

LOS ARCOS CON TABLERO INTERMEDIO, UNA ANTIGUA Y NUEVA TIPOLOGIA

José M^a de Villar Luengo I.C.C.P.
Director de José A. Torroja, Oficina Técnica, S.A.

“Si la columna es arte, el arco es técnica, sin que esto quiera decir, ni que a la columna le falte técnica ni que el arco sea incapaz de vivísima expresión estética” E. Torroja: Razón y Ser

Introducción

Desde los tiempos más remotos, en los que el hombre siente la necesidad de establecer vías de comunicación para relacionarse, comerciar y ensanchar sus hábitats naturales, surge la necesidad de construir determinadas obras para salvar los obstáculos naturales, ríos y barrancos, dando con ello lugar al desarrollo de uno de los elementos más significativos y emblemáticos de la ingeniería civil: el puente.

Cuando decidió sustituir la madera por la piedra, en su deseo de construir obras durables, la humanidad encontró en el puente una obra a la que dedicar sus mayores esfuerzos, dejando en ellos plasmada su evolución no solo en el arte de construir sino también en ese otro arte, el Arte con mayúscula, con el que los pueblos han querido siempre transmitir a las generaciones futuras su ideario estético y su afán por saltar por encima de las estrictas necesidades funcionales y transformar lo exclusivamente útil en un objeto bello y representativo de su propia cultura.

Y, desde que empezaron a utilizarlo los romanos, es precisamente el arco el que permite el uso de la piedra, al ser el único elemento estructural capaz de salvar un vano trabajando fundamentalmente a compresión. Los arcos enjutados, con tímpanos macizos para rigidizarlos, han sido utilizados durante dos milenios hasta que nuevos materiales trajeron nuevas formas.

El acero y sobre todo el hormigón armado, al trabajar más económicamente a compresión, permitieron el arco exento, sin pesados tímpanos, aligerándolo tanto estructural como visualmente y lanzándolo a la conquista de las grandes luces, abandonando poco a poco las pequeñas y medianas luces sobre pilas intermedias con empujes descompensados, tan típicas de los puentes de piedra, que han sido ocupadas por otras tipologías más adaptadas a estos casos.

Pero las grandes luces requieren también grandes flechas, y no siempre la relación entre la topografía del terreno y la rasante de la carretera permite situar todo el tablero sobre el arco, apoyándolo sobre montantes comprimidos. De aquí la aparición de arcos que, en toda su longitud o en parte de ella, sobresalen por encima del tablero, que en estas zonas queda colgado de péndolas metálicas.

Cabe pues, en principio, plantear tres tipologías de puente en arco: arcos con tablero superior, inferior e intermedio, según que el tablero esté todo él sobre el arco, esté al nivel de los arranques o situado en una posición intermedia. Cada uno tiene su campo de aplicación, y a estas tipologías de puente en arco con tablero intermedio está dedicado este artículo.

Campo de aplicación y ventajas

Los arcos con tablero intermedio son la respuesta tipológica para aquellos casos en los que, deseándose contar con las conocidas ventajas de una solución estructural en arco: resistencia por forma, economía de materiales, expresión visual..., existen ciertos condicionantes locales que impiden o desaconsejan el establecimiento de la solución más tradicional del arco con tablero superior.

El condicionante más importante, a estos efectos, es la altura de la rasante sobre el terreno, en los puntos donde se prevé la ubicación de los apoyos del arco.

Cuando esta altura es inferior a la flecha requerida por el arco, que en esta tipología puede estimarse en la cuarta parte de su luz, no son posibles soluciones de arco con tablero superior, por motivos puramente geométricos.

Otro condicionante es de carácter geotécnico. Cuando las características del terreno: estratigrafía, capacidad portante..., no son las adecuadas para establecer una cimentación que transmita el empuje inclinado producido por el arco, sería necesario atirantarlo para conseguir verticalizar dicho empuje. La disposición de un tirante entre los apoyos del arco es muchas veces inviable y, en general, no aconsejable ya que constituiría un obstáculo, visible o no, para cualquier tipo de circulación, existente bajo el arco (fig. 1).

