el uso obligan a realizar cada ciertos años una renovación y mantenimiento de los sistemas de protección de los materiales o a la sustitución de los elementos desgastados.

Actualmente, con la exigencia de un manual de mantenimiento para los puentes [2], las tareas de puesta a cero deben quedar previstas desde el proyecto del puente.

Cualquier programa serio de gestión de activos debe valorar estas tareas de puesta a cero, lo que implica asumir unas inversiones periódicas. Esto no significa que cada 15 ó 20 años deban llevarse a cabo todas las actividades de puesta a cero, dado que la vida útil de los elementos es variable, pero sí que durante la vida útil del puente habrá que llevar a cabo una serie de intervenciones. Como datos indicativos, se pueden dar las siguientes pautas:

- Para los elementos metálicos (salvo acero de tipo Cor-ten): cada 15-20 años, preparación de los paramentos y aplicación de un sistema de protección a base de capas de pintura. La periodicidad vendrá determinada por la agresividad del ambiente en que se encuentre la estructura, la existencia de un correcto sistema de drenaje y la calidad del tratamiento anterior. Esta recomendación es válida tanto para los elementos estructurales como para los equipamientos (barandillas, sistemas de contención, impostas, etc.).

- Para los elementos de hormigón: conviene realizar cada 15 años una limpieza de los paramentos de hormigón y aplicar un tratamiento protector (para llevar a cabo un control frente a la penetración de aguas, gases, vapores, etc. [3]), con la reparación de todos aquellos daños locales como fisuras y zonas con armaduras vistas. Esta recomendación es válida tanto para los elementos estructurales como para los equipamientos (sistemas de contención, impostas, etc.).

En puentes carreteros sometidos a una vialidad invernal fuerte, donde las sales de deshielo entran en contacto directo con las aceras e impostas, conviene proteger estos paramentos con un tratamiento más contundente (tipo poliureas) para garantizar su durabilidad.

- Para las juntas de dilatación (sólo para puentes carreteros): dependiendo de la tipología de las mismas, puede ser necesaria su renovación cada 1-2 años (juntas de tipo betún modificado según [4]), cada 10-15 años (tipo perfil de elastómero) o 30 años (tipo peine, modulares), aunque estas magnitudes dependen considerablemente del tráfico de vehículos pesados existente.

Se debe insistir siempre en la necesidad de disponer bajo la nueva junta de dilatación de un faldón de recogida del agua, puesto que es a través de las juntas de dilatación donde se produce al acceso del agua (acompañada de sales de deshielo, en zonas de vialidad invernal) hacia las pilas o estribos, produciendo el consiguiente deterioro. Estos faldones apenas tienen coste, pero evitan en gran medida daños cuya reparación es muchísimo más alta. Pueden estar formados por bandas elastoméricas reforzadas e incluso por láminas de impermeabilización.



Fig. 2. Ejecución de banda de estanqueidad bajo junta de perfil de elastómero (izquierda) y bajo junta de betún modificado con protección de arena (derecha)

- Para los aparatos de apoyo, también dependiendo de la tipología de los apoyos puede ser necesaria su sustitución cada 25-40 años (apoyos de tipo elastomérico, según [5]) o 40-50 años (tipo pot) por citar las dos tipologías más frecuentes.

- Para la renovación del pavimento (sólo para puentes carreteros) el plazo necesario depende fundamentalmente del tráfico soportado, pero se puede estimar entre 8 y 15 años la

necesidad de una renovación del firme. Puede que se opte por un fresado superficial y reposición de la capa de rodadura, pero en el momento en que se plantea un refuerzo del firme, que suele venir determinado por el desgaste de la carretera en la que se encuentra el puente, con escarificado completo del paquete de pavimento sobre el tablero, debe asumirse la renovación de la impermeabilización del mismo, puesto que habrá quedado seriamente dañado en la operación de retirada del pavimento existente.

- Para el sistema de drenaje, suponiendo que exista, conviene realizar una actualización cada 1-2 años. Los elementos que lo componen (canalones de recogida de agua, tubos y gárgolas de desagüe, bajantes, etc.), suelen estar fabricados en materiales poco durables (PVC) y sometidos a la acción del viento, el peso del agua helada en su interior, o bien sus sujeciones no están debidamente protegidas (bridas, tornillería y demás fabricados en acero no galvanizado o inoxidable).

- Como singularidad de los puentes arco, en el caso de existir péndolas de tipo cable (en puentes arco de tablero inferior) es recomendable controlar las tensiones de trabajo de las mismas cada 10 años, mediante operaciones de pesaje (más lento, caro y fiable) o ensayo de cuerda vibrante (más rápido y barato, pero con mayores incertidumbres). El control de la protección de los anclajes es igualmente necesario, en principio bastaría con el desmontaje y limpieza de los capots de protección y posterior renovación del sistema de protección en algunas de las péndolas. Asimismo, el control de los ca-

bles y sus protecciones debería realizarse en inspecciones especiales cada 10 años.

Si en lugar de cables se emplean barras, interesa controlar el estado de las uniones, normalmente constituidas por bulones.

Una operación de sustitución de una barra o cable puede resultar considerablemente compleja, por lo que considera fuera del alcance de la conservación y mantenimiento.

2. Refuerzo. Una operación de refuerzo total o parcial de un puente arco puede venir motivada por dos causas: un fallo en el diseño o construcción del puente o de alguno de sus elementos, o la necesidad de aumentar la capacidad resistente a nivel local o global. En este segundo caso, la operación de debe englobar en el cuarto grupo de actividades (reforma) y no en éste.

El tipo de refuerzo necesario resulta tan variable como el posible error cometido y no es posible realizar una enumeración completa de ejemplos (que además, por su extensión, exceden claramente del objeto de este artículo), más allá de citar algunos de los tipos de refuerzo más comunes [6]:

- Recrecido con hormigón.
- Refuerzo con armaduras de acero.
- Refuerzo con chapas de acero.
- Refuerzo con laminados de materiales compuestos.
- Refuerzo con pretensado exterior.



Fig. 3. Puente de Giménez Abad sobre el río Ebro (Zaragoza) con péndolas formadas por cables y uniones mediante bulones

3. Actividades frente a eventos no previsibles: terremotos, avenidas, impactos, incendios, deslizamientos del terreno, etc., son sucesos de difícil previsión. Evidentemente, se pueden estimar los riesgos inherentes por la ubicación del puente, pero no resulta tan sencillo determinar cuándo se van a producir estos eventos.

En el caso de modificar la configuración del puente para dotarlo de una mayor capacidad frente a uno de los sucesos mencionados, la actividad se debería considerar como una reforma del puente, puesto que de ella se derivan unas prestaciones distintas.

Ya se ha comentado que las operaciones de sustitución de péndolas quedan fuera de las tareas de conservación y mantenimiento y por su singularidad encajan mejor en este capítulo, al igual que sucede con las actividades que requieran una intervención en la cimentación, ya que la valoración puede ser de una magnitud tan extraordinaria que puede ser equiparable a los daños producidos por un terremoto o una avenida.

4. Reforma. Se trata de todas aquellas actividades derivadas de la decisión de modificar el diseño original del puente para lograr prestaciones distintas de aquellas para las que fue concebido en origen.

Las dos últimas tareas mencionadas (eventos no previsibles y reforma de la estructura) no se pueden considerar opera-

ciones estrictamente de conservación y mantenimiento, por lo que no se desarrollan más en este artículo.

2.3. Los medios auxiliares

Las dimensiones de los puentes arco tratados en este artículo y las complicaciones derivadas del cruce sobre cauces u orografías difíciles implican la necesidad de disponer de medios auxiliares complejos en las tareas de mantenimiento extraordinario, incluso para la mayoría de las operaciones de 'puesta a cero' descritas.

El impacto que tienen los medios auxiliares sobre el coste de las actuaciones es habitualmente superior al 20 % (medido este porcentaje con respecto al presupuesto total de la intervención), salvo casos singulares en los que el arco cuenta ya con unos accesos específicos (ver figura 1). La correcta valoración a nivel de proyecto de unos medios de acceso realistas evita desajustes presupuestarios muy considerables en la ejecución de las obras.

Los medios más habituales suelen ser:

1. Para los puentes arco de tablero superior: alpinistas o andamios colgados para las tareas a ejecutar en los propios arcos o en los montantes. Para las actuaciones bajo tablero, se puede emplear un camión pasarela o andamios colgados.



Fig. 4. Inspección del puente arco de Tablate (autovía A-44, Granada)



Fig. 5. Inspección del puente arco de Lusitania (Mérida)



Fig. 6. Trabajos de rehabilitación en el puente arco de hormigón de Isabel La Católica (Valladolid)



Fig. 7. Trabajos de rehabilitación en el puente arco metálico de Enrique Estevan o puente de Hierro (Salamanca)

2. Para los puentes arco de tablero inferior: alpinistas o cestas elevadoras para las tareas a ejecutar en los propios arcos o en las péndolas. Para las actuaciones bajo el tablero, se puede emplear un camión pasarela o andamios colgados.

3. Los puentes arco en el marco de los sistemas de gestión

Un sistema de gestión de puentes permite obtener una calificación del estado de conservación de cada puente y comparar el estado de todos ellos entre sí, de forma que se puedan priorizar las actuaciones. Esto exige dos tareas:

1. Describir los elementos que componen los puentes (inventario [7]).
2. Realizar campañas periódicas de inspección de los puentes (normalmente, inspecciones principales [8]), identificando los deterioros existentes en el puente.

Con procedimientos de cálculo diferentes entre sí, los diferentes sistemas de gestión de puentes operativos en España mantienen un metodología más o menos común, y es que la calificación del estado de conservación depende de la importancia del elemento en que se localice cada uno de los deterioros (puesto que cada elemento tiene un peso o coeficiente de ponderación) y de la gravedad de cada deterioro, cuyos parámetros de caracterización son bastante uniformes entre las distintas metodologías (causa, extensión y gravedad del daño

son parámetros comunes a todos los sistemas). En el caso de los puentes arco, interesa conocer cuáles son los elementos más importantes o de mayor peso, así como los deterioros más frecuentes en este tipo de puentes.

3.1. Importancia de los elementos constitutivos de un puente arco

En el fondo, un puente arco permite salvar grandes longitudes con un tablero de tipología convencional y luces moderadas, que en parte se apoya o cuelga de un arco. Por ello, se suele separar el arco del tablero. En arcos de tablero superior, el arco contiene los elementos principales de directriz curva que salvan grandes luces, mientras que el tablero está formado por los distintos elementos que podrían distinguirse en cualquier otra estructura (vigas, losa, cajón), incluidas las pilas o montantes.

En el caso de los puentes de tablero inferior, existen otros elementos singulares que permiten el cuelgue del tablero (mediante barras o cables), y que se consideran parte de los elementos del arco: son las péndolas.

Los elementos de mayor importancia (y, por tanto, con un mayor 'peso' en el cálculo del estado de conservación de un puente) son mencionados por orden de importancia:

1. Los arcos (o anillos, ver comentario en la figura 8), elementos de directriz curva, y los elementos principales que configuran el tablero (vigas, losa, cajones).



Fig. 8. Puente arco de tablero superior: los elementos del arco son los anillos (en el marco de los sistemas de gestión es habitual emplear esta terminología para designar así a los elementos principales de directriz curva y, en este caso, sección circular) y riostras transversales y los elementos del puente son los montantes verticales, el emparrillado de vigas y la losa (viaducto del Escudo, autovía A-8, Cantabria)



Fig. 9. Puente arco de tablero inferior: los elementos del arco son los anillos, las péndolas y las riostras transversales entre anillos y elementos del puente las pilas verticales y la losa del tablero (puente arco sobre el río Guadalquivir en Palma del Río, carretera A-453, Córdoba)



Fig. 10. Puente arco de tablero intermedio: los elementos del arco son los anillos, las péndolas y las riostras transversales entre anillos y elementos del puente las pilas verticales y la losa del tablero (puente arco de la Vicaría sobre el embalse de La Fuensanta en el río Segura, Albacete)

2. Las riostras entre anillos del arco, las péndolas y las pilas o montantes mediante las que el tablero se apoya o cuelga del arco.

En los arcos de tablero superior tienen este mismo orden de importancia los elementos de cimentación del arco y, en caso de que existan, las piezas de unión arco-tablero en la clave del primero.

3. La losa de compresión del tablero.

4. Las impostas del tablero.

Por este orden de importancia, los deterioros observados tendrán una mayor o menor incidencia en la calificación del estado de conservación del puente.

3.2. Deterioros más frecuentes

Se quiere llamar la atención sobre un factor bien conocido y es que es frecuente que en este tipo de puentes que tienen habitualmente grandes dimensiones y que salvan cauces u orografías complejas, el dimensionamiento de los elementos viene determinado por los condicionantes constructivos y, por tanto, los elementos suelen ser robustos. Esto lleva a que los deterioros que suelen aparecer en este tipo de puentes están más relacionados con la degradación de los materiales que con problemas de tipo resistente, que podrían conllevar tareas de refuerzo, al menos en los elementos que forman parte del arco.

Entre los deterioros por degradación de materiales más habituales, pueden citarse:

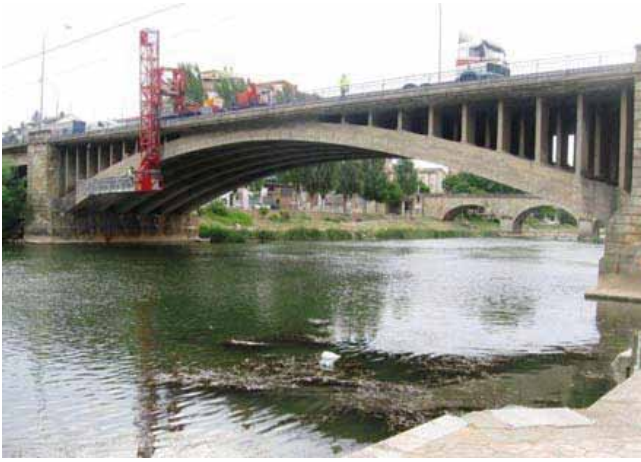


Fig. 11. Inspección del puente sobre el río Ebro, en Miranda de Ebro. Detalle de armaduras vistas en riostra entre anillos

- Hormigón armado: fisuras (por retracción, por corrosión de armaduras), coqueas, desconchones, lajaciones, armaduras vistas y corroídas.

Los puentes arco construidos mediante autocimbra (desarrollados fundamentalmente por J. E. Ribera a principios del s. XX) presentan con bastante frecuencia este tipo de deterioros, por la falta de recubrimiento de la propia autocimbra y la calidad de los hormigones de la época (porosidad, tamaño de árido, dificultades de vibrado en las zonas inferiores).

- Acero: corrosión de elementos metálicos y uniones, pérdidas de roblones y tornillos en uniones.

Como daños singulares de los puentes arco, aunque afortunadamente poco habituales, pueden citarse:

- Vibraciones: más habituales en puentes metálicos que en puentes de hormigón.

- Descenso de un apoyo del arco de tablero superior o intermedio, por problemas de falta de capacidad del elemento de cimentación, de inestabilidad del terreno de apoyo o de socavación. Hay que tener en cuenta que las cargas transmitidas al terreno en este tipo de puentes arco es considerable.

- Desplazamiento de apoyos, causados en gran medida por las vibraciones del arco.

- Pérdidas de tensión en las barras o péndolas.

