

## Los puentes arco metálicos modernos



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



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

### Resumen

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

### Palabras clave

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

### Abstract

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

### Keywords

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

### 1. Ocaso y renacimiento de una vieja tipología

#### *Los grandes arcos en celosía. Dominación y ocaso*

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

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

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

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

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

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

#### *El renacimiento de una vieja tipología*

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

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

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

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

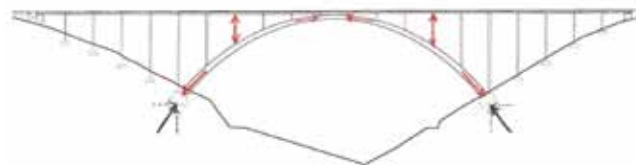


Fig. 1. Puentes arco con tablero superior

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

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

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

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

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



Fig. 2. Puentes arco con tablero inferior

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

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



Fig. 3. Puentes arco con tablero intermedio

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

#### *Puentes arco metálicos de tablero superior*

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

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



Fig. 4. Puente Rainbow



Fig. 5. Puente Lewiston-Queenston



Fig. 6. Arcos de Alconétar

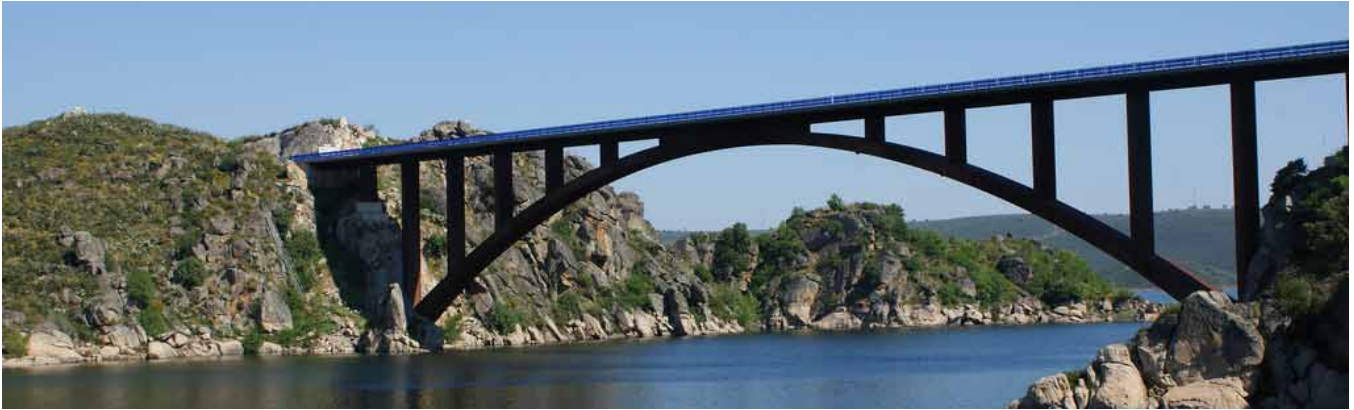


Fig. 7. Arco de Ricobayo.

