SITUACION ACTUAL DEL PUENTE ARCO

(CURRENT POSITION OF ARCH BRIDGE)

Javier Manterola, Dr. Ingeniero de Caminos

Fecha de recepción: 14-X-88

560-30

RESUMEN

La aparición del hormigón pretensado en los años 40 y la del puente atirantado en los 60 han dejado sin "sitio" al puente arco. Recientemente se observa una pequeña reactivación en la construcción de este tipo de puentes por varios motivos: Construcción del arco por avance en voladizo acompañado por el empuje del tablero sobre el arco ya construido. Ampliación de sus posibilidades de ubicación por la adopción de determinadas disposiciones especiales. Incremento de la presencia del arco con tablero inferior por la vistosidad que presenta de cara al usuario.

SUMMARY

The appearance of prestressed concrete in the forties and of the span bridge (puente atirantado) in the nineteen sixties have displaced the arch bridge. There has recently been renewed interest in this type of bridge, for various reasons: construction in advance of the arch as a projection, with the thrust of the deck on the already constructed arch, broader possibilities for location as the result of the adoption of certain special arrangements; an increase in the number of arches with lower deck due to the attractiveness for the user.

Fig. 1.—Pont du Gard.

El puente arco ha sido, a lo largo de la historia, la morfología básica de los puentes. Hasta el siglo XIX era casi la única manifestación de los puentes, hasta llegar a asociar la palabra puente con el puente-arco. No quiere esto decir que no coexistiesen con el arco otros tipos de puentes, de madera por ejemplo, pero el sentido de permanencia de la obra iba unido a la piedra. Y no carece de lógica que esto fuera así, pues a la forma arco —generadora de esfuerzos predominantes de compresión— se asocia la dovela de piedra, fácil de obtener y manejar hasta llegar a constituir una estructura perfecta, en que lo constructivo y lo resistente están tan estrechamente ligados, que no se sabe qué es antes si la dovela de piedra o la forma arco. (Fig. 1).

Con algunos cambios en su forma externa por la sucesión de estilos arquitectónicos, y ninguno en su constitución estructural interna, el puente arco de pie-

Fig. 2.—Ponte de Coalbrookdale.

Fig. 3.—Ponte de Sandö.

dra llega a la primera revolución industrial imponiendo su concepción y propiedades, hasta el punto de que el más antiguo de los puentes de fundición que existen, el Coalbrookdale (Fig. 2) adopta la morfología arco en una imitación desnaturalizada.

Que esto ocurriera así no es de extrañar, pues es frecuente que los actos creativos de primera magnitud —y no fue otra cosa la aparición de los materiales metálicos— copien las formas anteriores, cuando pueden ser, como lo fueron, generadores de formas estructurales nuevas, sugerentes y que transformaron el panorama constructivo de la humanidad.

Si bien es lógico que la fundición, por sus excelentes características de resistencia a compresión, se manifestase en forma de arcos, pronto la aparición del hierro dulce y del acero, con posterioridad, evolucionaron hacia el dintel recto, única estructura que materializa la plataforma de paso, generando un sinnúmero de mor-

fologías resistentes y de procedimientos constructivos que aún manejamos y usamos hoy en día.

El arco siguió un camino no menos brillante que la estructura recta o colgada con el material metálico.

La aparición del hormigón, en un principio, y la del hormigón armado, después, transforman la construcción, como lo había hecho anteriormente el hierro y el acero. Sin embargo, sus escasas condiciones de controlar la fisuración para enfrentar luces importantes, determinó que siguiese siendo la estructura arco la normalmente utilizada cuando se pretendía realizar puentes de luces importantes. Con el hormigón armado el arco dio un salto espectacular de los escasos 40 m que se habían salvado con puentes de piedra a más de 300 metros (Fig. 3).

Esta situación se prolongó hasta aproximadamente 1940, en que la aparición del pretensado supuso un golpe mortal para la morfología arco, de la cual apenas se ha podido recuperar. Si el campo de actuación del puente arco empezaba en los 30 m de luz, cuando existía sólo el hormigón armado, el pretensado fue desplazando al arco hacia luces cada vez más importantes y a una velocidad vertiginosa.