En este artículo no se han comentado posibles daños derivados de eventos singulares como el sismo, impactos

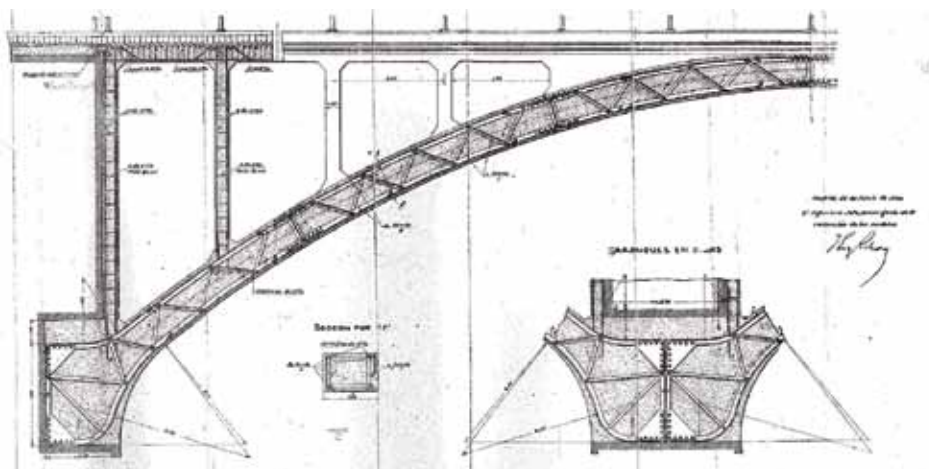


Fig. 12. Plano de puente arco de 25 m de luz rebajado al 1/4 de la colección de modelos de puentes de hormigón armado de J. E. Ribera



Fig. 13. Pérdida del tratamiento protector e inicio de corrosión en los anillos del arco (izquierda) e inicio de corrosión de barras de anclaje en el empotramiento de un anillo en la cimentación (derecha)

o incendios, que pueden provocar problemas de deformación o rotura local en algunos elementos, pero en un sistema de gestión son factores que se valoran en función del riesgo al que está sometida cada estructura para cada uno de ellos.

4. Conclusiones

Los trabajos de conservación y mantenimiento de los que se han denominado puentes arco modernos no difieren en exceso de los trabajos que deben llevarse a cabo en puentes de otras tipologías, pudiendo resaltarse tres singularidades:

1. Los medios auxiliares de trabajo suelen tener una repercusión importante en el conjunto de las operaciones, debido a los condicionantes de accesibilidad de este tipo de puentes.

2. Las péndolas en los puentes arco de tablero inferior e intermedio constituyen un elemento singular que es necesario controlar (salvo en puentes atirantados, no se emplean en el resto de puentes), con operaciones de seguimiento y control más que estrictamente de mantenimiento.

3. Los problemas de mantenimiento derivan casi siempre de la degradación de los materiales.

Un aspecto interesante es que el menor número de elementos de conexión (aparatos de apoyo, juntas de dilatación) simplifica de forma apreciable la conservación y mantenimiento.

En cualquier caso, la base de un mantenimiento eficiente de estos puentes, como de cualquier otro, es la realización continua durante la vida útil de los mismos de las tareas de mantenimiento ordinario y campañas de 'puesta a cero'. **ROP**

Referencias

- [1] Actuaciones y operaciones en obras de paso, dentro de los contratos de conservación. Nota de Servicio. Ministerio de Fomento. 1995
- [2] EHE. Ministerio de Fomento. 2008
- [3] UNE EN 1504 Productos y sistemas para la protección y reparación de estructuras de hormigón. 2008
- [4] Juntas para puentes de carreteras; Asociación Técnica de la Carretera – AIPCR; 2003
- [5] UNE EN 1337: Apoyos estructurales. 2001
- [6] Reparación y refuerzo de estructuras de hormigón. Guía FIB de buenas prácticas. GEHO-ATEP. 1994
- [7] Guía para la realización del inventario de obras de paso. Ministerio de Fomento. 2009
- [8] Guía para la realización de inspecciones principales de obras de paso. Ministerio de Fomento. 2012

Puente arco de alta velocidad sobre el río Almonte



Guillermo Capellán Miguel

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Director Técnico de Arenas & Asociados

Resumen

La línea de alta velocidad Madrid-Extremadura salva el río Almonte a su llegada al embalse de Alcántara mediante un viaducto constituido por un gran arco de hormigón de alta resistencia con tablero superior y luz de 384 m. Esa luz convertirá al puente en el año 2015, cuando está previsto que se concluya, en el mayor arco para ferrocarril de alta velocidad del mundo. A causa de esa excepcionalidad, son necesarias una serie de comprobaciones específicas y análisis singulares para encarar su diseño y construcción. Se describen en este artículo las decisiones principales de diseño, incluyendo la elección de tipología, obtención de la directriz antifunicular, análisis del comportamiento frente a viento y túnel de viento, así como el análisis mediante modelos no lineales evolutivos complejos.

Palabras clave

Puente arco, alta velocidad, río Almonte, directriz antifunicular, efectos aerolásticos, cálculo dinámico, cálculo no lineal

Abstract

The high speed railway line Madrid-Extremadura crosses over the Almonte River at its arrival at Alcántara reservoir through a viaduct that consists of a large arch bridge of high strength concrete with superior deck and 384 m main span. That span will turn the bridge in 2015, when it is scheduled to be completed, into the largest arch bridge for high-speed railway in the world. Because of this uniqueness, a number of specific verifications and analysis are necessary to address its design and construction. Major design decisions are described in this article, including the choice of typology, obtaining of the antifunicular form for the arch, wind analysis and wind tunnel studies, and complex nonlinear time dependent models analysis.

Keywords

Arch bridge, high speed railway, Almonte river, antifunicular form, aerolastic effects, dynamic analysis, nonlinear analysis

Datos del proyecto

Propiedad: ADIF.

Director de Obra: Pablo Jiménez Guijarro (ADIF).

Proyecto: Arenas & Asociados-IDOM.

Contratista: UTE AVE Alcántara-Garrovillas (FCC-Conduril).

Oficina Técnica Ingeniería Construcción: Servicios Técnicos FCC.

Asistencia Coordinación de la Obra: IDOM-Arenas & Asociados.

Asistencia Técnica: INES.

Ficha de características técnicas

Longitud: 996 m.

Luz principal: 384 m.

Número de vanos: 23.

Hormigón HA-80 en el arco: 9.748 m³.

Hormigón resto de la estructura: 44.351 m³.

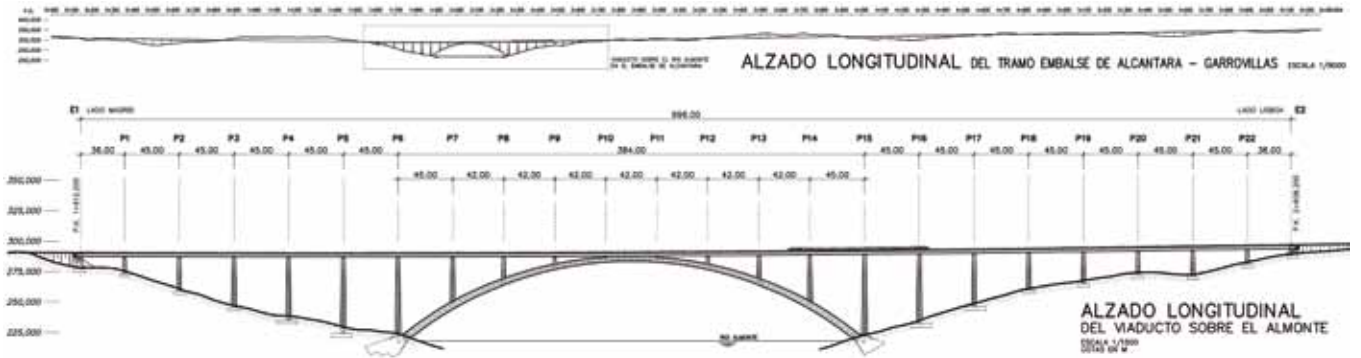
Armadura B500: 7.255 ton.

Acero de pretensado: 541 ton.

Acero en tirantes provisionales: 857 ton.



Figs. 1 y 2. Fotomontaje y Alzado del Viaducto sobre el río Almonte (fuente: Arenas & Asociados)



La línea de alta velocidad Madrid-Extremadura cruza sobre el río Almonte en la cola del embalse cacereño de Alcántara mediante el viaducto del río Almonte de 996 m de longitud, que sobrevuela el embalse con un gran arco de hormigón de tablero superior y 384 m de luz principal, lo que le convertirá en el puente arco de alta velocidad con mayor luz del mundo.

Ahora que las obras están avanzadas es posible observar la magnitud de esta estructura que no transmiten por completo las fotografías, y que sólo podíamos imaginar durante la redacción del proyecto.

El puente forma parte del tramo Embalse de Alcántara-Garrovillas dentro de la línea destinada en origen y a futuro

para conectar Madrid y Lisboa mediante ferrocarril de alta velocidad, prevista para tráfico mixto de pasajeros con velocidad máxima de 330 km/h y de mercancías hasta 100 km/h.

La imposibilidad de disponer pilas en el cauce del embalse y la Declaración de Impacto Ambiental condujeron al vano de 384 m que sitúa los arranques del arco justo por encima del nivel máximo de las aguas del embalse (cota 218 m), que en ningún caso puede alterar su funcionamiento como aprovechamiento hidroeléctrico por el desarrollo de las obras. Durante buena parte de las mismas hemos visto el embalse en su nivel máximo a punto de desbordar las penínsulas provisionales de protección realizadas para la ejecución de las cimentaciones del arco, ratificando la elección de la luz adoptada.

Tanto el diseño como la definición del proceso constructivo elegido que condiciona este diseño, han buscado desde el comienzo del proyecto conjugar la viabilidad técnica y la optimización de medios y costes de una actuación tan singular como ésta.

El viaducto está localizado entre los puntos kilométricos 1+612.200 y 2+608.200 y se sitúa en una recta en planta. En alzado existe un acuerdo vertical que genera un punto bajo en el punto kilométrico 1+815.198 siendo la pendiente máxima viaducto de 14,6 por mil. La rasante alcanza una altura máxima sobre el río Almonte de unos 80 m. Esto permite el encaje de un arco de altura 69 m, es decir una relación clásica de flecha/luz de 1:5,6, una vez seleccionada la tipología de puente arco.

La infraestructura cuenta con veintitrés vanos de tablero ejecutados con autocimbra superior, con luces tipo de 45 m entre pilas fuera del arco y de 42 m sobre las pilastras apoyadas en el arco.

Elección de tipología

Durante las fases iniciales del proyecto se analizaron las distintas variantes estructurales en un estudio tipológico detallado considerando de forma simultánea su comportamiento final así como el procedimiento constructivo. Algunas

de estas alternativas incluían soluciones atirantadas, de tipo pórtico, y tableros de tipo viga celosía de canto variable. Las soluciones de procedimiento constructivo incluían distintas variantes de avance en voladizo, la erección de un tramo central metálico, etc.

El análisis multicriterio llevado a cabo destacó la solución arco como la más económica, la de mejores condiciones de durabilidad y mantenimiento, y la que garantizaba un mejor comportamiento estructural frente a fenómenos dinámicos y de viento, como vemos más adelante. Esta preocupación por la durabilidad ha sido una constante durante el proceso de proyecto y ejecución de las obras, buscando legar una obra que resista de la mejor forma el paso del tiempo con el menor mantenimiento. Para ello la elección del hormigón, la geometría del arco, el desarrollo de los cálculos y la definición del procedimiento constructivo en ausencia de fisuraciones, resulta definitivo.

La elección de la tipología tiene también mucha relación con los condicionantes no sólo del emplazamiento, con la elevada altura de rasante y buenas condiciones de cimentación directa en roca, sino de las propias peculiaridades de los puentes ferroviarios de alta velocidad, en este caso de gran luz. Las particularidades que se dan en estos puentes son unas cargas de tráfico mucho mayores

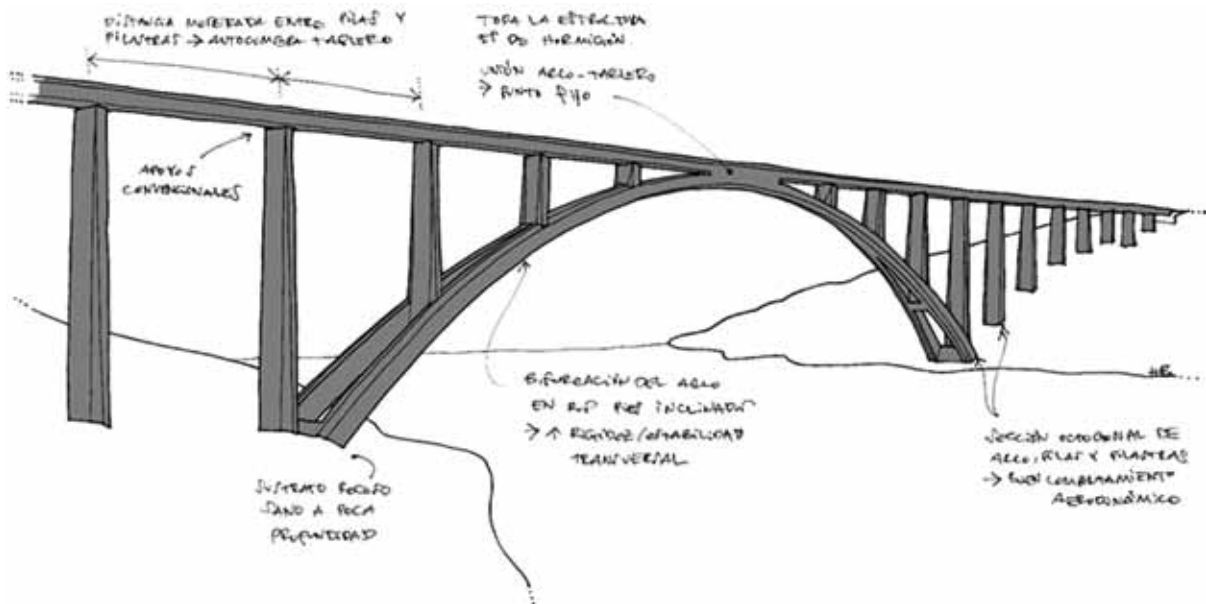


Fig. 3. Croquis de la solución arco de tablero superior (fuente: Héctor Beade, A&A)

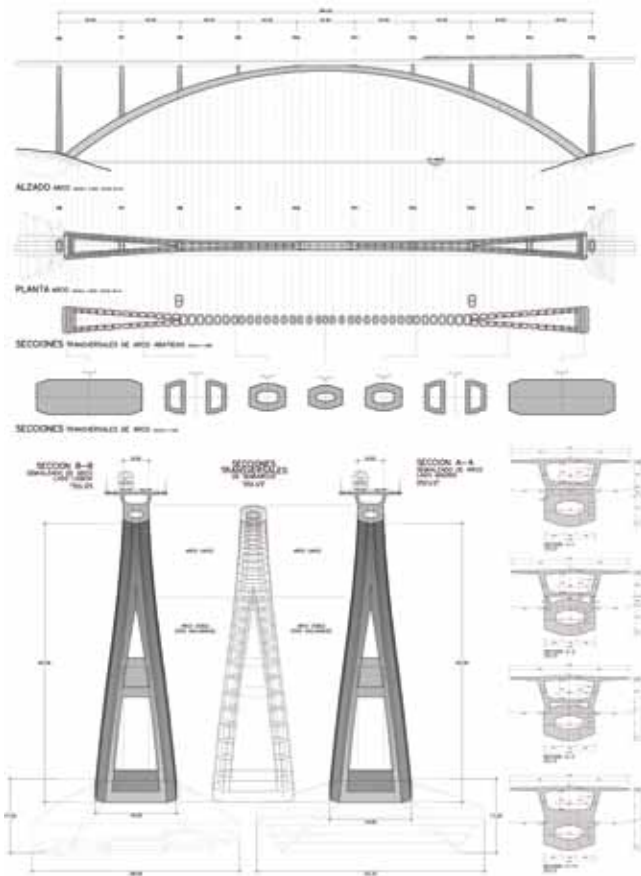


Fig. 4. Planos de geometría del arco (fuente: Arenas & Asociados)

que las de carretera, unos efectos dinámicos por el paso de los convoyes, unas cargas horizontales notables y un trabajo de fatiga que no se puede despreciar. Todo esto debe conjugarse con unas consideraciones funcionales muy estrictas para que el nivel de servicio de la estructura no deba limitarse en ningún momento: deflexiones y aceleraciones permisibles pequeñas y una longitud entre juntas de dilatación de vía limitada por motivos tecnológicos. Dadas esas particularidades, las luces mayores de 100 m hasta ahora han sido inusuales en los puentes para ferrocarril de alta velocidad y, por tanto, la luz que ha sido necesario adoptar para salvar el embalse de Almonte entra dentro de un rango excepcional.