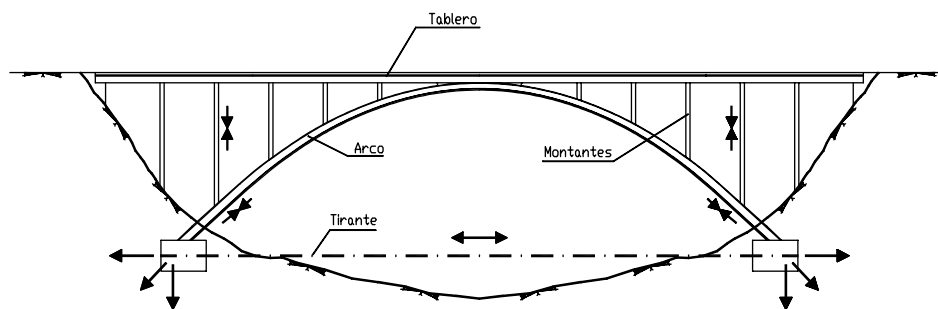


Fig. 1

Si el arco es con tablero intermedio, la proximidad del propio tablero a los apoyos del arco, permite integrar el tirante en él, disponiendo unas sencillas células triangulares, contrapesadas, que equilibran el sistema de fuerzas (fig. 2 y 3), obteniéndose el resultado deseado.

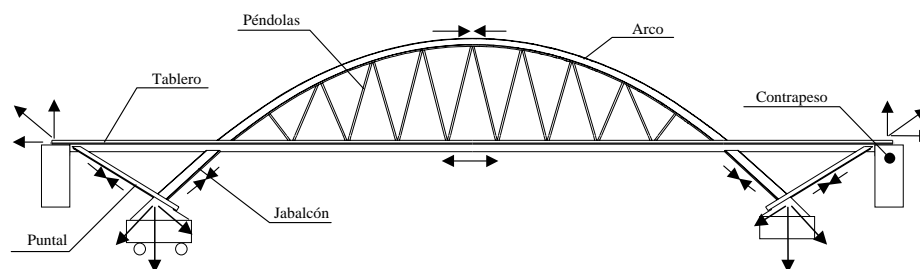


Fig. 2



Fig. 3

Existen también condicionantes de tipo estético, tal es el caso en que se pretende conseguir una visualización completa de la estructura para un observador situado en un entorno próximo-medio-lejano. Si el arco salva un barranco tortuoso, tipo cañón, excavado por la erosión fluvial en una meseta amplia y plana, la solución habitual de tablero superior quedaría encajada dentro del barranco y oculta a la visión de cualquier observador situado en la planicie. Por el contrario el arco de tablero inferior elevaría la mayor parte de su alzado por encima de la llanura, marcando la existencia del barranco y constituiría un hito singular del paisaje. (fig. 4 y 5).



Fig. 4



Fig. 5

El simple enunciado de los condicionantes expuestos en los párrafos anteriores, sin pretender ser exhaustivos en su planteamiento, define el campo de aplicación de “nuestra” tipología y pone de manifiesto alguna de sus ventajas, adicionales a las propias e intrínsecas del arco.

Una circunstancia favorable para los arcos de tablero inferior es que las nuevas vías de comunicación, que están vertebrando nuestro país, son, generalmente, autovías o autopistas con medianas suficientemente amplias que permiten el establecimiento de un arco central único (fig. 5), dispuesto en el plano de la mediana, con las consiguientes ventajas económicas y constructivas respecto a la solución de arcos laterales (fig. 6) que, en esta tipología, quedaría penalizada por la gran separación requerida entre dichos arcos para permitir el paso, entre ellos, de la plataforma completa (calzadas, arcenes, andenes y barreras). En el caso de arcos con tablero superior este problema no existe, ya que la separación entre arcos puede ser menor al no estar condicionada por la plataforma.



Fig. 6

Como punto final de este epígrafe quería llamar la atención sobre la influencia de la tipología estructural sobre las labores de conservación.

