

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

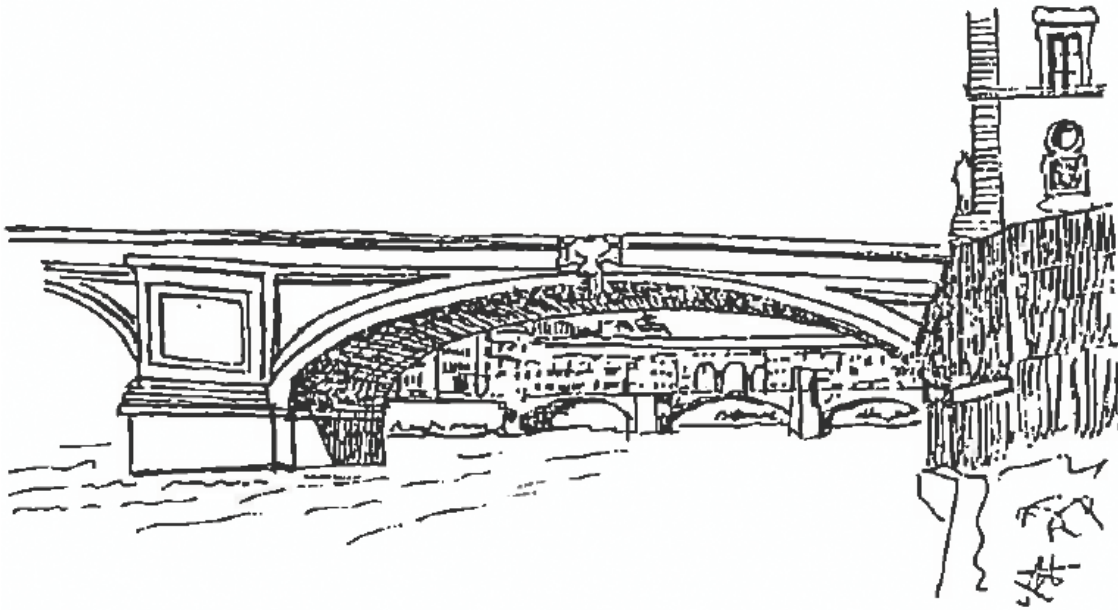


Fig. 3. Arco del Ponte Santa Trinita, enmarcando al Ponte Vecchio, Florencia (Bartolomeo Ammannati, 1569). Dibujo: Juan José Arenas

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

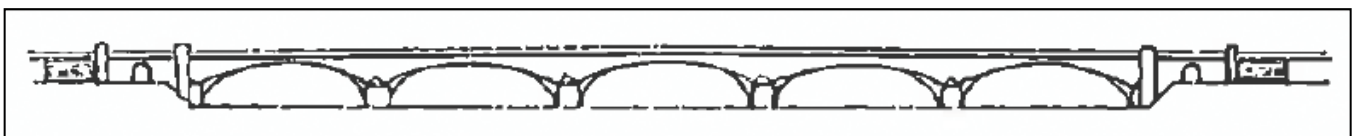


Fig. 4. Aspecto general del desaparecido Puente de Neuilly sobre el río Sena (Jean Rodolphe Perronet, finales del S.XVIII). Dibujo: Juan José Arenas

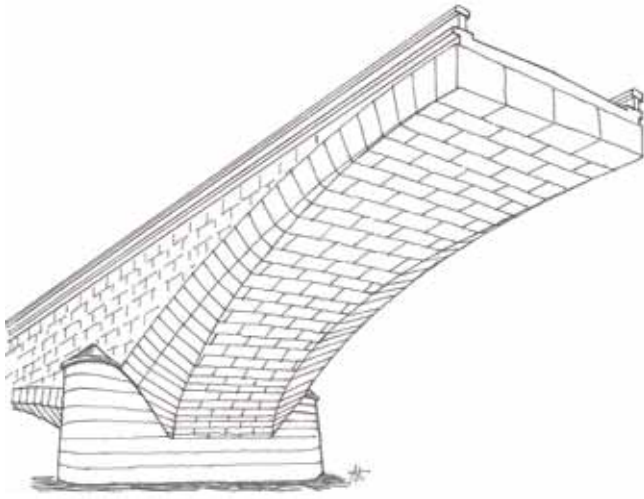


Fig. 5. Bóveda con “cuernos de vaca” (Escuela de J.R. Perronet).
Dibujo: Juan José Arenas