A esto se une en el caso del viaducto del Almonte que transcurre a una altura de más de 80 m sobre la lámina de agua y con altura de pilas de hasta 65,3 m, la preocupación por los efectos aerolásticos y aerodinámicos de viento y las de-

formaciones transversales bajo éstas y el resto de cargas horizontales.

El arco es una estructura de baja deformabilidad vertical, no en vano el canto efectivo del sistema estructural o la “viga equivalente” es la flecha del arco, es decir 69 m, en este caso. Para limitar la deformabilidad lateral y mejorar su comportamiento a viento se actúa definiendo una sección octogonal del arco aerodinámica frente al viento, buscando la mayor esbeltez del arco, y abriendo en transversal su sección en arranques en dos pies inclinados curvos que aumentan el brazo resistente en esta dirección.

Descripción de elementos de la estructura

El ancho total del tablero es de 14 metros. La sección transversal del tablero está formada por 10,1 metros centrales para alojar el balasto de la plataforma, dos muretes guardabalasto de 0,2 m y espacios laterales para alojar impostas, canaletas, paso de servicio, barreras y protecciones de aves.

Se trata de una estructura de tablero hiperestático, con sección cajón de hormigón pretensado ejecutado in situ. La construcción se plantea en fases sucesivas, mediante autocimbra. Su configuración es la de un tablero estándar para puentes multivano de alta velocidad de vanos tipo de 45 m en accesos ejecutado con autocimbra, lo que colabora a la reducción de costes y mejora de rendimientos en su ejecución, pudiendo extender el mismo procedimiento constructivo a todo lo largo del tablero, incluso sobre el arco sobre el embalse, sólo reduciendo el vano tipo a 42 m para adaptarse a la longitud del vano y las diferentes condiciones de apoyo.

El tablero se resuelve mediante una sección cajón de hormigón pretensado de canto constante 3,1 metros (relación luz/canto 1/15). Los voladizos del cajón son de 3,25 metros y el ancho de la parte superior del núcleo del cajón es de 7,5 metros. La anchura del fondo del núcleo es de 6 metros.

El pretensado e los vanos de acceso está formado por 4 familias de 3 tendones (6 tendones por alma) de 27 cordones de 0,6”. En los vanos sobre arco se mantienen estas 4 familias de 3 tendones (6 por alma) pero son de 31 cordones de 0,6”. Además se disponen familias adicionales sobre pila o en centro de vano como refuerzo en tramos principales sobre el arco.

El arco, de hormigón de alta resistencia HA-80 autocompactable, tiene una sección ortogonal hueca en sus 210 m centrales bifurcándose a continuación en dos pies de sección hexagonal irregular también hueca hasta sus arranques, para dotarlo de mayor estabilidad transversal. Ambos pies se arriostran entre sí en el empotramiento entre la segunda pila (comenzando desde los arranques) y el arco. La sección octogonal tiene un comportamiento aerodinámico adecuado, muy beneficioso en grandes luces como la que estamos considerando. La sección varía entre los 6 m de ancho central y canto de 4,8 m, y un ancho total de 19 m entre ambos pies y 6,9 m de canto, lo que supone una relación luz/canto variando entre 1/80 y 1/56.

Las pilas del viaducto, tanto las que se cimientan sobre el terreno como las que se apoyan en el arco (también denominados montantes o pilastras), tienen sección octogonal variable, cuya aerodinámica es beneficiosa en el vano del arco dada su gran luz, que se mantiene en las pilas de los vanos de acceso para mantener el equilibrio visual del conjunto. La altura de pilas alcanza los 65.3 m. Los estribos son de hormigón armado, cerrados con aletas en vuelta.

El apoyo del tablero sobre pilas y estribos se materializa mediante apoyos de neopreno confinado tipo 'POT' con teflón en parejas de apoyos libres y guiados con restricción transversal.

El punto fijo se sitúa en el centro del arco, materializado mediante una unión entre el arco y tablero que permite transmitir los esfuerzos horizontales de frenado y arranque al arco. De esta forma las longitudes de movimientos horizontales debidas a las variaciones de temperatura y reología del hormigón que han de asumir los estribos son los correspondientes a 450 y 546 m respectivamente, perfectamente asumibles.

Las cimentaciones de arco, pilas de vanos de acceso y estribos se resuelven mediante zapatas sobre el sustrato rocoso. Cada arranque del arco y su pila adyacente cuentan con una cimentación conjunta. Las cimentaciones de los arcos son unos grandes macizos cajeados en la roca cuya ejecución requiere de penínsulas provisionales de protección para bajar por debajo del nivel máximo de aguas del embalse.

Cálculo estructural e Influencia del encaje de la directriz del arco en el diseño del arco

A consecuencia de la naturaleza de la propia estructura, de las condiciones de servicio, y del método constructivo el análisis estructural debe incluir:

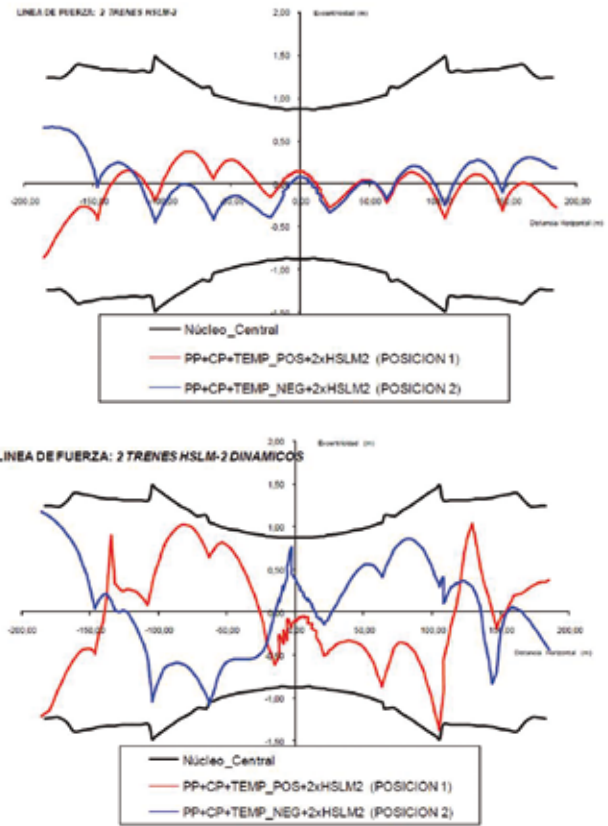


Fig. 5. Líneas de fuerza a lo largo del arco para cargas ferroviarias sin y con efectos dinámicos respecto al núcleo central

- El estudio de la directriz óptima del arco en base al cálculo de la antifunicular de las cargas.
- El análisis detallado de las fases constructivas.
- La valoración de estado límite de servicio y último con modelos de cálculo no lineales.
- El análisis dinámico detallado.
- Entre los estudios especiales se ha de señalar la confirmación de los resultados de los estudios analíticos realizados del comportamiento de la estructura frente a las cargas de viento, mediante la realización de estudios experimentales con ensayo en túnel de viento.

En el diseño de puentes arco la búsqueda de la geometría de su directriz es un punto clave del diseño, ya que si es



la adecuada trabajará por forma, es decir, sometido sólo a tensiones normales de compresión en todos y cada uno de sus puntos, funcionando como antifunicular de las cargas. De esta forma el material constituyente del arco está exento de tracciones y, al no fisurar el hormigón, se garantiza la durabilidad del puente con un mantenimiento mínimo además de economizar en las cuantías de acero que son las que, dado el caso, deben resistir las tracciones.

En el caso de los ferrocarriles de alta velocidad, la búsqueda de la directriz antifunicular en los grandes arcos ferroviarios impone una nueva realidad en la metodología empleada hasta la fecha en el encaje de la misma: en el ferrocarril los trenes de carga correspondientes al material móvil suponen importantes deformaciones y, por tanto, esfuerzos de flexión de valor absoluto considerables.

Se convierte por ese motivo en pieza importante del diseño de un puente arco la decisión de si se acepta fisuración en el arco en situaciones de servicio o no. Se da el caso particular de que aceptar una fisuración limitada del arco en ciertas situaciones de servicio, hace difícil y encarece el cumplimiento de las deformaciones límites para el servicio de la estructura, ya que las fisuras degradan la rigidez de la estructura. Es decir, cuando esta degradación de la rigidez ocurre en un



Figs. 6 y 7. Túnel de viento en situación constructiva y final (fuente: Oritia y Boreas)



Figs. 8 y 9. Infografía explicativa del procedimiento constructivo desarrollado durante el proyecto, y Estado actual de las obras (fuente: Santiago Guerra y Eduardo Rojo, A&A)

arco, los movimientos con los que responde a las cargas son mayores, y para lograr unas flechas admisibles adecuadas al uso ferroviario sería necesario dimensionar el puente para las inercias en fisuración, o sea, sería necesario aumentar la cantidad de material y el canto en comparación a si se pudiese evitar la fisuración. Es por eso que en los puentes arco de ferrocarril es aconsejable un criterio general de evitar la fisuración ante sobrecargas en situaciones de servicio aprovechando las herramientas en juego.

Hay que tener en cuenta también la influencia de los efectos dinámicos sobre los esfuerzos de sobrecargas sobre la envolvente de excentricidades que debe situarse dentro del núcleo central del arco.

Para las situaciones de Estado Límite Último (ELU), resulta prácticamente inevitable evitar la fisuración con las solicitaciones producidas por las cargas mayoradas y las resistencias de los materiales minoradas, por lo que todas las comprobaciones referidas del comportamiento global del arco y la estabilidad del mismo en situaciones

de ELU deben hacerse teniendo en cuenta los efectos de la fisuración.

Es necesario seleccionar la directriz que minimiza los esfuerzos de flexión en el arco teniendo en cuenta el proceso constructivo y estos efectos dinámicos, y de forma simultánea seleccionar el canto más adecuado, que define su rigidez y la altura de su núcleo central. Este proceso de cálculo es necesariamente iterativo, no lineal y considerando todas las fases de la ejecución, lo que lo hace muy complejo, pero sin embargo fundamental para el objetivo de durabilidad buscado.

Otros análisis que en esta estructura resultan fundamentales para evaluar su comportamiento incluyen la influencia de la no linealidad del material y geométrica. Estos comprenden la evaluación de la retracción y fluencia, el control de la fisuración del hormigón durante las fases de la secuencia de construcción y en servicio con el puente terminado, la no linealidad de las ecuaciones constitutivas del acero y del hormigón. Además, la consideración de la no linealidad



Figs. 10 y 11. Ejecución de pilas y tablero. Carros de avance de arcos
(fuente: Ignacio Meana Martínez, ADIF)

geométrica y los efectos de segundo orden considerando imperfecciones de montaje. Así como también el cálculo dinámico y control de la deformabilidad de la estructura para cumplir los criterios de funcionalidad para la seguridad y confort de los usuarios.

Comportamiento frente a viento y ensayos de túnel de viento

En estructuras de luz superior a 200 m, el comportamiento de la estructura frente a las cargas de viento es un factor clave en el diseño y de obligado estudio. El canto del arco debe ser lo más reducido posible para presentar una menor superficie expuesta al viento, y la forma de la sección transversal debe optimizarse en base al conocimiento de las propiedades del flujo del viento con un perfilado efectivo como para establecer un arco compacto y opaco al viento. Sin embargo además debe poseer la inercia suficiente para hacer frente a los momentos flectores concomitantes provenientes de las cargas de tráfico. El resultado de todo el análisis anterior conduce a que el puente sobre el río Almonte tenga una sección hueca, que cumple los

requisitos de compacidad y, por tanto, perturbación menor del flujo aéreo con el menor peso. La sección es de forma octogonal con chaflanes pronunciados que afilan su perfil para los vientos de dirección horizontal. El análisis en túnel de viento sobre modelo reducido ha confirmado la bondad del diseño.

Se han realizado modelos seccionales del arco y del tablero, y modelos globales de túnel de viento a escala 1:210 del viaducto tanto en situación de estructura completa como en construcción en situación de voladizo con el atirantamiento provisional, teniendo en cuenta la orografía del terreno. La medición de velocidades de viento y aceleraciones de la estructura real durante la construcción va a permitir evaluar con un nivel de precisión sin precedentes el comportamiento estimado en los estudios de viento llevados a cabo en la Universidad de Western Ontario (Canadá).

Desarrollo de las obras

La construcción del puente comenzó en abril de 2011 y su finalización está prevista para final de 2015. El procedi-



Fig. 12. Vista panorámica del estado actual de las obras (Fuente: Eduardo Rojo)



Fig. 13. Vista aérea general de la ejecución del viaducto sobre el río Almonte (fuente: FFCC)

miento de ejecución principal para el arco es el de avance en voladizo con atirantamiento provisional siguiendo la misma secuencia considerada en el proyecto de construcción.

La construcción comenzó con la ejecución de las cimentaciones y la erección de alzados de estribo y pilas con encofrado trepante. El tablero de ambos accesos se ejecuta con autocimbra hasta alcanzar el vano anexo al tramo de tablero sobre el arco.

Para la materialización de los puntos de retenida de los cables de contrarresto del atirantamiento provisional se realizan anclajes al terreno en las cimentaciones de las pilas anexas a las que llegan los tirantes. Estos anclajes se ensayan y se instrumentan para su control.

La ejecución mediante avance en voladizo del arco requiere la construcción de unos carros de avance de encofrado de gran complejidad que permiten variar todas las dimensiones de la sección para adaptarse a sus formas variables. Los

carros son dos por arco en los pies inclinados curvos en arranques para luego combinarse y conformar un carro único en la zona central del arco. Cada dovela tiene una longitud en proyección en planta aproximadamente 6 m, lo que supone longitudes desarrolladas de entre 6.80 y 6.20 m.

Los tirantes se anclan en las primeras dovelas del arco en la pila sobre el arranque del arco, pero a partir de una determinada dimensión del voladizo su dimensión resulta insuficiente y es necesaria una torre de atirantamiento provisional. Esta torre de atirantamiento provisional desarrollada por los servicios técnicos de FFCC constituye una estructura en sí misma, con una altura de más de 50 m sobre el tablero, articulada en la base. Su montaje se realiza mediante giro de abatimiento con respecto a esta rotula inferior.