Cada vez está más arraigada la idea de que una estructura debe ser conservada a partir del día de la prueba de carga. La realización de inspecciones principales periódicas y de un mantenimiento ordinario debe ser una práctica habitual que hay que favorecer y facilitar desde la concepción y el proyecto de nuestras estructuras. A estos efectos los arcos con tablero inferior presentan claras ventajas sobre otras tipologías, incluidas los arcos con tablero superior, ya que la mayor parte de los elementos estructurales están situados por encima del plano del tablero lo que facilita su inspección y conservación, sin necesidad de medios especiales de difícil y costosa utilización.

Procesos constructivos. Tendencias actuales

Si alguna tipología estructural está íntimamente ligada a su proceso constructivo y con una clara dependencia técnica y económica de él, ésta es el arco.

En la dificultad, en la carestía e incertidumbre de su ejecución han radicado las razones por las que en un amplio período de tiempo, no muy lejano, se ha abandonado la construcción de arcos de gran luz, reemplazándolos por otras tipologías ligadas a nuevos materiales y técnicas y a los métodos constructivos que han surgido como consecuencia del avance experimentado en los medios auxiliares de construcción: prefabricación pesada, voladizos sucesivos, empujes, autocimbras, lanzaderas, equipos de izado, etc.

En los últimos años, sin embargo, se ha producido en nuestro país un resurgimiento de los arcos; ejemplos de esta nueva generación de estructuras son: Tablate, Arriondas, La Regenta, Ricobayo, Mérida, La Barqueta, Tamaraceite, Onteniente, de las que las cuatro primeras son arcos con tablero superior, las dos siguientes con tablero inferior y las dos últimas con tablero intermedio.

En lo que resta de artículo vamos a exponer, teniendo como referencia los viaductos de Tamaraceite y Onteniente, proyectados por JOSE A. TORROJA, OFICINA TECNICA, S.A., los procesos constructivos que, en el momento actual, consideramos más idóneos para la tipología analizada.

Por su interrelación con el proceso constructivo, sobre todo en lo que se refiere al arco propiamente dicho, creemos conveniente plantear en primer lugar la elección del material que lo va a constituir. Tradicionalmente se ha arrastrado la idea de que el arco, al ser un elemento que trabaja, fundamentalmente a compresión, podía resolverse, en buena economía, utilizando el hormigón armado o incluso el hormigón en masa, si las luces eran pequeñas. Por el contrario el tablero, elemento solicitado a flexión y adicionalmente a tracción, cuando asume la función de atirantamiento del arco, requeriría la utilización del acero o del hormigón pretensado.

Sin embargo, la realidad es que los arcos deben soportar flexiones, en algunos casos importantes, debido a la actuación de las sobrecargas de uso y al peso propio

durante el proceso constructivo, cargas éstas que, al no ser fijas, uniformes, simétricas y completas, hacen que la directriz del arco, generalmente parabólica, se separe bastante de su funicular.

Este hecho, unido a la importante reducción de peso propio que puede conseguirse, sobre todo en las fases constructivas del arco, combinando el hormigón y el acero estructural nos lleva a considerar al arco mixto como una de las soluciones actuales más idóneas y así hemos proyectado los arcos de Tamaraceite y Onteniente.



Fig. 7

La combinación del acero y del hormigón en el arco, disponiendo las chapas metálicas en su perímetro, formando la carcasa exterior, permite formalizar fácilmente la estructura completa del arco, que, en una primera fase, está constituida exclusivamente por dicha carcasa metálica (fig. 7). Esta carcasa es capaz de soportar, además de su peso propio, el peso del hormigón que será vertido en su interior y, posteriormente, colaborará, trabajando ya como sección mixta, en la resistencia del arco frente a las compresiones y flexiones producidas por las restantes cargas permanentes y sobrecargas.



Fig. 8

La solución expuesta tiene como claro precedente la cimbra autoportante del viaducto del Esla (fig. 8), si bien en nuestro caso la carcasa, además de asumir la función de cimbra autoportante, amplía su cometido constituyendo el encofrado del hormigón del arco.