Junto con este fenómeno de desplazamiento, de desalojo del arco desde abajo, se produce un nuevo fenómeno, pero éste desde arriba. La aparición del puente atirantado a principios de los años 60, y su vulgarización a lo largo de la década de los 70 y los 80, dejó sin sitio al puente arco para manifestarse en el ámbito de las luces grandes, lo que condujo a los muy escasos proyectos y realizaciones de esta tipología durante estos años.

Con el acero el problema fue similar. El acero que siempre ha ido por delante del hormigón, en el planteamiento de morfologías y procesos constructivos nuevos, disponía además de una herramienta morfológica complementaria que en hormigón difícilmente se utiliza, aunque recientemente aparezca en algunas realizaciones. La estructura en celosía, perfectamente adecuada a los materiales metálicos, tiene unas posibilidades constructivas y resistentes excelentes para realizar puentes de gran luz. El puente arco —rey indiscutible de los puentes— desaparecía del panorama de la construcción.

Las razones objetivas de este desplazamiento del puente arco son claras.

1.º) El puente arco es mucho más exigente que el puente recto o el puente atirantado respecto a las características resistentes del terreno. Un asiento diferencial en un puente recto es mucho menos grave que un desplazamiento horizontal de los arranques del arco.

- 2.º) Un puente recto materializa la plataforma de paso. Un arco no, lo que determina la necesidad de dos estructuras superpuestas arco y puente recto, referidos entre sí para cumplir su misión.
- 3.º) Un arco sólo funciona como tal cuando está terminado, lo que obliga en su construcción a la utilización de enormes cimbras que lo soporten mientras se construye, cimbras cuya ejecución y precio pueden llegar a ser mayores que el del mismo arco al que sirven (Fig. 4).

SITUACION ACTUAL

En el momento actual parece que las cosas empiezan a cambiar algo y aunque no constituya un cambio que pueda hacer recuperar al arco su situación privilegiada de antaño, se empiezan a ver más puentes arco y se verán más en lo sucesivo. Y esto es por varias razones:

1.º Cambios en el procedimiento de construcción

La eliminación de la gran cimbra necesaria para su construcción ha obsesionado a todos los ingenieros que querían mantener una tipología tan hermosa como la del puente arco. Los intentos han sido diversos. La utilización de la autocimbra de Ribera, con la que se han construido puentes tan enormes como el Martín Gil de Torroja, no fue sino un paso intermedio, actualmente en desuso por la lentitud en la construcción y cuidado extremo en la ejecución si se quería reducir la cuantía de la cimbra a valores mínimos (Fig. 5).

Morandi, intentó y logró realizar puentes arco, construyendo los dos semi-arcos en posición vertical y girándolos hasta adoptar su posición definitiva (Fig. 6). La operación de giro se realiza con soporte intermedio de un sistema de atirantamiento y apuntalamiento. Se entiende que este procedimiento es mucho más adecuado para puentes pequeños que para puentes grandes, aunque se ha realizado algunas veces para puentes de tamaño considerable (Fig. 7).

La prefabricación de un arco de pequeñas dimensiones, que se utilizaba como soporte provisional de un tímpano, y que se convertía en estructura conjunta para comportamiento definitivo, fue un método desarrollado por Fernández Casado para la construcción de bastantes puentes de tamaño mediano (Fig. 8).

Todos estos intentos fallaban para los puentes de gran tamaño, lugar donde los arcos pueden encontrar su sitio en el momento actual. Y en este lugar se ha erigido como procedimiento absoluto la construcción de arcos por avance en voladizo sucesivo, procedimiento éste que ha permitido obtener realizaciones tan espec-

Fig. 4.—Viaducto sobre el Fiumarella. R. Morandi.

Fig. 5.—Puente Martín Gil. Torroja, Autocimbra.