En el momento actual de las obras se han ejecutado 16 dovelas del arco en el lado sur y lado norte, encontrándose



justo en la conexión entre los pies inclinados y el arco central, lo que supone un voladizo de 90 m en planta.

El proceso de ejecución está siendo monitorizado con una instrumentación con medición continua que incluye clinómetros, acelerómetros, galgas extensométricas, células de carga en tirantes de retenida, medidas topográficas automatizadas y medidas meteorológicas de viento y temperatura. Registrándose todos estos valores para su evaluación permitiendo detectar desplazamientos o cambios en las frecuencias de vibración de la estructura que alerten de cualquier cambio o anomalía en el comportamiento de la misma.

Conclusiones

El estado actual y los avances de la técnica y la construcción han permitido proyectar y afrontar la ejecución de este gran reto de la ingeniería. Entre ellos hay que señalar los hormigones de altas prestaciones, las herramientas de cálculo avanzado no lineal y evolutivo, la modelización aerolástica, y los tratamientos semiprobabilísticos normativos, como elementos clave para el diseño y la validación de la garantía estructural del puente sobre el río Almonte. El uso conjunto e intensivo de todos ellos ha permitido superar los rangos de luz que hasta ahora se habían establecido para puentes ferroviarios de alta velocidad, resaltando la importancia de las elevadas sobrecargas, la influencia de la amplificación dinámica de sus efectos y del comportamiento no lineal tanto geométrico como del material para valorar con precisión los niveles de seguridad con los que se dimensiona y se construye esta estructura. **ROP**



Figs. 14 y 15. Vistas de la ejecución en voladizo de los arcos con atirantamiento provisional (fuente: Eduardo Rojo, A&A y FCC)

Puente sobre el río Tajo en el embalse de Alcántara para ferrocarril de alta velocidad



Javier Manterola Armisén

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Consejero delegado de Carlos Fernández Casado, S.L



Antonio Martínez Cutillas

Doctor ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Carlos Fernández Casado, S.L



Borja Martín Martínez

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

Carlos Fernández Casado, S.L

Resumen

Ubicado en la Línea de Alta Velocidad Madrid-Extremadura, el viaducto tiene una longitud total de 1.488 m. La distribución de luces del viaducto viene influenciada por el salto del Río Tajo, el cual se realiza mediante un arco de 324 m de luz, fragmentándose el tablero sobre el mismo en seis vanos de 54m. Los vanos de acceso se plantean de 60 m, intercalándose entre ellos dos vanos de transición de 57 m, uno a cada lado del arranque del arco. El elemento emblemático del viaducto es el citado arco. De directriz curva, consta de un cajón variable en canto entre 3,5 m y 4 m y en ancho entre 12 m en arranques y 6 m en clave. Con sus 324 m de luz principal, superará en más de 60 m al puente sobre el embalse de Contreras, el mayor puente arco ferroviario de hormigón ejecutado hasta la fecha en España.

Palabras clave

Ferrocarril de alta velocidad, arco de hormigón armado, voladizos atirantados, carro de avance, cimbra autoportante

Abstract

Located in the High-Speed Railway Line Madrid-Extremadura, the bridge has a total length of 1488m. The span distribution is influenced by the crossing of the Tajo River, which takes place with an arch, 324m long, and dividing the deck over it in six spans of 54m each one. The approach spans are 60m long, inserting two transition spans of 57m.

The emblematic element of the bridge is aforementioned arch. With curve directrix, it is formed by a hollow variable section between (4.00 m – 3.50 m wide; 12.00 m – 6.00 m high). With its main span length of 324m, it will surpass the bridge over the Contreras Reservoir, currently the largest railway arch bridge executed in Spain.

Keywords

Arch bridge, concrete, high-speed railway, cable-stayed cantilever construction

Datos del proyecto: Viaducto sobre el Río Tajo en el Embalse de Alcántara

Promotor: ADIF Alta Velocidad.

Director del proyecto: Ignacio Meana.

Autores del proyecto: Javier Manterola, Antonio Martínez, Borja Martín, Miguel Ángel Gil, Silvia Fuente y Lucía Blanco.

Empresa consultora: Carlos Fernández Casado, S.L. y Tyspa.

Director de obra: Juan Antonio Hermoso Marín (ADIF Alta Velocidad).

Director de contrato: Luis Alberto Dou Cortiguera (ADIF Alta Velocidad).

Asistencia Técnica Dirección de Obra: UTE AYESA-IDEAM –Ángel Francisco García Rodríguez (jefe de Unidad) y Carlos Jiménez Solanas (jefe de Oficina Técnica)–.

Empresa Constructora: UTE COPISA-COPASA –Manuel Molina Rivas (gerente) y Pablo Hurtado del Rincón (jefe de Obra)–.

Asistencia Técnica a la Constructora: Carlos Fernández Casado, S.L –Antonio Martínez, Borja Martín, Héctor Faúndez, Manuel Escamilla, Luis Miguel Salazar–.

1. Introducción

El proyecto y construcción de las nuevas líneas de ferrocarril de alta velocidad que se ha desarrollado en España en los últimos años ha permitido el desarrollo de tipologías, procedimientos de construcción específicos en el campo de los puentes.

Las exigencias de trazado, unida a la orografía de la península, han obligado a la construcción de viaductos de gran longitud, grandes alturas de pilas y luces medias y altas.

En el cruce de los grandes ríos se han construido puentes de gran luz como en el caso del puente del Ebro; pero, como siempre en nuestro país, ha sido el cruce de los embalses y rías donde ha sido preciso construir los puentes ferroviarios de mayor luz, tal es el caso, en orden cronológico, el puente sobre el embalse de Contreras, puente sobre la ría del Ulla, puente sobre el río Ulla, puente sobre el río Tajo y puente sobre el río Almonte, ambos situados en la cabecera del embalse de Alcántara.

De acuerdo a nuestra experiencia, iniciada con el puente sobre el embalse de Contreras, el puente arco de hormigón constituye un alternativa desde el punto de vista técnico y constructivo para puentes de ferrocarril de alta velocidad en el rango de luces entre 200 y 400 m siempre que se cumplan las condiciones adecuadas para su cimentación.

Tanto en el proyecto del puente sobre el embalse de Contreras, con una luz principal de 261 m [2] como en el puente sobre el río Tajo, con una luz principal de 324 m, [3] confluyen condiciones de trazado y encaje en el terreno que han conducido a la utilización del arco de hormigón como la solución óptima. La necesidad de un viaducto de gran longitud en el que es preciso salvar una luz importante ante la imposibilidad de cimentar en el lecho del río o embalse por la gran profundidad de la cimentación y la enorme variabilidad de la cota del nivel de agua.

Para garantizar las posibilidades de construcción con independencia de la lámina de agua en ambos casos fue necesario el proyecto de un vano principal de gran luz. Las condiciones de cimentación propiciaron el encaje de un arco de tablero superior. Lo que hemos considerado fundamental ha sido, una vez elegida la luz óptima del viaducto de acceso, es mantener la misma secuencia de luces sobre la estructura del arco. De esta forma el viaducto tiene una modulación única, soportándose de forma natural y eficaz sobre la estructura principal del arco. Esta unidad formal se complementa con la unidad constructiva del conjunto. El arco se construye in-

dependientemente del cauce inferior, por medio de voladizos sucesivos atirantados. Una vez cerrado el arco en clave y liberado del atirantamiento provisional, es decir, cuando el arco se convierte en arco, el tablero superior puede construirse con los mismos medios auxiliares convencionales que han permitido la construcción del viaducto de acceso, cimbra autolanzable o sistema de empuje.

Esta unidad formal y constructiva se ha conseguido gracias a un encaje cuidado de la geometría del arco para minimizar las flexiones en el mismo en situación de carga permanente y por las posibilidades resistentes que debe tener el arco ante las sobrecargas ferroviarias no simétricas, que le permiten tener márgenes para hormigonados no estrictamente simétricos de los tableros sobre el mismo. Adicionalmente, la tecnología actual permite la utilización de hormigones de alta resistencia tanto en el arco como en el tablero, así como un control adecuado de la fisuración y las condiciones de estabilidad estructural en estado límite de servicio y último.

El resultado final, desde nuestro punto de vista, constituye una aportación al campo de los arcos de hormigón para ferrocarril, heredero en el siglo XXI, del puente de ferrocarril



Fig. 1a. Puente sobre el río Ebro (L=120 m)



Fig. 1b. Puente sobre la ría del Ulla (L=240 m)



Fig. 1c. Puente sobre el río Ulla (L=179 m)



Fig. 1d. Puente sobre el Embalse de Contreras (L=261 m)



Fig. 1e. Puente sobre el río Tajo (L=324 m)



Fig. 1f. Puente sobre el río Almonte (L=384 m)

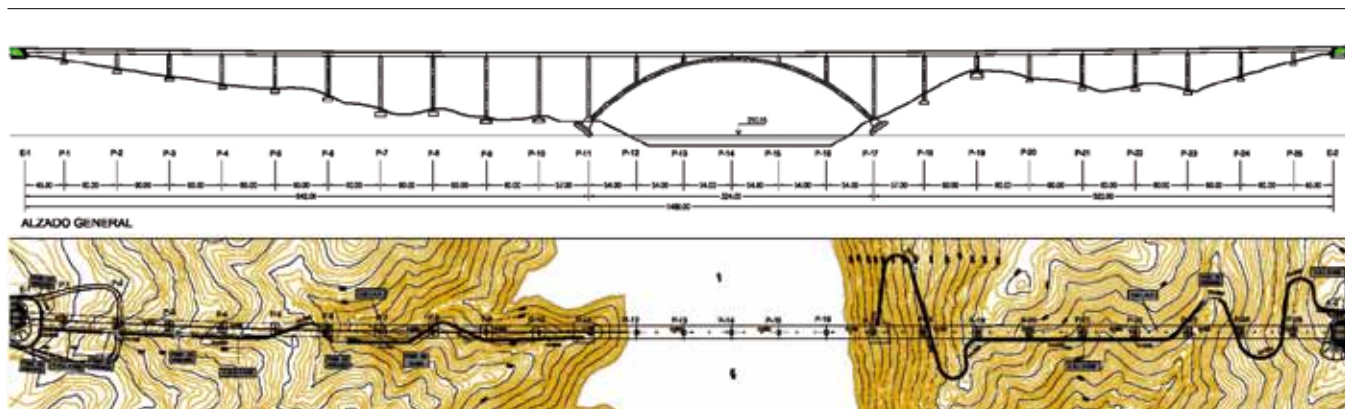


Fig. 2. Definición general

sobre el río Esla, viaducto de Martín Gil, de 209 m de luz, construido durante la posguerra, en el siglo XX. [1].

2. Planteamiento general

Tras en estudio inicial respecto a la situación de una rasante del ferrocarril que favoreciese al conjunto de los puentes sobre el Tajo y sobre el Almonte, optimizándose así mismo el movimiento de tierras entre ellos, se decidió por parte de la dirección de proyecto elegir lo que se llamó rasante alta que pasa en el lugar del puente sobre el río Tajo a 76 m.

La anchura del río, en el punto de cruce, es del orden de 300 m, valor poco variable en función de la altura de las aguas en el embalse.

Los dos tramos de acceso al río son claramente diferentes en lo que se refiere a la distancia que existe entre el terreno

y la rasante. Mientras en la margen izquierda, a sólo 140 m de la margen del río, la cota del terreno se sitúa a sólo 23 m, en la margen derecha hay que separarse de la orilla del río casi 600 m. para alcanzar la misma distancia, esto va a influir en el tratamiento de los viaductos de acceso al puente principal. La posición del empotramiento en la ladera está casi fija, pues la margen derecha del terreno es bastante tendida y no tiene sentido aumentar la luz.

3. Descripción del viaducto

El viaducto está situado en el P.K. 4+061.00, tiene una longitud total de 1.488 m con una distribución de luces de $45 + 9 \times 60 + 57 + 324 + 57 + 7 \times 60 + 45$ m.

3.1. Tablero

El tablero está formado por una sección cajón de hormigón pretensado de 4 m de canto. Esta esbeltez permite salvar

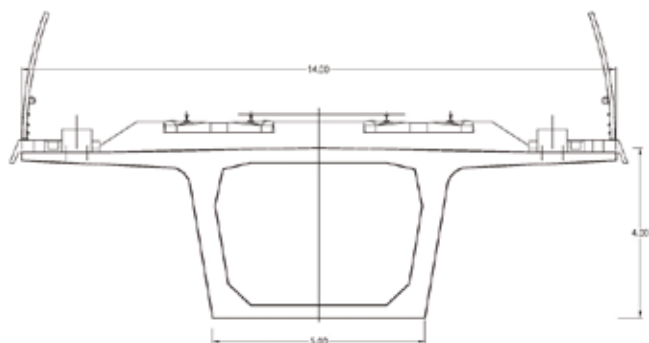


Fig. 3. Definición del tablero



Puentes Arco Metálicos



Río Guadalquivir. Palma del Río

Luz: 130 m



Río Deba. Guipúzcoa

Luz: 110 m

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 Rubio
Director de Ingeniería: Miguel Ortega Cornejo



Río Ebro. Logroño

Luz: 120 m

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



Valdebebas. Madrid

Luz: 120 m

adecuadamente las luces de 60m de los vanos de acceso y de 54 m sobre el arco que, debido a su flexibilidad introduce flexiones complementarias. La losa inferior tiene 5 m de ancho y la superior 6,5 m, con voladizos que completan la anchura total de la sección de 14 m. El espesor de las almas es 0,5 m. La caracterización del hormigón es HP-50 en los vanos del viaducto de acceso y HP-70 para los vanos situados sobre el arco.

Los vanos de acceso tienen 5 cables de pretensado con entre 25 y 37 unidades de $\varnothing 0.6''$, por cada alma con un trazado. En los vanos sobre el arco se complementan con cables superiores e inferiores con trazado rectilíneo.

Dada la longitud del tablero, superior a 1.200m, se estudió la posibilidad de disponer el punto de anclaje de las acciones horizontales en la clave del arco. Los incrementos de tensiones en el arco eran asumibles por lo que se optó finalmente por esta disposición que ha permitido el empleo de juntas de dilatación de vías en ambos estribos con dimensiones convencionales.

3.2. Arco

El arco tiene una directriz curvilínea en el plano vertical. Esta directriz ha sido obtenida a partir de un estudio detallado de optimización de las flexiones de carga permanente con una aproximación a la curva antifunicular de dichas acciones. Está formado por una sección cajón rectangular de canto variable entre la sección de arranques, 4 m y clave, 3,5 m. La anchura varía linealmente entre los 12 m de la sección de arranques hasta los 6 m en la sección de clave. El espesor de almas y losa superior varían para conseguir un estado de compresiones máximas lo más homogénea posible. La resistencia del hormigón necesaria es HA-70.

Debido a las condiciones meteorológicas del lugar así como la singularidad de la estructura se realizó un estudio del comportamiento aeroelástico del arco tanto en construcción como en servicio en un ensayo en túnel de viento con modelo reducido. De dicho estudio se concluyó que la estructura no presentaba ningún fenómeno reseñable de inestabilidad frente al viento en las diferentes configuraciones estructurales.

3.3. Pilas

Las pilas tienen una altura variable entre 9,6 y 71,5 m. Todas ellas están generadas por una pila básica de sección cajón rectangular de 3 m de ancho constante y canto variable entre 5,2 m en la parte superior, 3,2 m en la "cintura" situada a 5 m de la parte superior y un ensanchamiento hacia la base.