Otras ventajas de esta solución mixta son:

- la excelente calidad de los acabados; los paramentos vistos presentan una total homogeneidad en su textura y color.
- el reducido peso propio de la carcasa metálica, del orden de 18 a 20 kN/m, que permite segmentarla en trozos muy manejables aunque se adopten para ellos las máximas longitudes, compatibles con el transporte desde el taller a la obra.
- la facilidad de colocación de la armadura pasiva; la ferralla se monta en cada uno de los segmentos, en que se ha dividido el arco, previamente a su colocación en la posición definitiva.

Por el contrario una desventaja, respecto al arco de hormigón, es la necesidad de unas labores de conservación. No obstante, la utilización de aceros autopatinables, cuando así se desee y sea posible, o la protección mediante pinturas anticorrosión, que en la actualidad están garantizadas por encima de los quince años de duración, reducen al mínimo este problema.

Los procesos constructivos admiten diversas variantes, facilitadas todas ellas por los reducidos pesos que se manejan hasta la formalización del arco, lo que permite abordar su ejecución con medios auxiliares y equipos muy ligeros.

El arco puede construirse independientemente del tablero o simultánea y conjuntamente con la totalidad o parte de éste.



Fig. 9

El arco de Tamaraceite es un ejemplo del primer caso. La carcasa metálica del arco se montó, por segmentos, con ayuda de unas torres de atirantamiento (fig. 7), estabilizadas con cables de retenida anclados a los estribos. El hormigonado del arco se realizó, simétricamente, desde arranques hasta clave. El tablero, de hormigón pretensado, se construyó sobre el

terreno, dividido en dovelas de 18,50 m de longitud y aproximadamente 650 Tn de peso, situadas, cada una en la vertical de su posición definitiva (fig. 9).

Posteriormente las dovelas fueron izadas, mediante gatos apoyados en el arco, sustituyendo, una vez alcanzada la cota teórica, los tirantes de izado por las péndolas definitivas. La suspensión de las dovelas se efectuó de forma simétrica y en el orden más favorable para el arco (fig. 10 y 11). Una vez ajustada geoméricamente la rasante se realizaron los cierres entre dovelas y el postesado longitudinal de continuidad.

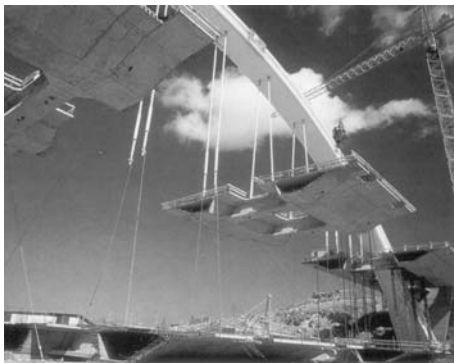


Fig. 10

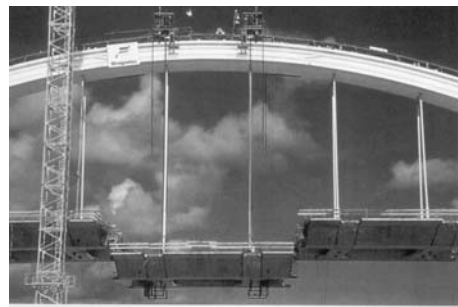


Fig. 11

El proceso constructivo de Tamaraceite es aconsejable cuando existen unas condiciones locales: topografía suave, fácil accesibilidad, altura de rasante sobre terreno reducida..., que permiten una fácil ejecución del tablero sin requerir, en esta fase, la ayuda del arco como estructura portante.

Como alternativas al proceso descrito se pueden plantear, en estas condiciones, la utilización de castilletes de cimbra para el montaje del arco, en sustitución de los atirantamientos provisionales y el cimbrado completo o por fases del tablero. El cimbrado completo del tablero no es competitivo económicamente, respecto al proceso seleccionado, por el volumen de cimbra requerido, mientras que si se realiza por fases, la simetría necesaria en la aplicación de las cargas al arco, obliga a duplicar los equipos de cimbra y encofrado para avanzar simultáneamente desde los extremos hacia el centro. Aún así las flexiones producidas en el arco son superiores a las creadas con el izado.