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

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

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

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

#### *Puentes arco metálicos de tablero inferior*

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

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

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

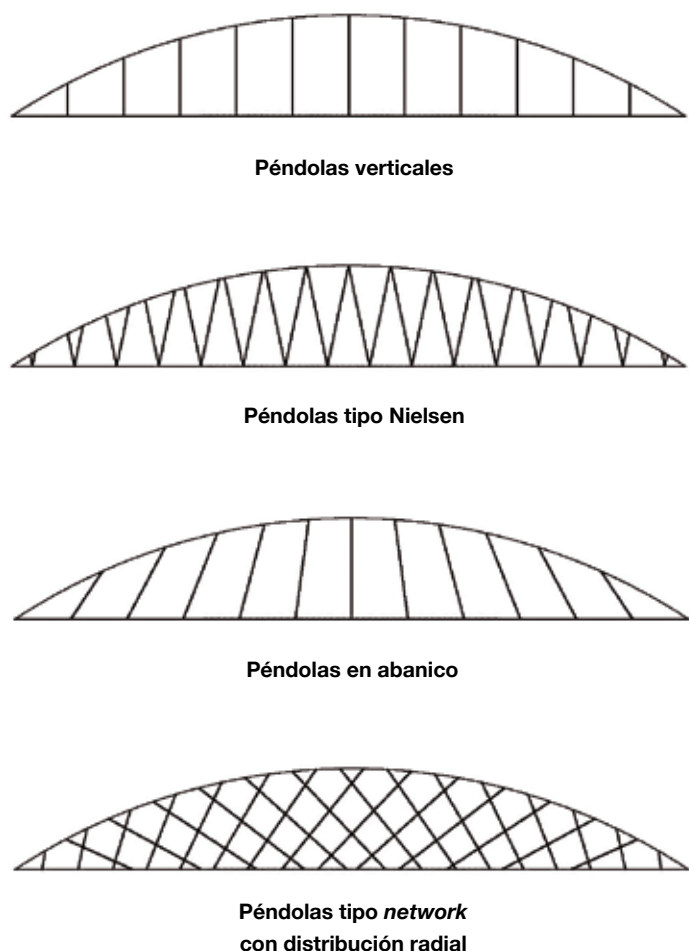


Fig. 8. Redes de péndolas en arcos de tablero inferior

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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



Fig. 9. Puente Solidarität



Fig. 10. Puente Glenfield



Fig. 11. Puente Pentele



Fig. 12. Puente Portal de Castilla



Fig. 13. Puente de Lanjarón

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

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

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

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





Fig. 14. Puente sobre el estrecho de Fehmarn



Fig. 15. Puente de Shin-Hamadera

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

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

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

#### *Puentes arco metálicos de tablero intermedio*

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

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



Fig. 16. Puente sobre el río Deba

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

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



Fig. 17. Puente Blennerhassett Island



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



Fig. 19. Puente de la Barqueta



Fig. 20. Puente Fremont

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

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

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

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



Fig. 21. Puente sobre el lago Roosevelt

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

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

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



Fig. 22. Puente Kishiwada

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

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

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



Fig. 23. Puente Shin Kizugawa



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



Fig. 24. Puente Yumemai



Fig. 26. Puente de Tamaraceite

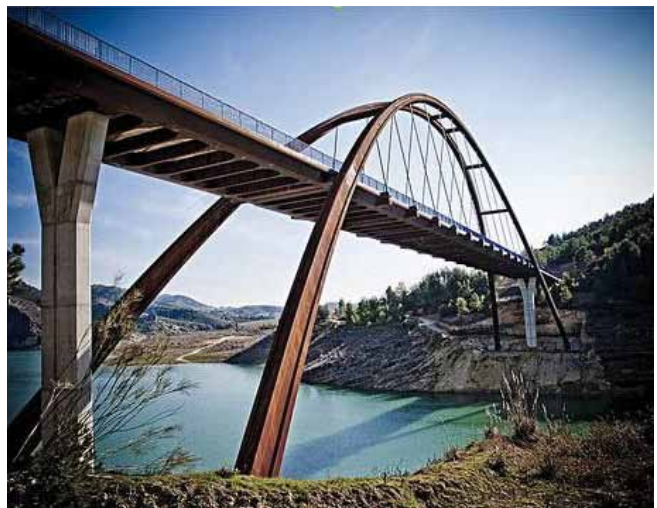


Fig. 27. Puente de la Vicaría



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



Fig. 29. Puente Nanning sobre el río Yong

### 3. Arcos espaciales... y especiales

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

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

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

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

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

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

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

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

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



Fig. 30. Puente de la Alameda

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



Fig. 31. Puente Main Street



Fig. 32. Puente Juscelino Kubitschek



Fig. 33. Puente Margaret Hunt Hill



Fig. 34. Puente sobre el río Galindo

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

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

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