Fig. 4. Definición de arco

3.4. Aparatos de apoyo y juntas

Los aparatos de apoyo son de teflón esféricos tanto unidireccionales como bidireccionales, salvo los situados en clave que son aparatos de apoyo fijos. Los de los estribos tienen una capacidad de carga vertical de 1.100 T mientras que los de las pilas tienen una capacidad variable entre 1.600 y 2.500 T. La junta de ambos estribos debe admitir un movimiento total de 1.100 mm.

3.5. Estribos

Con objeto de sustentar sobre estructura los aparatos de dilatación de vía, se configuran estribos en cajón con cuchillos intermedios con alturas máximas 8,63 m en E-1 y 9,64 m en E-2.

3.6. Barrera de Protección

Para cumplir las prescripciones de la DIA resulta necesario disponer una protección de 3 m de altura para la protección de las aves. La barrera está formada por tubos de acero curvos de 100 mm de diámetro cada 0,5 m. En su parte inferior se disponen tubos horizontales de diámetros variables para formar la barandilla de protección. Se ha realizado un estudio específico sobre el comportamiento aeroelástico de las distintas tipologías de barreras aplicables en este caso, llegando a ésta como solución óptima.



Fig. 5. Ejecución de tablero con autocimbra

4. Proceso de construcción

4.1. Definición general de ejecución del tablero

La construcción del tablero se realiza vano a vano por medio de una cimbra autoportante dispuesta desde ambos estribos. Los dos vanos dispuestos en la clave del arco se

construirán por medio de una cimbra apoyada sobre el arco y para la que se aprovechará el encofrado de las cimbras autoportantes. Para no crear esfuerzos excesivos sobre el arco, se ha previsto un hormigonado simétrico del tablero, admitiendo un desfase máximo de un solo vano, teniendo explícitamente en cuenta la deformabilidad del conjunto formado por tablero, pilas y arco durante la ejecución del primero en su tramos apoyado sobre el arco, el cual supone una sustentación elástica que influye en gran medida en su dimensionamiento.

4.2. Definición general de ejecución del arco

La construcción del arco se realiza por voladizos sucesivos, atirantados por medio de una torre metálica provisional. La torre se atiranta a las cimentaciones de las pilas próximas que precisan de unidades de anclaje al terreno.

Los medios auxiliares necesarios para la construcción del arco son: una torre colocada sobre la cabeza de la pila 11 para la construcción de un semiarco y otra torre idéntica sobre la cabeza de la pila 17 para el otro semiarco; un carro de hormigonado para cada semiarco; un sistema de tirantes de acero que soporta el semiarco construido anclándose en



Fig. 6. Carro de hormigonado

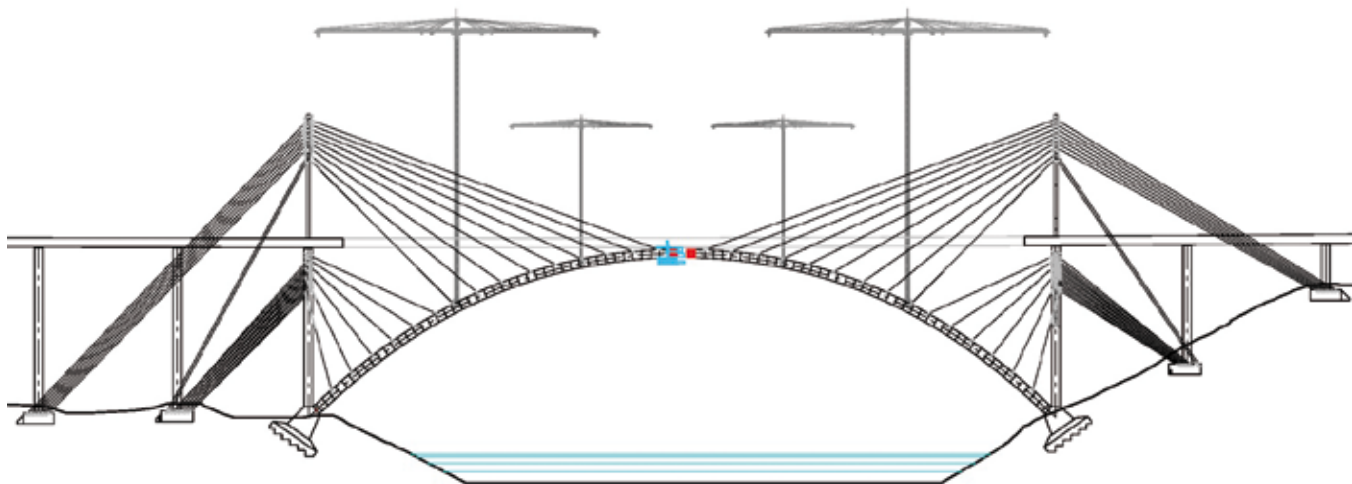


Fig. 7. Esquema de proceso constructivo

la torre y otro sistema que soporta la torre anclándose en las cimentaciones de las pilas adyacentes y, finalmente, un sistema de anclajes provisionales al terreno para sujetar las zapatas de las pilas contiguas.

El carro de hormigonado es un elemento metálico que permite soportar el encofrado de cada dovela del arco y el hormigonado de la misma. Este carro se apoya en la zona del arco recién hormigonada para preparar el hormigonado de la siguiente dovela. Se consideró una longitud de cada dovela algo menor a cuatro metros y para ello se tuvo en cuenta un peso del carro, con el encofrado exterior e interior, de noventa y cinco toneladas.

Se han considerado quince parejas de cables que sujetan el semiarco completo y otras quince parejas que retienen la torre. Los tirantes del arco están separados doce metros, es decir se coloca un cable cada tres dovelas. La separación de los tirantes en la torre es de dos metros salvo los dos primeros que, por ser muy verticales, están más alejados entre sí para que no se toquen los anclajes. El anclaje de los tirantes en la cimentación se hace de la manera siguiente: los ocho primeros cables en la zapata de la pila adyacente a la que se encuentra la torre y los otros siete a la cimentación de la pila contigua. Es decir van ocho cables a la cimentación de la pila 10 y siete a la zapata de la pila 9 para la torre que está en la pila 11 y otros ocho cables a la zapata de la pila 18 y siete a la pila 19 para la torre que está sobre la pila 17. Los tirantes

que van al arco se cruzan en la torre con los que van a la cimentación de las pilas adyacentes.

La cimentación de las pilas 9, 10, 18 y 19 se ancla provisionalmente al terreno mediante unidades de ciento sesenta toneladas dispuestas en dos familias, disponiéndose anclajes verticales e inclinados a cuarenta y cinco grados.

4.3. Optimización del proceso de ejecución del arco

Debido a los condicionantes propios de la obra, y en aras de optimizar el empleo de los medios auxiliares realmente disponibles y ajustar de un modo óptimo los plazos de ejecución, durante el desarrollo de la misma se plantean una serie de modificaciones en el proceso, con objeto de optimizar el sistema tanto desde un punto de vista estructural como de plazos. El procedimiento planteado se basa en la posibilidad de adelantar el comienzo de la construcción del arco realizando los atirantamientos iniciales necesarios para la ejecución del mismo directamente desde la pila de hormigón sobre el plinto de arco.

En lo referente al diseño estructural, el principal condicionante de esta alternativa es que con el atirantamiento desde la pila se pierde altura y por lo tanto verticalidad en ángulo de ataque de los tirantes con respecto a la carga gravitatoria del peso del arco, al igual que ocurre con la retenida. Dado que esto supone un incremento de la carga horizontal a compensar en las zapatas de retenida, el



Fig. 8. Vista general del viaducto en construcción

alcance de esta solución debe condicionarse a un número máximo de dovelas de forma que no se penalicen en exceso los anclajes de retenida a realizar en las zapatas anexas al arranque del arco.

Tras el análisis de estos condicionantes se concluye que la solución ideal pasa por atirantar desde la pila de hormigón los 6 primeros pares de tirantes del arco. Lo que permite lanzar un total de 20 dovelas del arco antes de que sea necesario disponer de la torre metálica de atirantamiento sobre las pilas, suponiendo una holgura de aproximadamente 6 meses.

Cabe indicar que para librar el paso de los cables de retenida que se anclan en pilono, a través del tablero entre las pilas 10 a 11 y entre las pilas 17 a 18 resulta necesario realizar unas ventanas provisionales ubicadas en las alas del cajón, que posteriormente deberán ser cerradas tras la retirada del atirantamiento provisional.

Con este planteamiento se consiguen una serie de objetivos:

- Adelantar el comienzo de la ejecución del arco.
- Sincronizar la ejecución del arco con la llegada del tablero hasta las pilas sobre plinto.
- Reducir el plazo de terminación del tablero.

- Acortar la altura del pilono y reducir la carga sobre la estructura metálica.
- Reducir la longitud de los cables de los 6 primeros pares de tirantes.
- Concentrar todas las operaciones de tesado, en la vertical de cada la pila.
- Permitir el acceso del material para la construcción del arco a través del tablero.

4.4. Secuencia de fases de ejecución del arco

El proceso de construcción de cada semiarco se inicia con el hormigonado de la dovela inicial cuyo encofrado se soporta mediante una cimbra apoyada en la cimentación del arco. Esta dovela inicial debe tener la longitud necesaria para que, una vez endurecido el hormigón, se pueda colocar el carro de avance para comenzar el proceso de avance por voladizos sucesivos. Colocado el carro en su posición, se hormigona la primera dovela en ménsula, posteriormente se mueve el carro sobre ésta y se prepara para el hormigonado de la segunda dovela en ménsula.

El montaje del primer tirante requiere mayor atención ya que la torre está todavía sin arriostrar. Se empieza por dar el 25 % de la carga de montaje del cable que va a la cimentación, a continuación el 25 % de la carga del primer tirante del arco, luego otro 25 % del tirante de la zapata y



así sucesivamente. Es necesario controlar los movimientos longitudinales de la punta de la torre. Colocado el primer tirante se continúa con la secuencia de hormigonado de dovela y traslado de carro hasta alcanzar la posición de montaje del segundo tirante.

El proceso entra en fase secuencial repetitiva pero el montaje de los tirantes a partir del cuarto se complica puesto que se debe actuar previamente sobre cables ya colocados. En algunas fases resulta necesario destesar o retesar adicionalmente alguno de los cables iniciales del arco en fases más avanzadas. Estas actuaciones vienen obligadas por el control de la fisuración del arco.

La secuencia finaliza después de colocar los últimos tirantes de los semiarcos y realizar un ajuste de carga en tirantes para llegar a la geometría deseada. Se retira entonces uno de los carros y con el otro se hormigona la clave quedando así cerrado el arco. Se completa el proceso desmontando los tirantes provisionales empezando por

el último del lado del arco, luego el del lado de la cimentación, se pasa a continuación por el penúltimo cable del arco, el penúltimo de la cimentación y así sucesivamente. Cuando se han retirado todos los cables se procede al desmontaje de las torres metálicas y la retirada de los anclajes al terreno. **ROP**

Referencias

- [1] Fernández Troyano, Leonardo. Camino sobre el río. Historia de los Puentes Españoles. Correos, (2013)
- [2] Manterola, J.; Martínez, A.; Navarro, J.A.; Martín, B. Puente arco de ferrocarril sobre el embalse de Contreras en la línea de alta velocidad Madrid-Levante. Hormigón y Acero nº261 (2012)
- [3] Manterola, J.; Martínez, A.; Martín, B.; Gil, M.A.; Fuente, S. Blanco, L.; Faúndez, H. Viaducto para Ferrocarril de Alta Velocidad sobre el río Tajo en el Embalse de Alcántara. VI Congreso ACHE, Madrid (2014)

Rehabilitación del puente-viaducto de Requejo (Puente de Pino)



José Antonio Llombart Jaques
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Director general. Estudio de Ingeniería y Proyectos (EIPSA)



David Rodríguez Bragado
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.
Jefe de la Sección de Proyectos y Obras.
Servicio Territorial de Fomento de Zamora.
Junta de Castilla y León

Resumen

El puente-viaducto de Requejo (o puente de Pino) se encuentra actualmente en servicio y constituye hoy en día una referencia histórica de la Ingeniería española de principios del Siglo XX. Fue proyectado por el Ingeniero José Eugenio Ribera en 1897 e inaugurado en 1914. Su luz, de 120 metros, fue en su momento la mayor de España. Su aspecto está caracterizado por la ligereza y esbeltez de sus formas, quedando perfectamente integrado dentro de la grandeza paisajística de los Arribes del Duero.

En los cien años transcurridos desde su puesta en servicio, la estructura del puente se ha mantenido en un aceptable estado, en su conjunto. Sin embargo, últimamente se había detectado un importante deterioro en zonas localizadas de las vigas principales del tablero que precisaban una urgente reparación, que ya se ha llevado a efecto. Asimismo, se ha reconstruido el sistema de drenaje de tablero y se ha sustituido el firme existente por uno mucho más ligero.

En el presente artículo se describen las características más importantes del puente, así como los recientes trabajos realizados para su rehabilitación.

Palabras clave

Arco biarticulado, rehabilitación, roblón, tornillo, soldadura

Abstract

The Requejo Viaduct-Bridge (Puente de Pino) is currently in service and is a historic reference for early 20th century Spanish Engineering. Designed by the Engineer, José Eugenio Ribera in 1897, its appearance is characterized by the lightness and slenderness of its shapes and it perfectly integrates into the grandiose Arribes del Duero landscape.

In the one hundred years since it came into service, the bridge structure has overall remained in an acceptable condition. However, major deterioration in localised areas of the main deck beams had been detected, calling for urgent repair which, as of today, has been concluded. The deck's drain system has also been rebuilt and the roadbed existing has been replaced by a much lighter one.

This article describes the major characteristics of the bridge as well as recent work undertaken for its refurbishment.

Keywords

Two-hinged arch, rehabilitation, rivet, bolt, welding

1. Características y breve reseña histórica

El puente-viaducto de Requejo, conocido popularmente como el puente de Pino, salva el río Duero a su paso por los municipios de Pino del Oro y Villadepera, en la provincia de Zamora. Fue inaugurado el 15 de septiembre de 1914.

José Eugenio Ribera lo había proyectado casi veinte años antes, eligiendo el acero como material estructural. Trazó y analizó hasta doce soluciones diferentes, calculando los costes de cada una de ellas, así como las ventajas relativas de los arcos empotrados y biarticulados.

El puente construido (figura 1) está formado por un arco biarticulado de 120 metros de luz de directriz parabólica rebajada a 1/5, de canto constante y con tablero superior de alma llena. Las vigas principales están formadas por dos dobles 'T' unidas por barras dispuestas en un enrejado en 'N', y arriostradas por dos cruces de San Andrés.

2. Puente de Pino. Proyecto y Construcción

Actualmente, la Junta de Castilla y León dispone del proyecto original completo del puente de Pino, firmado por José Eugenio Ribera, el 1 de agosto de 1897. Se trata de



Fig. 1. Vista general del puente de Pino desde la margen derecha (Pino del Oro)

un valioso documento, que hoy día pertenece ya a la historia de la ingeniería y del que se ha considerado oportuno entresacar algunos datos y figuras interesantes.