Fig. 6.—Pasarela sobre el Lussia. R. Morandi.

Fig. 7.—Puente de Argentobel (Alemania). L = 143 m. Ingenieur büro Bung. Memmingen.

Fig. 8.—Puente de Mieres. Carlos Fernández Casado.

Fig. 9.—Puentes de la isla de KRK, Yugoslavia.

Fig. 10.—Puente de Garabit-Eiffel.

Fig. 11.—New River Gorge Bridge. L = 510 m.

Fig. 12.—Puente de la Guaira, Freyssinet. Montaje de cimbra central.

taculares como el puente de la isla KRK, en Yugoslavia, con 390 m de luz (Fig. 9).

En puentes metálicos este procedimiento se emplea desde hace mucho más tiempo. Eiffel ya construyó Garabit (Fig. 10) por este método, y esa tradición se ha mantenido hasta el momento actual cuya máxima realización corresponde al puente sobre la garganta en el New River en West Virginia, de 510 m de luz (Fig. 11).

Constituye una tónica general, en la construcción de puentes, que los métodos constructivos sean normalmente generados para la construcción metálica y después se aplican a la construcción de hormigón, mucho menos elástica y más pesada que la metálica para acoplarse a situaciones intermedias, pero que una vez resuelto, desplaza al puente metálico del lugar que estaba ubicado en la tipología.

El método en avance en voladizo sucesivo para puentes de hormigón se inicia por Freyssinet para la construcción de los puentes de la autopista Caracas-La

Fig. 13.—Puente sobre el Valle de Crotta. L = 90 m. Ing. Luigi Brenni.

Guaira (Fig. 12). El método no se completa en su planteamiento definitivo, pues la parte central del arco se realiza con cimbra colgada desde la parte de los arcos construida en avance en voladizo.

En esta realización se nota todavía el miedo a las deformaciones no controladas del sistema de atirantamiento que soporta provisionalmente al arco, deformaciones producidas por la muy diferente respuesta ante la temperatura del arco y del sistema de tirantes. Así se articula en su base, atenuando el efecto en flexiones que producen los alargamientos o acortamientos en el sistema de tirantes.

Hoy en día este procedimiento está perfectamente dominado y se aplica no sólo a arcos empotrados en la base, sino que también el sistema de avance en voladizo se lleva hasta el cierre total del arco, sin necesidad de interponer además otro procedimiento de construcción como es el de colgar una cimbra (Fig. 13).

Durante las distintas fases que atraviese el arco a lo largo de su construcción, el antifunicular de cargas que caracteriza a todo comportamiento arco puede ser obtenido teóricamente por la actuación en la carga de los tirantes. Pero esta situación teórica no puede ser mantenida en toda su pureza por las variaciones de temperatura que activan, como ya hemos dicho, de distinta

manera arco y tirantes y por el proceso constructivo que no asegura que una situación cualquiera de antifunicularidad en el arco pueda ser mantenida en la posición siguiente de construcción sin activación en cada fase del sistema de tirantes, lo cual siempre es molesto. El arco en construcción se verá sometido a flexiones fácilmente resistibles por el arco, sin la desnaturalización del mismo.

Este procedimiento de construcción viene acompañado recientemente por el empuje del tablero, deslizando sobre los soportes que los vinculan al arco (Fig. 14).

Fig. 14.—Puente empujado sobre arco.

Fig. 15.—Ponte Hakawazu, Japón. $L = 170$ m.

Fig. 16.—Ponte de Ryp. Construcción de ménsula en avance en voladizo.

Fig. 17.—Ponte Ryp, terminado.

De esta manera se evita también la cimbra que debería soportar el tablero sobre el arco durante su ejecución. Esta operación de empujados del tablero, completamente resuelta para puentes rectos, presenta para puentes arco un problema complementario, pues durante las fases de empujado el arco se ve sometido a cargas importantes no funiculares. Es decir, cuando el

tablero alcanza el centro del arco, éste se ve sometido a cargas verticales importantes en mitad del arco, de cuantía muy superior a la que después introducirá la sobrecarga de uso. Las flexiones complementarias que estas situaciones crean se reducen con el atirantamiento del arco, en su punto de unión con los pilares, a la cabeza del pilar situado en los arranques del arco. Este atirantamiento provisional del propio arco ya terminado se realiza simétricamente, y se elimina una vez que el tablero ha pasado por completo.