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

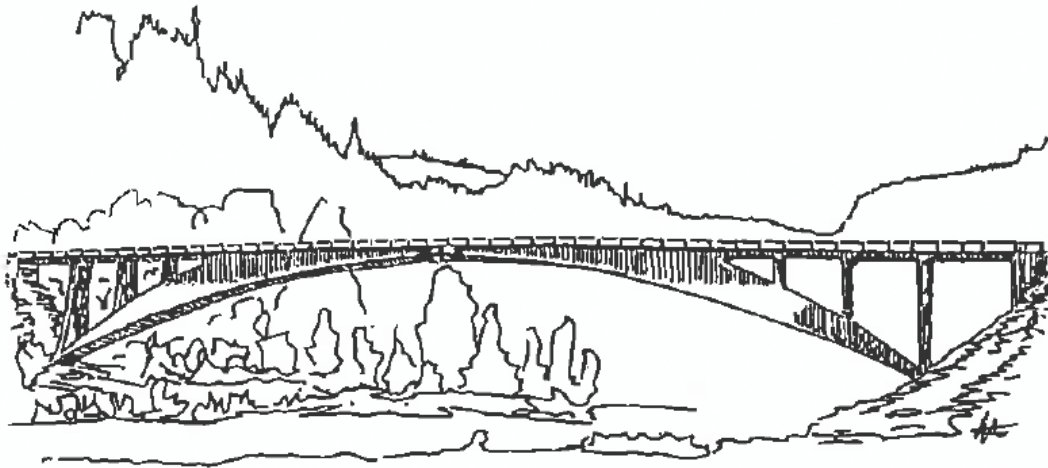


Fig. 6. Puente triarticulado de Rossgraben (Maillart, 1932). Dibujo: Juan José Arenas



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

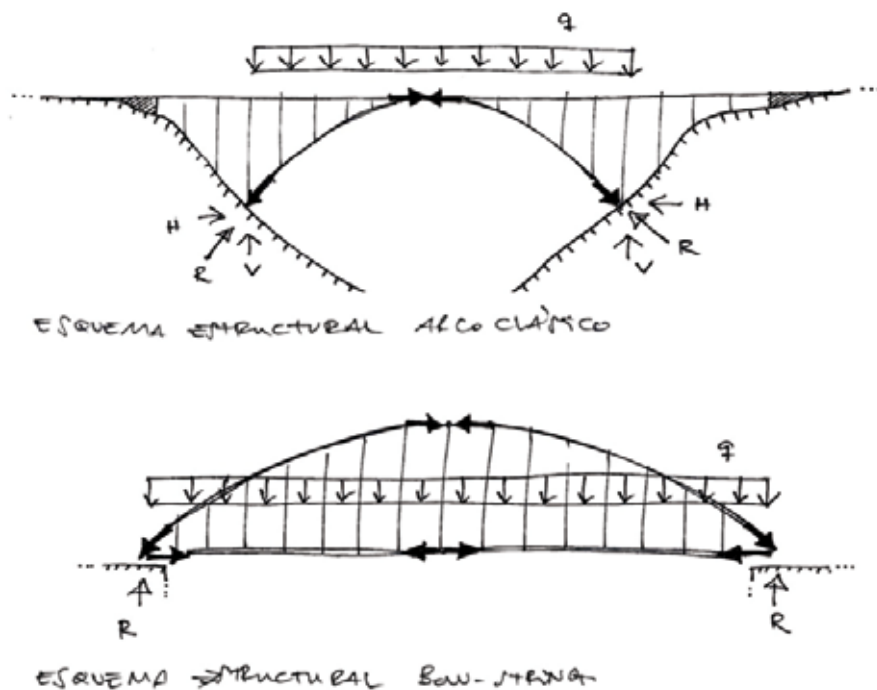


Fig. 8. Comparativa de los esquemas estructurales de un arco clásico y un bow-string. Esquema: Héctor Beade Pereda.