El proyecto, realizado en su día, estuvo precedido de un amplio estudio relativo a los puentes de arco existentes en el mundo en aquel momento, acompañado de extensos cálculos orientados a ampliar el conocimiento del comportamiento estructural y a la obtención de la solución más adecuada a adoptar en el puente de Pino. Gran parte de los detalles y cálculos existentes en el proyecto desarrollado están contenidos en el libro escrito por el propio Ribera, titulado 'Grandes Viaductos' y editado en el año 1987, del que actualmente existe un ejemplar en la Biblioteca del Colegio de Ingenieros de Caminos, de Madrid. El texto contiene extensos comentarios relativos a la tipología y al comportamiento estructural que hoy en día tendrían plena validez en el orden conceptual, a pesar de que gran parte de las conclusiones proceden de la consideración del análisis de resultados de cálculos realizados con los rudimentarios medios existentes en la época, así como por deducciones procedentes de la simple intuición.

El proyecto está magníficamente realizado, con una detallada definición de los elementos de la estructura metálica (posición, características geométricas y secciones transversales), de tal forma que durante los trabajos de rehabilitación ha sido posible elaborar un modelo completo en 3D para su análisis con ordenador (fig. 2).



Fig. 2. Modelo actual 3D, elaborado para cálculos de verificación mediante ordenador

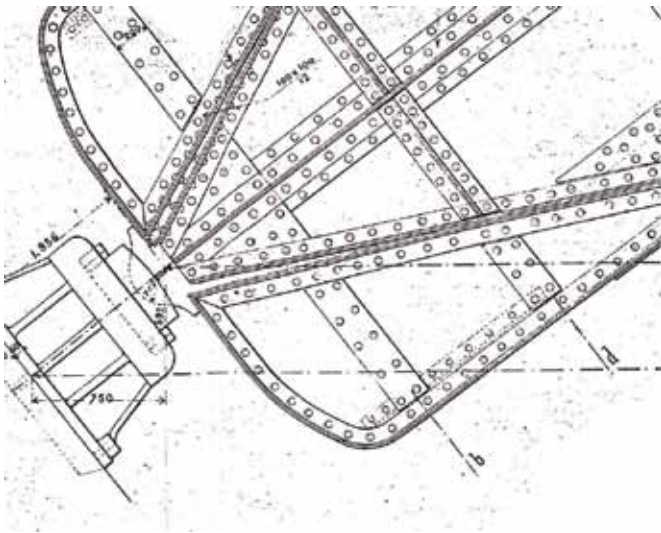


Fig. 3. Articulación en arranque de arco

La figura 3 corresponde a un alzado del arranque del arco biarticulado mostrado en un plano del proyecto, al lado de una fotografía real.

En el proyecto existe una gran cantidad de cálculos gráficos realizados para la determinación de esfuerzos en barras, obtención de líneas de influencia y verificación de la seguridad frente al pandeo de piezas comprimidas, con los procedimientos propios de la época. La figura 4 corresponde a uno de los cálculos gráficos contenidos en el proyecto.

Las acciones de tráfico tenidas en cuenta consistieron en una carga uniforme de 300 kg/m^2 más la consideración conjunta del efecto de unos trenes de carga representados en la figura 5.

La obra se realizó según la forma descrita en el proyecto, salvo muy pequeños cambios. Uno de ellos fue el relativo al pavimento a disponer, cuya definición original estaba representada en la sección transversal del tablero mostrada en la figura 6.

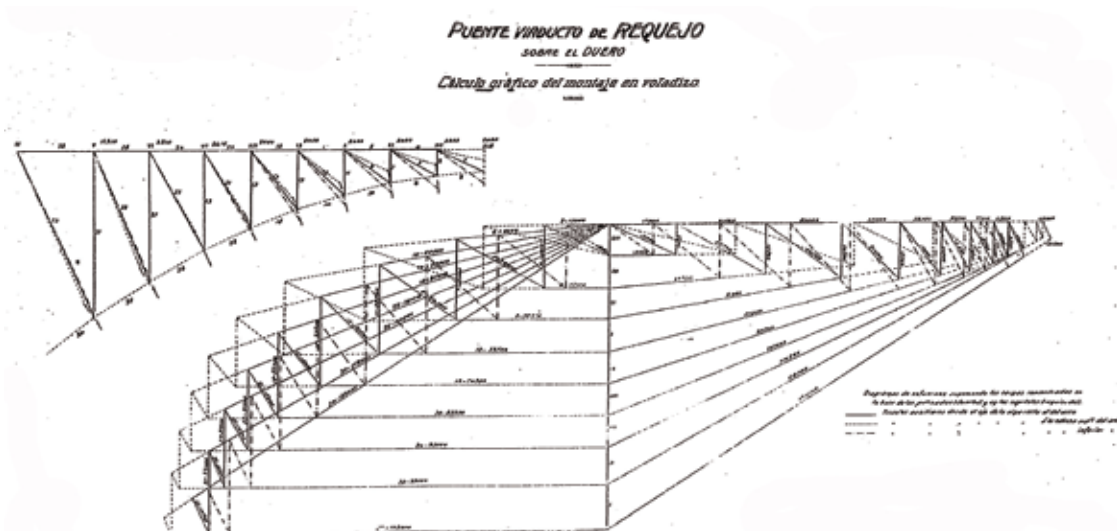


Fig. 4. Cálculo gráfico del montaje en voladizo

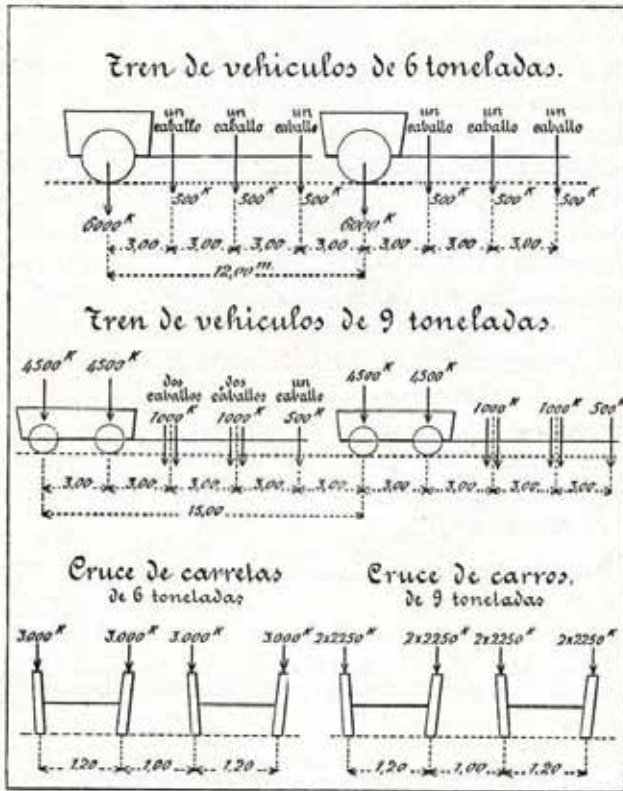


Fig. 5. Sobrecargas móviles



Fig. 7. Firme existente



Fig. 8. Puente de Pino, en fase de construcción (fotografía tomada el 1 de julio de 1913)

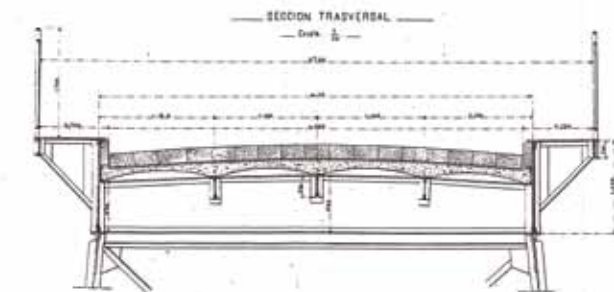


Fig. 6. Sección del tablero inicialmente proyectado por Ribera

En un artículo publicado en la Revista de Obras Públicas, el 24 de septiembre de 1914, el propio Ribera comentaba que “su proyecto suponía que el pavimento de la calzada sería entarugado de madera, pero la Superioridad había impuesto que se pusiera firme de piedra, y así se había ejecutado”. Una de las consecuencias de dicha modificación fue un considerable aumento del peso muerto del tablero.

El pavimento existente, en el momento de la reciente actuación llevada a cabo, estaba formado por un relleno de macadam con un espesor comprendido entre 31 y 42 cm, más un riego asfáltico superficial (fig. 7).

El peso medio estimado era del orden de 754 kg/m². Resultaba un tanto paradójica la existencia de una gruesa capa



Fig. 9. Corrosión en almas de vigas principales con pérdida de sección

de macadam cuyo considerable peso gravitaba sobre el tablero y su contraste con la ligereza y esbeltez de la estructura que servía de soporte. Ante tal consideración, uno de los objetivos de la rehabilitación consistió en disminuir significativamente la magnitud de la carga muerta existente.

El montaje de la estructura del puente se realizó actuando conjuntamente por los dos lados, siguiendo un método mediante avance en voladizo y triangulación provisional mediante tirantes inclinados formados con perfiles metálicos (fig. 8).

3. Rehabilitación de las vigas principales y del sistema de drenaje

3.1. Problemática existente

Existía un problema generalizado de corrosión en la práctica totalidad de las vigas principales (fig. 9). En la parte superior, que aflora sobre el tablero, la oxidación había sido importante habiendo desaparecido gran parte de la zona superior del alma, por debajo del ala.

La considerable pérdida de sección constituía una seria anomalía que se consideró importante corregir con carácter urgente por motivos de seguridad, ya que quedaba debilitada parte de la estructura del tablero.

El tablero disponía de 14 sumideros como el que puede verse en la figura 10. Existían signos evidentes de haberse producido una sistemática acumulación de agua en los tramos entre sumideros y ello había originado la progresiva corrosión de las vigas principales.



Fig. 10. Zona dañada por la corrosión

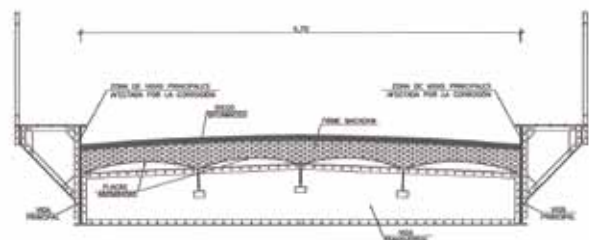


Fig. 11. Sección tipo del tablero del puente de Pino

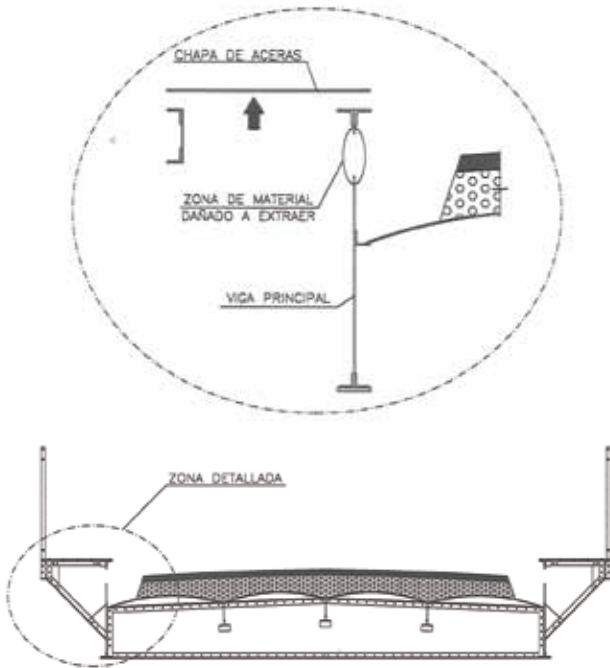


Fig. 12. Fase 1: limpieza de zonas afectadas

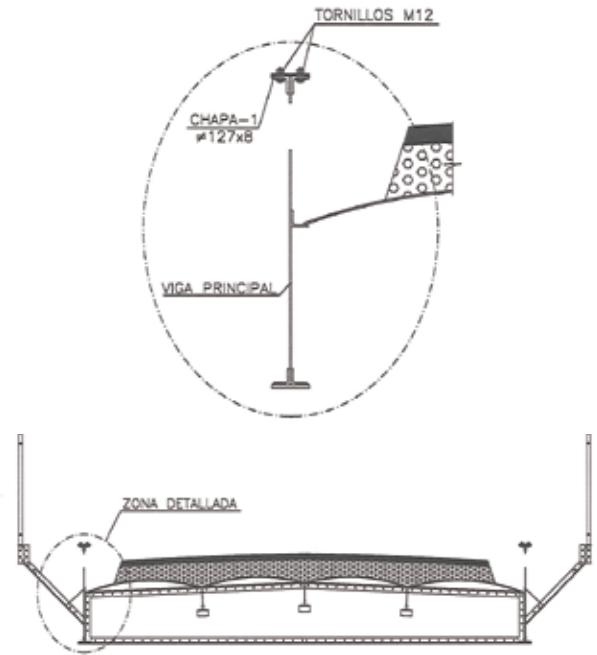


Fig. 13. Fase 2: colocación de la chapa de refuerzo sobre la viga principal

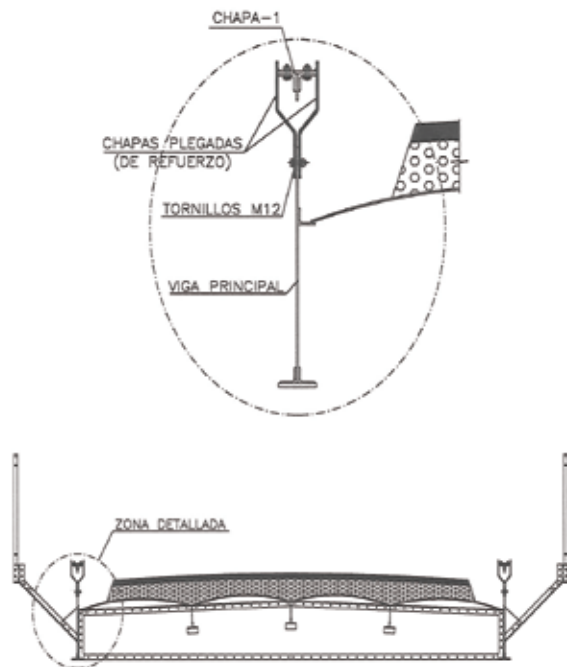


Fig. 14. Fase 3: colocación de las chapas de refuerzo laterales

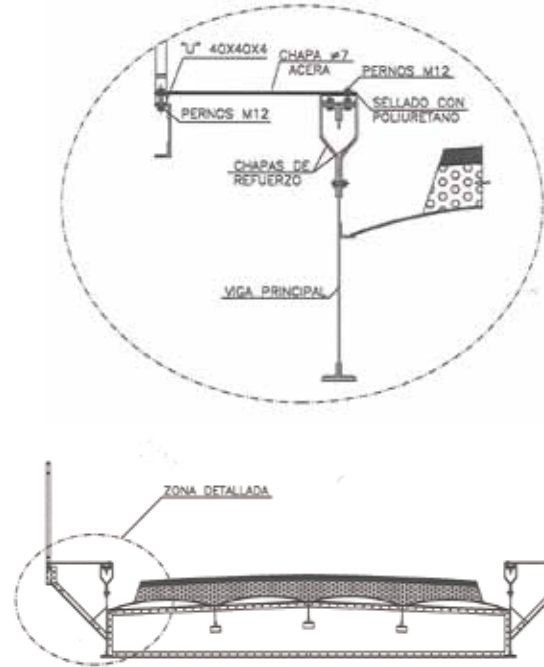


Fig. 15. Fase 4: restitución de las chapas de las aceras

3.2. Trabajos previos

Para conocer las características más relevantes del acero que constituye la estructura del puente se extrajeron muestras que fueron ensayadas en laboratorio, dando como resultado valores de tensión de rotura a tracción comprendidos entre 377 MPa y 455 MPa.