Existen variantes sobre este tipo de construcción en avance en voladizo combinado con el empuje del tablero. Por ejemplo, en el puente Hokawazu, Japón (Figura 15) la construcción en avance en voladizo se realizaba simultáneamente para el arco y el tablero. El sistema de atirantamiento provisional no se dispone como en el caso anterior, sino que se triangulan las células trapeciales que forman entre sí arco-tablero y pilares. La estructura provisional mientras se produce el avance es una estructura triangular, que trabaja en ménsula con una cabeza de compresión que es el arco, con una cabeza de tracción que es el tablero y con un sistema de montantes y diagonales constituidos por dos pilares definitivos y el sistema de atirantamiento provisional. Una vez terminado el avance y conectadas las dos mitades del puente, se eliminan los tirantes diagonales de las células y la estructura pasa de ser dos ménsulas de canto variable a un arco con tablero superior.

Este mismo principio, pero sin convertir al final las ménsulas en un puente arco, sino manteniendo definitivamente el sistema de atirantamiento provisional, se aplicó al puente de Rip, situado al norte de Sydney, en Australia, que con 183 m de luz parece un arco pero no lo es (Fig. 16). Son dos ménsulas trianguladas, con un tramo apoyado en el centro. No existe transmisión de cargas horizontales al terreno, ni existe compresión de arco en clave (Fig. 17).

Fig. 18.—Puente del Sella. Proyecto J. Manterola y L. Fernández Troyano.

2.º Disposiciones especiales para evitar la necesidad de un terreno de cimentación rígido

Esta condición que, como citábamos al principio, es una de las causantes de que la aplicabilidad de esta estructura se redujese a zonas en las que las condiciones de cimentación son excelentes, como no ocurre en la ribera de los ríos y en otros muchos casos, si no se quiere gastar enormes cantidades de dinero en proveer de un apoyo suficientemente rígido a las deformaciones horizontales, puede obviarse en muchas ocasiones.

El procedimiento consiste en establecer las disposiciones estructurales correspondientes para impedir que la carga horizontal que exige el arco en arranques se transmita al suelo. En el proyecto del puente del Sella, aún no construido, nosotros hemos diseñado un puente arco en el cual el empuje horizontal en arranques es transmitido al tablero, en lugar de al terreno, sin más que disponer un puntal inclinado embutido en el terraplén de acceso (Fig. 18). El par producido por las fuerzas horizontales del tablero y del arranque del arco, se contrarresta con el par de fuerzas verticales que se producen en los extremos del puntal inclinado. De esta manera se solicita al suelo únicamente con cargas verticales, mucho más fáciles de resistir que las horizontales. El arco está apoyado en su arranque sobre apoyos deslizantes, y toda la estructura es isostática a los movimientos horizontales impuestos. Con la recogida por pretensado de la tracción superior del tablero se eliminan las deformaciones parásitas que podrán producir mal funcionamiento del arco; comparan-

do los esfuerzos del mismo puente con coacción horizontal del suelo o sin ella, el comportamiento en flexión del arco es casi idéntico.

Este procedimiento, que creemos es la primera vez que se aplica a puentes, tiene su precedente en la construcción de naves industriales, en las que la cubierta arco se atiranta por la parte superior de la misma. En estos casos, el pequeño par que se establece entre arranque del arco y el tirante es recogido por el pilar vertical. Se entiende la enorme versatilidad que puede tener hoy en día este proyecto, cuando se cuenta con procedimientos activos de carga, como el pretensado, que eliminan deformaciones parásitas.