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

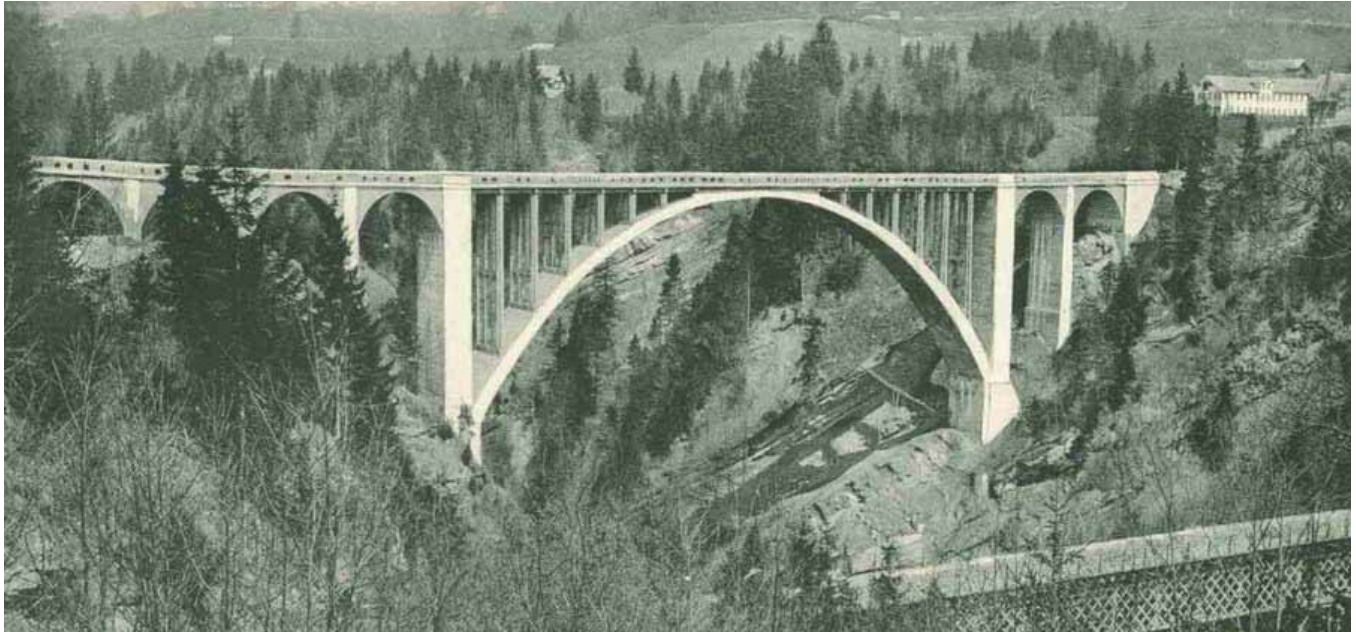


Fig. 9. Puente arco de Gmündertobel sobre el río Sitter (Emil Mörsch, 1908).

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.

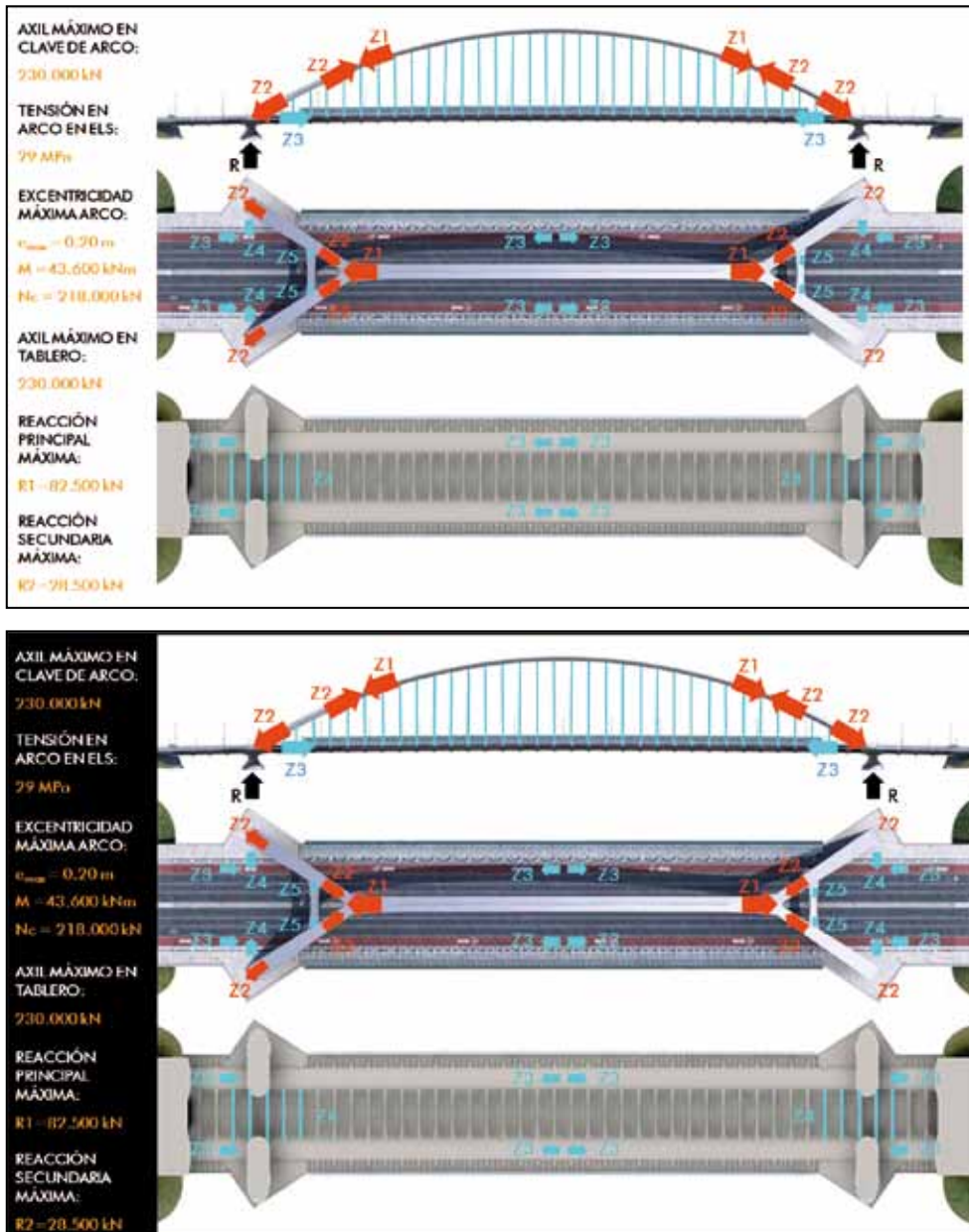


Fig. 15. Comportamiento estructural del puente del Tercer Milenio. Esquema: Héctor Beade Pereda

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 flectores 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**