La soldabilidad metalúrgica del acero de las muestras ensayadas resultaba ser “baja” para los procesos habituales de soldadura por fusión al arco eléctrico, debido básicamente a la alta susceptibilidad del mismo al agrietamiento en caliente. Para el refuerzo de la estructura se utilizaron exclusivamente uniones atornilladas y solamente se practicó soldadura para la unión entre sí de los nuevos elementos de acero incorporados.

3.3. Descripción de los trabajos

En la figura 11 correspondiente a la sección tipo del tablero pueden verse dos vigas longitudinales principales (que son las que presentaban los problemas de corrosión reflejados en las figuras 9 y 10) y tres vigas longitudinales secundarias que sustentan unas placas abombadas sobre las que se apoya el firme.

La reparación y refuerzo de las vigas se realizó de acuerdo con el siguiente proceso:

- Fase 1. Cajeadado del firme. Retirada de las chapas que forman las aceras. Limpieza de las zonas afectadas por la corrosión y retirada de los sumideros (fig. 12).
- Fase 2. Colocación de la chapa de refuerzo (127x8 cm) sobre el ala superior de la viga principal. Unión mediante tornillos M12 (fig. 13).
- Fase 3. Colocación de chapas laterales de refuerzo con unión al alma de la viga mediante tornillos y mediante soldadura a la chapa de la fase 2 (fig. 14).
- Fase 4. Colocación de perfiles para elevar la altura de las aceras y reposición de las mismas chapas de acera que fueron retiradas en la FASE-1. Unión mediante tornillos M12 (fig. 15).

3.4. Ejecución de los trabajos

Se comenzó con la retirada de los roblones que sujetaban las chapas de las aceras. El sistema que resultó más eficaz consistió en cortar la cabeza del roblón con un pico y extraer el cuerpo con un puntero.

Una vez que la chapa de la acera había sido retirada, se procedió a la limpieza de las zonas afectadas por la corrosión y a la colocación de la chapa sobre el ala superior de la viga principal (fig. 16).

Fase siguiente: colocación de las dos chapas laterales de refuerzo (fig. 17)

La última fase correspondía a la colocación de los perfiles con sección en ‘C’, necesarios para apoyar las chapas que forman las aceras, y que queden elevadas 40 mm con res-



Fig. 16. Limpieza de la corrosión y colocación de la chapa de refuerzo sobre la cabeza de la viga



Fig. 17. Colocación de las chapas laterales de refuerzo



Fig. 18. Colocación de los perfiles con sección en C para atornillado de las chapas de las aceras



Fig. 19. Aspecto del tablero una vez concluida la rehabilitación de las vigas principales



Fig. 20. Retirada de la totalidad del material de relleno



Fig. 21. Lámina de resina de poliuretano (2 Capas).
Imprimación + revestimiento

pecto a su posición original, debido al espacio necesario para poder apretar los tornillos (figura 18).

4. Sustitución del firme del tablero

El tablero del puente estaba formado por una matriz de chapas abombadas de 4 x 96 elementos sobre la que se apoyaba el firme de macadam de espesor variable entre 31 y 42 cm. El macadam tenía un volumen total de 350 m³ aproximadamente y un peso de unas 665 toneladas.

Con el objeto de reducir espesor y peso, se desarrolló una solución consistente en retirar la totalidad del material de relleno (figura 20) y construir en su lugar un firme monolítico

de hormigón armado con bombeo del 2 % y juntas serradas cada 5 metros.

Para asegurar la impermeabilidad, se proyectó una lámina de resina de poliuretano en dos capas (imprimación y revestimiento), previa limpieza de las chapas con chorro de arena (fig. 21).

En la parte de la chapa expuesta a la intemperie se proyectó una resina acrílica. El volumen de hormigón empleado fue de 127,5 m³, con un peso de 299 toneladas, lo que supone una reducción de más del 50 % con respecto al peso del firme original.



Fig. 22. Colocación de geotextil



Fig. 23. Hormigonado del tablero (Espesor medio: 14 cm)



Fig. 24. Ranurado de superficie

Previamente a la construcción del nuevo firme se dispuso un geotextil en toda la superficie del tablero para evitar la adherencia entre el hormigón y las bóvedas existentes de chapa metálica (fig. 22).

El hormigonado (fig. 23) se realizó desde el centro hacia los extremos, transportando el hormigón desde los estribos hasta el tajo con un dumper, de forma que la adición de cargas sobre el tablero se realizara siempre con cierta simetría. Para limitar las fisuras de retracción se dispuso un mallazo de 15 x 15 cm y 5 mm de diámetro. Para conseguir buenas condiciones de adherencia en la rodadura de vehículos se efectuó un ranurado de la superficie. Se

utilizó un cepillo de barrendero (figura 24). Las juntas se serraban al día siguiente con una separación de cinco (5) metros.

En la figura 25 se muestra el aspecto general del puente durante el hormigonado. Se aprecia, en la parte inferior izquierda donde no se ha hormigonado, el aspecto del tablero tras la retirada del macadam y que dejaba a la vista las chapas abombadas.

Finalmente, se trataron las juntas serradas de retracción y se colocaron las dos juntas de calzada, con una anchura de 612 mm, que permiten movimientos de hasta 80 mm. El máximo movimiento calculado en el puente de Pino es de 30 mm en cada estribo.

5. Prueba de carga dinámica

Una vez finalizadas las obras de rehabilitación en el tablero se realizó una prueba de carga dinámica. Aunque habitualmente el comportamiento dinámico de un puente se estudia sólo en grandes luces o en aquellos puentes que van a estar sometidos a problemas de tipo vibratorio por la acción de cargas exteriores, en el puente de Pino se consideró útil conocer su respuesta dinámica habida cuenta de la ligereza y esbeltez de algunas de sus partes. La información experimental obtenida en la prueba de carga dinámica se conservará por si en el futuro interesase realizar una nueva prueba y comparar resultados en el caso de que se presentasen signos de alguna patología oculta, o si se apreciaran de vibraciones mayores de las habituales.



Fig. 25. Vista general del puente durante el hormigonado del tablero

6. Resumen y conclusiones

En la reciente rehabilitación de puente de Pino, efectuada en 2013, se ha mantenido respetuosamente el aspecto exterior inicial, dado su carácter de obra excepcional por su valor histórico y estético.

Con la reparación de los desperfectos observados en las vigas principales se ha restituido e incrementado la capacidad resistente. En cuanto a los aspectos funcionales relativos al tráfico, se ha mejorado la eficiencia del sistema de drenaje y se ha dotado de un firme con una superficie de aspecto impecable (fig. 26), provisto de las apropiadas juntas de calzada en los extremos del tablero.

La disminución del peso del pavimento ha representado una notable mejora de la capacidad resistente global del puente frente a las acciones de tráfico.

Durante la fase de diseño de la rehabilitación a realizar se contempló la posibilidad de sustituir la totalidad del firme por una chapa ortótropa apoyada en las vigas transversales, con el objeto de conseguir una reducción de peso todavía mayor. Tal solución no se utilizó, por el momento, debido a su alto costo económico previsible. Se consideró que la reducción de peso efectivamente conseguida con la disposición del firme de hormigón resultaba suficiente y equilibrada con su costo, considerablemente menor.



Fig. 26. Aspecto final de la calzada sobre el puente

Los trabajos efectuados recientemente para la rehabilitación del puente de Pino se resumen en los siguientes puntos:

- Reparación y refuerzo de vigas principales de tablero
- Dotación de un nuevo sistema de drenaje del tablero y su impermeabilización
- Sustitución del firme existente de macadam por firme de hormigón. Esta operación ha representado una reducción del peso muerto en 406 kg/m^2 .
- Nuevas juntas de calzada.

Una vez finalizados los trabajos descritos, el puente de Pino cuya construcción finalizó hace 100 años, se encuentra nuevamente en servicio. La escasa demanda de tráfico de la carretera ZA-321, cuya calzada discurre sobre el tablero del puente, constituirá una circunstancia favorable en cuanto a las condiciones de conservación de la obra en el futuro. Las previsiones de escaso tráfico se deben, por una parte, al sinuoso trazado de los tramos de acceso

al puente y fundamentalmente, por la existencia de una reciente ruta alternativa para cruce del río Duero que utiliza la coronación de la presa del Embalse de Villalcampo. Gracias a ello, las condiciones ambientales serán óptimas para los visitantes que deseen admirar esta magnífica obra de la Ingeniería de principios siglo pasado, que se mantiene en su original aspecto y disfrutar al mismo tiempo de la contemplación del paisaje de los Arribes del Duero.

7. Realización

Propiedad: Junta de Castilla y León.

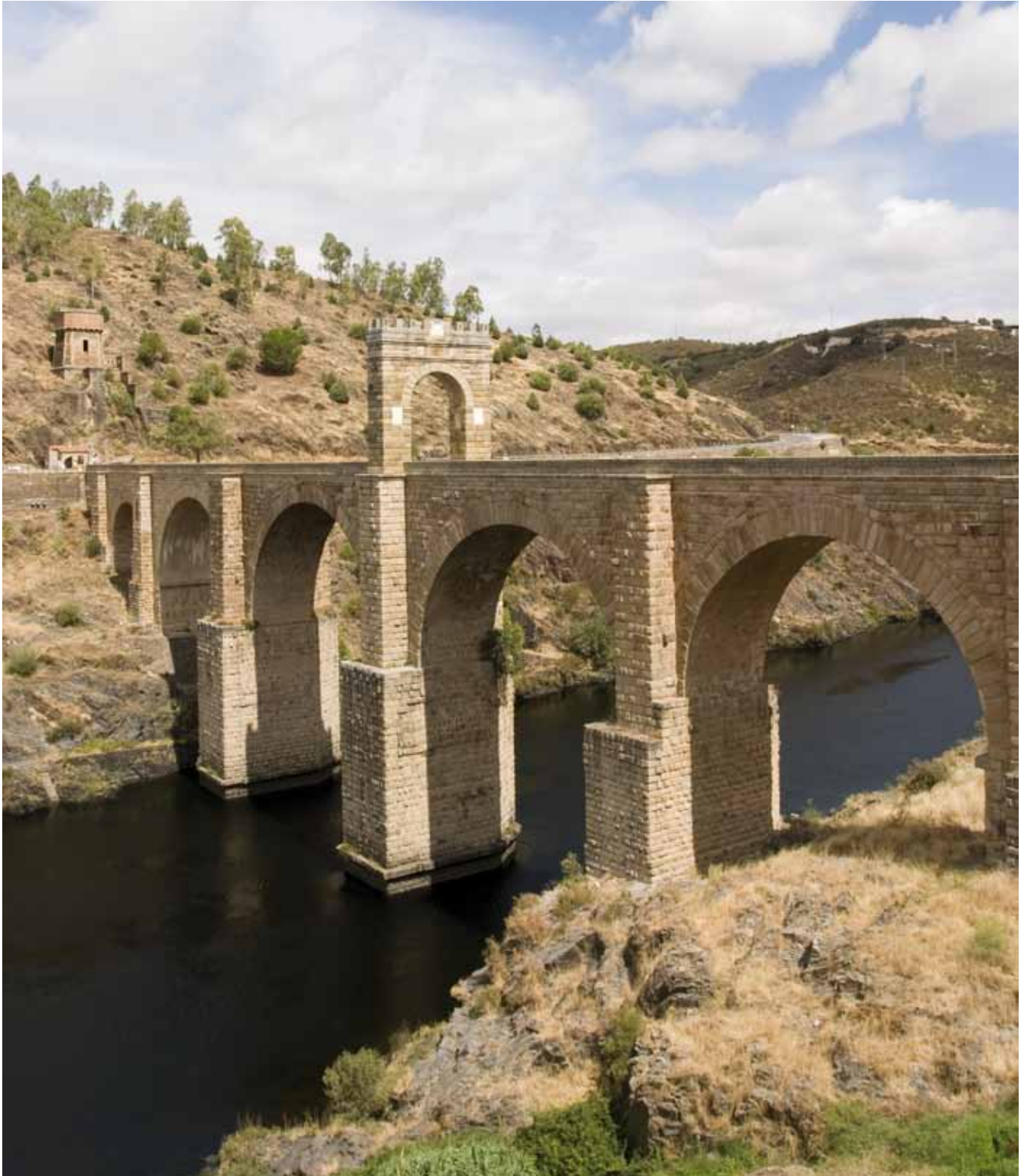
Dirección de Obra: Consejería de Fomento y Medio Ambiente (Junta de Castilla y León).

Proyecto y asistencia técnica: Eipsa.

Empresa Constructora: Collosa.

Finalización de la obra y nueva puesta en servicio: mayo de 2013. **ROP**

DIRECTORIO DE PUENTES ARCO



Puentes arco españoles

Como colofón a este monográfico que la Revista de Obras Públicas dedica a los puentes arco, se ha querido incluir aquí una relación de los arcos españoles más importantes. Es verdaderamente impresionante el extensísimo patrimonio que tenemos en nuestro país de puentes de esta tipología. Tanto es así, que por razones de espacio, hemos tenido que limitar la relación aquí incluida a los puentes arco de más de 100 m de luz, entendiendo como tal la distancia entre puntos de arranque del arco, y dejando fuera la multitud de pasarelas que también tenemos en España.

En la última página se recogen también los puentes arco de más de 100 m de luz que proyectistas o constructores españoles han construido fuera de nuestras fronteras. Son grandes estructuras que no hemos querido dejar fuera de este inventario.

Viaducto de Almonte

(LAV Madrid-Extremadura, Cáceres. En construcción)


Luz

384 m

Material

Hormigón armado

Tipo de arco

Tablero superior

Tráfico

Ferrocarril (AVE)

Proyectista

Arenas & Asociados - IDOM

Constructor

FCC

Viaducto sobre el río Tajo

(LAV Madrid-Extremadura, Cáceres. 2015)


Luz

324 m

Material

Hormigón armado

Tipo de arco

Tablero superior

Tráfico

Ferrocarril (AVE)

Proyectista

Carlos Fernández Casado

Constructor

UTE Copisa-Copasa

Viaducto sobre el embalse de Contreras

(LAV Madrid-Valencia, Cuenca. 2009)


Luz

261 m

Material

Hormigón armado

Tipo de arco

Tablero superior

Tráfico

Ferrocarril (AVE)

Proyectista

Carlos Fernández Casado

Constructor

UTE Azvi-Constructora San José

Arco de los Tilos

(Barranco de los Tilos, Los Sauces, La Palma. 2004)


Luz

255 m

Material

Hormigón armado

Tipo de arco

Tablero inferior

Tráfico

Carretera

Proyectista

Dirección Técnica Ferrovial-Agroman

Constructor

Ferrovial-Agroman

Arcos de Alconétar (Autovía de la Plata. Tramo Plasencia-Cáceres. Cruce del río Tajo sobre el embalse de Alcántara. 2006)



Luz

220 m

Material

Arco de acero y tablero mixto

Tipo de arco

Tablero superior

Tráfico

Carretera

Proyectista

EIPSA (J. A. Llombart y J. Revoltós)

Constructor

OHL

Puente del Tercer Milenio (Zaragoza. 2008)



Luz

216 m

Material

Hormigón armado

Tipo de arco

Tablero inferior

Tráfico

Carretera

Proyectista

Arenas & Asociados

Constructor

Dragados

Viaducto de Martín Gil (Palacios del Pan, Zamora. 1942)



Luz

210 m

Material

Hormigón armado

Tipo de arco

Tablero superior

Tráfico

Ferrocarril

Proyectista

Fco. Martín Gil / E.Torroja

Constructor

Max Jacobson S. A.;
Ricardo Barredo S. A.;
Esab Ibérica, S. A.;
Investigaciones de la
Construcción, S. A. (ICON)

Viaducto del Pintor Fierros (Arco de la Regenta) (Autovía A-8, Ballota, Asturias. 1996)



Luz

194 m

Material

Hormigón armado

Tipo de arco

Tablero superior

Tráfico

Carretera

Proyectista

APIA XXI (J.J. Arenas,
M.J. Pantaleón)

Constructor

Ferrovial

Puente de Lusitania (Mérida. 1990)



Luz

189 m

Material

Arco de acero y tablero de hormigón pretensado

Tipo de arco

Tablero superior

Tráfico

Carretera

Proyectista

Santiago Calatrava Valls-
Servicios Técnicos FCC

Constructor

FCC

Viaducto de Almonte. (A-66. Tramo Hinojal-Cáceres, Cáceres. 2005)



Luz

184 m

Material

Hormigón armado

Tipo de arco

Tablero superior

Tráfico

Carretera

Proyectista

Siegrist y Moreno S.L.