3.º Actualización del arco con tablero inferior

Es bien conocido que esta tipología estructural recoge la componente horizontal del empuje del arco en el tablero, transmitiendo cargas exclusivamente verticales al suelo. Lo hace de una manera natural, sin necesidad del artificio citado para el caso del puente con tablero superior.

Esta ventaja fundamental ha hecho que esta tipología se haya mantenido con relativa constancia a lo largo de estos años, que podríamos citar como oscuros para el arco.

Pero en esta reactivación actual están interviniendo varios factores.

En primer lugar su espectacularidad. La estructura resistente queda a la vista, el puente toma una dimensión espacial en la que se introduce el usuario sintiendo su presencia. Con un tratamiento adecuado de arcos y sistemas de tirantes la forma del puente puede llegar a ser muy sugestiva (Fig. 19).

En segundo lugar, la posibilidad de disponer el sistema de atirantamiento de tal modo que ante las sobrecargas de uso, el puente funcione como una viga. Este procedimiento, planteado inicialmente por Nielsen, consiste en la triangulación del sistema de tirantes para que puedan funcionar tanto a compresión —siempre que no se sobrepase la tracción de cuelgue de peso propio— y a tracción. Sin embargo, esta triangulación dejaba muchas veces de funcionar como consecuen-

Fig. 19.—Puente arco metálico. La Cartuja. Solución no retenida. J. Manterola y L. Fernández Troyano.

Fig. 20.—Ponte de la Cartuja. Sistema de tirantes entre arco y tablero. J. Manterola y L. Fernández Troyano.

Fig. 22.—Ponte de Torrelodones. L. Fernández Troyano, J. Manterola.

Fig. 21.—Ponte Izumi-Otsun. Osaka. $L = 175$ m.

Fig. 23.—Ponte de Bacunayagua.

cia de la pequeña inclinación de los tirantes. La sobrecarga ponía realmente algunos tirantes a compresión y, por tanto, dejaban de actuar; el arco debía engordarse para resistir las flexiones de la sobrecarga, pues el efecto viga dejaba de funcionar. Con la disposición de tirantes mucho más tumbados, en doble capa ordenada, la sobrecarga puede ser controlada y dejar casi ausente de flexión arco y tablero, funcionando realmente el conjunto como una viga. Esto permite reducir el dimensionamiento de arco y tablero a magnitudes mínimas.

Desde el punto de vista formal, el sistema de tirantes se convierte en una malla muy delgada que relaciona ambos elementos. El resultado conjunto final es excelente.

Desde el punto de vista constructivo, este tipo de puentes presenta dos facetas. La primera, la más habitual, consiste en soportar el tablero sobre apoyos provisionales y montar el arco encima por partes. Una vez terminado el arco se procede a la eliminación de los apoyos provisionales y a completar la construcción de tablero en su tejido transversal.

Pero los puentes de este tipo se han realizado muy frecuentemente en un parque de fabricación en tierra y se han llevado por flotación a su lugar definitivo con

la ayuda de grandes flotadores dispuestos cerca de su punta. En el caso del puente de la Fig. 20, los dos cordones inferiores que limitan el tablero eran sendas vigas cajón que permitían la flotabilidad del conjunto; su transporte se realizaba por arrastre de ese enorme "catamarán" de 180 m de luz, e izado posterior a su posición definitiva.

Todas estas condiciones constructivas han determinado que estos puentes sean predominantemente metálicos.

4.º Disposiciones especiales

A lo largo de estos últimos 40 años, en los que el puente arco parecía totalmente acabado, la tecnología de la construcción ha puesto a punto y aclarado muchos comportamientos resistentes no comprendidos suficientemente bien durante las épocas anteriores. Un puente arco resolvía el problema transversal de todo tablero, disponiendo varios arcos o uno solo, suficientemente ancho, que recogiese la presencia de la excentricidad de la sobrecarga a la manera de una viga transversal soportada en dos o más puntos que eran los arcos. Existía una visión estática, de equilibrio primario, en el diseño transversal del puente.

Desde entonces nos hemos acostumbrado a confiar en determinadas respuestas resistentes a elementos diferentes. Un puente atirantado, con atirantamiento al eje, resuelve el problema de flexión general con el sistema de tirantes, y el de excentricidad de carga con la rigidez a torsión del tablero. Lo mismo podríamos decir de los "spine-beam" u otro. Por el contrario puede reunir, en un solo elemento resistente, funciones resueltas anteriormente con dos. El puente colgado separa el cable de la viga de rigidez, y los "span-band" lo reúnen en uno solo. Nuestros conocimientos actuales se han ampliado de tal manera, y además tenemos experiencia de que su comportamiento es correctísimo, que nos posibilita para aplicar esta nueva situación al puente arco.

En el puente Izumi-Otsu, en Japón, de 175 m de luz (Fig. 21) el arco centrado sólo puede resistir la carga simétrica; el efecto de la excentricidad transversal de la carga se confía al tablero, lo mismo que la rigidez necesaria para controlar los problemas de inestabilidad del arco fuera del plano, lo cual produce una relación arco-

tablero inadecuada desde un punto de vista estrictamente formal, por la presencia del muy rígido sistema de tirantes.

En el puente de Torrelodones se ha abandonado la rigidez formal de la sección transversal cuadrada del arco-tímpano. Un arco tímpano de sección triangular permite resolver el problema de la excentricidad transversal de las cargas perfectamente bien, confiriendo al puente una esbeltez y visión nuevas (Fig. 22).

Más antiguo en el tiempo, pero igualmente novedoso respecto al aspecto típico de los arcos, lo encontramos en la forma antifunicular del arco obtenida cuando se carga el tablero en pocos puntos, disposición que resuelve bien la relación viaducto de acceso-puente principal (Fig. 23).

Esta y otras muchas visiones que veremos pronto, serán consecuencia de actualizar la estructura puente-arco a las posibilidades actuales.

* * *

publicación del ietcc / CSIC

El Instituto Eduardo Torroja, miembro activo tanto del Comité Eurointernacional del Hormigón (CEB), como de la Federación Internacional del Pretensado (FIP), ha tomado a su cargo la traducción y edición de esta importante normativa.

Aunque presentado con el título de «Código Modelo CEB/FIP 1978» este documento incorpora los dos primeros volúmenes de este «Sistema Unificado Internacional de Reglamentación Técnica de Ingeniería Civil». El primer volumen de este «Sistema Unificado» es el denominado «Reglas comunes Unificadas para los diferentes tipos de obras y materiales», donde se exponen los criterios y formatos de seguridad a que han de ajustarse los diferentes Códigos (estructuras de hormigón, estructuras metálicas, estructuras mixtas, estructuras de albañilería y estructuras de madera), que han de configurar la totalidad del antedicho sistema.

El segundo volumen es propiamente el Código Modelo para las Estructuras de Hormigón. Fruto de la colaboración de dos asociaciones del prestigio del CEB y la FIP, desde mediados de los 60, incorpora los avances científicos y tecnológicos producidos en los últimos años sin detrimento alguno de la claridad y operatividad que deben presidir un código que pretende ser, ante todo, un auxiliar práctico para los técnicos de la construcción.

El Código sigue en su estructura las reglas más o menos clásicas: una primera parte dedicada a los datos generales para el cálculo (propiedades de los materiales, datos relativos al pretensado, tolerancias); en segundo lugar se presentan las reglas de proyecto estructural (acciones, sollicitaciones, estados límites últimos y de utilización, reglas de detalle para el armado); y, por último, ejecución, mantenimiento y control de calidad.

También incluye reglas para estructuras con elementos prefabricados y estructuras de hormigón con áridos ligeros. Los Anejos del Código se refieren a: terminología, proyecto mediante la experimentación, resistencia al fuego, tecnología del hormigón, comportamiento en el tiempo del hormigón y fatiga.

Un volumen encuadernado en cartón, de 21 x 30 cm, compuesto de 340 páginas, Madrid, mayo 1982.

Precios: España 2.500 ptas. Extranjero 36 \$ USA.