Constructor

Acciona

Viaducto sobre el río Ulla
(LAV Orense-Santiago, A Coruña. 2010)



Luz 168 m	Tráfico Ferrocarril (AVE)
Material Hormigón armado	Proyectista Torroja Ingeniería
Tipo de arco Tablero superior	Constructor Dragados-Tecsa

Puente de La Barqueta
(Sevilla. 1989)



Luz 168 m	Tráfico Carretera
Material Acero	Proyectista Apia XXI (J.J. Arenas, M.J. Pantaleón)
Tipo de arco Tablero inferior	Constructor Auxini - Ensidesa

Arco de la Vicaría
(Embalse de La Fuensanta en el río Segura, Albacete. 2007)



Luz 168 m	Tráfico Carretera
Material Arco de acero relleno de hormigón y tablero mixto	Proyectista Dirección Técnica Ferrovial-Agroman
Tipo de arco Tablero intermedio	Constructor Ferrovial-Agroman

Arco de Ricobayo
(Embalse de Ricobayo, Zamora. 1996)



Luz 168 m	Tráfico Carretera
Material Arco de acero relleno de hormigón con fibras y tablero mixto	Proyectista Dirección Técnica Ferrovial-Agroman
Tipo de arco Tablero superior	Constructor Ferrovial-Agroman

Puente sobre el embalse del Burguillo
(El Tiemblo, Ávila. 1999)



Luz 165 m	Tráfico Carretera
Material Hormigón armado	Proyectista Fhecor Ingenieros Consultores, S.A.
Tipo de arco Tablero superior	Constructor UTE Construcciones Sobrino-Tapusa

Viaducto de Tamaraceite
(GC-2 Acceso Norte, Las Palmas, Gran Canaria. 1994)



Luz 162 m	Tráfico Carretera
Material Arco mixto y tablero de hormigón	Proyectista Torroja Ingeniería
Tipo de arco Tablero intermedio	Constructor Dragados-Cubiertas

Viaducto de Navia

(Navia. 2006)

**Luz**

160 + 160 m

Material

Arco mixto y tablero de hormigón

Tipo de arco

Tablero superior

Tráfico

Carretera

Proyectista

Servicios Técnicos FCC

Constructor

FCC

Puente de la Gola del Llobregat (Vial Puerto-Aeropuerto de Barcelona, El Prat de Llobregat, Barcelona. 2015)

**Luz**

150 m

Material

Hormigón armado

Tipo de arco

Tablero intermedio

Tráfico

Carretera

Proyectista

Apia XXI / Enginyeria Reventós

Constructor

Copisa

Puente sobre el río Tera

(Zamora. 2015)

**Luz**

150 m

Material

Tablero de hormigón armado y arco de acero

Tipo de arco

Tablero superior

Tráfico

Ferrocarril (AVE)

Proyectista

Carlos Fernández Casado

Constructor

Acciona

Arco de Miraflores

(Variante Este de Bilbao, Vizcaya. 1995)

**Luz**

148 m

Material

Hormigón armado

Tipo de arco

Tablero superior

Tráfico

Carretera

Proyectista

Apia XXI (J.J. Arenas, M.J. Pantaleón)

Constructor

Entrecanales

Viaducto del Cieza

(Corrales de Buelna/Molledo, Santander. 2004)

**Luz**

141 m

Material

Hormigón armado

Tipo de arco

Tablero superior

Tráfico

Carretera

Proyectista

Siegrist y Moreno / Pondio Ingenieros

Constructor

Sacyr Vallehermoso-Cavosa

Puente sobre el río Ebro

(Logroño. 2005)

**Luz**

140 m

Material

Acero

Tipo de arco

Tablero inferior

Tráfico

Carretero

Proyectista

Carlos Fernández Casado

Constructor

Ferrovial

Viducto del río Clariano en Onteniente

(Ronda Oeste Onteniente, Valencia. 2011)



Luz
140 m

Material
Arco y tablero mixtos

Tipo de arco
Tablero intermedio

Tráfico
Carretera

Proyektista
Torroja Ingeniería

Constructor
FCC

Puente arco sobre el río Guadalfeo

(Autopista A7, Granada. 2011)



Luz
140 m

Material
Tablero de hormigón y arco metálico

Tipo de arco
Tablero inferior

Tráfico
Carretera

Proyektista
Siegrist y Moreno / Fhecor Ingenieros Consultores, S.A.

Constructor
FCC

Puente arco de Tablate

(Autovía de Sierra Nevada, A-44. Lecrín, Granada. 1996)



Luz
140 m

Material
Arco metálico y tablero mixto

Tipo de arco
Tablero superior

Tráfico
Carretera

Proyektista
Esteyco

Constructor
Entrecanales

Puente Abbas ibn Firnas

(Córdoba. 2011)



Luz
135 + 135 m

Material
Arco y tablero mixtos

Tipo de arco
Tablero inferior

Tráfico
Carretera

Proyektista
José Luis Manzanares Japón (Ayesa)

Constructor
Dragados

Viaducto sobre río Deza

(LAV Orense-Santiago, Silleda, Lalín, Orense. 2009)



Luz
131,5 m

Material
Hormigón armado

Tipo de arco
Tablero superior

Tráfico
Ferrocarril (AVE)

Proyektista
Apia XXI (M.J. Pantaleón, O.R. Ramos)

Constructor
Comsa

Puente Cristo de la Expiración

(Sevilla. 1991)



Luz
131 m

Material
Arco y tablero de acero

Tipo de arco
Tablero superior

Tráfico
Carretera

Proyektista
José Luis Manzanares Japón (Ayesa)

Constructor
FCC

Puente de la Alameda

(Valencia. 1995)



Luz
131 m

Material
Acero

Tipo de arco
Tablero inferior

Tráfico
Carretera

Proyectista
Santiago Calatrava/Iberinsa

Constructor
OCP-Entrecanales

Puente arco de Palma del Río sobre el río

Guadalquivir (Variante de Palma del Río A-453. Córdoba. 2007)



Luz
130 m

Material
Arco de acero y tablero mixto

Tipo de arco
Tablero inferior

Tráfico
Carretera

Proyectista
IDEAM+Narval

Constructor
FCC

Puente sobre el río Escudo

(Cantabria. 1999)



Luz
126 m

Material
Arco y tablero mixtos

Tipo de arco
Tablero superior

Tráfico
Carretera

Proyectista
Carlos Fernández Casado

Constructor
UTE Dragados-FCC

Puente sobre el Ebro

(Zaragoza. 2003)



Luz
125 m

Material
Arco de acero y tablero mixto

Tipo de arco
Tablero superior

Tráfico
Ferrocarril

Proyectista
Aepo - Servicios Técnicos de FCC

Constructor
FCC

Arco de Tablate II

(A-44, Tablate, Granada. 2002)



Luz
124,5 m

Material
Arco y tablero mixtos

Tipo de arco
Tablero superior

Tráfico
Carretera

Proyectista
Torroja Ingeniería

Constructor
Dragados

Puente sobre el río Vinalopó

(Elche. 2014)



Luz
120 m

Material
Acero

Tipo de arco
Tablero inferior

Tráfico
Carretera

Proyectista
Carlos Fernández Casado

Constructor
Intersa Abalco

Puente arco sobre el río Ebro

(Autovía LO-20, Logroño. 2014)



Luz
120 m

Material
Acero

Tipo de arco
Tablero inferior

Tráfico
Carretera

Proyectista
IDEAM

Constructor
Acciona

Puente de Requejo (Puente Pino)

(Pino del Oro y Villadepera, Zamora. 1914)



Luz
120 m

Material
Acero

Tipo de arco
Tablero superior

Tráfico
Carretera

Proyectista
José Eugenio Ribera

Constructor
Asturiana Duro Felguera

Puente arco sobre el río Ebro

(Zaragoza. 2002)



Luz
120 m

Material
Arco mixto y tablero de hormigón pretensado

Tipo de arco
Tablero inferior

Tráfico
Carretera

Proyectista
Carlos Fernández Casado

Constructor
UTE ACS-FCC

Puente de Santiago sobre el río Arga

(Puente la Reina, Navarra. 2013)



Luz
120 m

Material
Arco de acero y tablero mixto

Tipo de arco
Tablero superior

Tráfico
Carretera

Proyectista
Carlos Fernández Casado

Constructor
UTE FCC-Navarra de Empresas de Construcción

Arroyo del Valle (LAV Madrid-Segovia-Valladolid. Tramo: Soto del Real-Miraflores de la Sierra, Madrid. 2006)



Luz
132 m

Material
Hormigón armado

Tipo de arco
Tablero superior

Tráfico
Ferrocarril (AVE)

Proyectista
Siegrist y Moreno / Proes Consultores

Constructor
UTE Azvi-Puentes y Calzadas

Viaducto de los Mellizos

(AP-46 Málaga. 2011)



Luz
120 m

Material
Hormigón armado

Tipo de arco
Tablero superior

Tráfico
Carretera

Proyectista
Pondio Ingenieros

Constructor
Sacyr

Arco sobre el barranco de Erques

(Barranco de Erques, Tenerife. 2015)



Luz

110 m

Material

Arco de acero relleno de hormigón y tablero mixto

Tipo de arco

Tablero inferior

Tráfico

Carretera

Proyectista

Dirección Técnica Ferroviál-Agroman

Constructor

Ferroviál-Agroman

Puente das Correntes

(Río Lárez, Pontevedra. 2012)



Luz

116 m

Material

Arco metálico y tablero mixto

Tipo de arco

Tablero intermedio

Tráfico

Carretera

Proyectista

Temha

Constructor

UTE Sercoysa-Ogensa

Viaducto de Cauche

(AP-46, Málaga. 2011)



Luz

115 m

Material

Hormigón armado

Tipo de arco

Tablero superior

Tráfico

Carretera

Proyectista

Pondio Ingenieros

Constructor

Sacyr

Viaducto de Lanjarón

(A-348, Lanjarón, Granada. 2001)



Luz

112,6 m

Material

Acero

Tipo de arco

Tablero inferior

Tráfico

Carretera

Proyectista

Torroja Ingeniería

Constructor

Dragados

Puente arco sobre el río Deba

(Deba, Guipúzcoa. 2006)



Luz

110 m

Material

Acero

Tipo de arco

Tablero inferior

Tráfico

Carretera

Proyectista

IDEAM

Constructor

UTE Dragados-Moyúa

Puente sobre el río Galindo

(Vizcaya. 2007)



Luz

110 m

Material

Arco y tablero de acero

Tipo de arco

Tablero inferior

Tráfico

Carretera

Proyectista

Carlos Fernández Casado

Constructor

Bázola

Viaducto sobre el río Arnoia (AVE Madrid-Galicia. Tramo Miamán-Ponte Ambia, Orense. 2013)



Luz
110 m

Material
Hormigón armado

Tipo de arco
Tablero superior

Tráfico
Ferrocarril (AVE)

Proyectista
EIPSA (José Antonio Lombart y Jordi Revoltós)

Constructor
UTE Constructora San José-Ossa

Viaducto del barranco de la Cuesta (Autovía del Mediterráneo. Tramo Almuñecar, La Herradura-Taramay. 2006)



Luz
106,5 m

Material
Hormigón armado

Tipo de arco
Tablero superior

Tráfico
Carretera

Proyectista
Proes Consultores

Constructor
UTE AZVI-Obras Subterráneas-Ploder

Viaducto del Verde (Autovía del Mediterráneo. Tramo Almuñecar, La Herradura-Taramay. 2006)



Luz
106,5 m

Material
Hormigón armado

Tipo de arco
Tablero superior

Tráfico
Carretera

Proyectista
Proes Consultores

Constructor
UTE AZVI-Obras Subterráneas-Ploder

Viaducto del Seco (Autovía del Mediterráneo. Tramo Almuñecar, La Herradura-Taramay. 2006)



Luz
106,5 m

Material
Hormigón armado

Tipo de arco
Tablero superior

Tráfico
Carretera

Proyectista
Proes Consultores

Constructor
UTE AZVI-Obras Subterráneas-Ploder

Puente de la vaguada de Las Llamas (Puente Juan José Arenas) (Santander. 2011)



Luz
102 m

Material
Hormigón armado

Tipo de arco
Tablero intermedio

Tráfico
Carretera

Proyectista
Arenas & Asociados

Constructor
Isolux Corsán

Puente arco Infante don Henrique

(Oporto, Portugal. 2002)



Luz
280 m

Material
Hormigón armado

Tipo de arco
Tablero superior

Tráfico
Carretera

Proyectista
IDEAM + AFassociados
(Antonio Adao da Fonseca)

Constructor
UTE Acciona (Necso)-Edifer

Juscelino Kubistcheck

(Brasilia, Brasil. 2002)



Luz
240 + 240 + 240 m

Material
Arco metálico y tablero mixto

Tipo de arco
Tablero intermedio

Tráfico
Carretera

Proyectista
Projconsult-Cowi

Constructor
Via Dragados-Usiminas
mecanica

Puente de San Sebastián

(México. 2009)



Luz
137 m

Material
Hormigón armado

Tipo de arco
Tablero superior

Tráfico
Carretera

Proyectista
Carlos Fernández Casado

Constructor
Cocanal

Puente sobre río Tercero

(Villamaría, Córdoba, Argentina. 2013)



Luz
120 m

Material
Acero

Tipo de arco
Tablero inferior

Tráfico
Carretero

Proyectista
Apia XXI (M.J.
Pantaleón, O.R. Ramos)

Constructor
Freyssinet

Puente arco sobre el río Dambovita

(Bucarest, Rumania, 2011)



Luz
Vano principal: 117 m

Material
Tablero mixto y arco metálico

Tipo de arco
Tablero inferior

Tráfico
Carretera

Proyectista
Fhecor Ingenieros
Consultores, S.A.

Constructor
FCC - Astaldi

Puente sobre el río Arno

(Italia. 2014)



Luz
110 + 77 m

Material
Acero

Tipo de arco
Tablero inferior

Tráfico
Carretera

Proyectista
Carlos Fernández Casado

Constructor
MAEG Construzioni SPA



▲ 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**

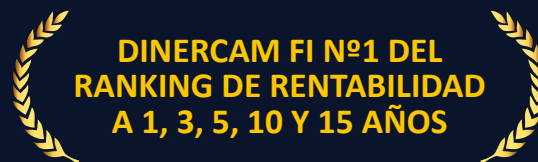
www.ohl.es



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.