El **arco de Onteniente** responde al esquema estructural representado en la fig. 2 y es un claro ejemplo de la incidencia del proceso constructivo en la selección de la tipología de la estructura y de los materiales utilizados. Las características de su

emplazamiento son muy diferentes a las del arco anterior; la orografía es abrupta y la rasante está a una altura importante sobre el terreno (fig. 4). Consecuentemente el proceso constructivo difiere notablemente del utilizado en Tamaraceite y, en cierta forma, sirve de perfecto contrapunto para completar la exposición de los métodos de construcción que, a nuestro juicio, representan las tendencias actuales.

Las condiciones locales descritas aconsejan, en este caso, una construcción conjunta de tablero y arco o, por lo menos, de una parte del arco y otra parte del tablero, de manera que, una vez formalizado el arco, sirva cada una de ellas de base y apoyo para completar, en fases posteriores, ambos elementos.

Por esta razón se ha concebido una solución mixta, tanto para el arco como para el tablero, en la que las partes metálicas están situadas en la carcasa del arco y en el núcleo central del tablero, en el mismo plano vertical, arriostradas ambas por las péndolas de conexión de ambos elementos. Solamente estas secciones metálicas y las péndolas de suspensión están presentes en las fases constructivas previas al cierre del arco, con lo que los pesos que deben ser soportados por los medios auxiliares, propios de estas fases, son muy reducidos (aproximadamente 2,25 tn/m).

El proceso constructivo definido en el proyecto (fig. 12), no preveía apoyos en el valle, para minimizar el impacto ambiental en la vegetación de la ladera, avanzando en voladizo, arco, tablero y péndolas, con ayuda de unos atirantamientos soportados por unas torres metálicas estabilizadas mediante cables de retenida anclados en los contrapesos de los estribos.

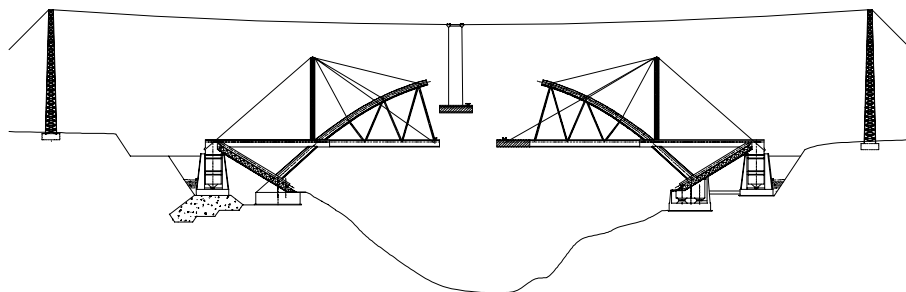


Fig. 12

En estas condiciones de ejecución, las péndolas verticales flexibles que se dispusieron en Tamaraceite, que son el sistema de suspensión normalmente utilizado, necesitaban unos puntales provisionales inclinados, de refuerzo, que rigidizasen la estructura volada. Ante este hecho, se optó por disponer, desde un principio, un sistema definitivo de suspensión constituido por unas péndolas rígidas inclinadas de acero estructural y sección tubular, que conforman, con el arco y el tablero, una celosía triangulada; de esta manera se satisfacen los requisitos exigidos por el proceso constructivo a la vez que se reducen importantemente las flexiones en el arco, tanto en fases de construcción como de servicio, como queda de manifiesto en las cuantías de armadura pasiva facilitadas en los cuadros-resumen del apartado final del artículo.

El proceso de montaje de la estructura metálica fue modificado en obra, adoptando una alternativa consistente en el apeo, de arco y tablero, mediante cuatro castilletes dobles de cimbra, muy ligeros, arriostrados y venteados (fig. 13), sobre los



Fig. 13

que se colocaron los segmentos del núcleo central metálico del tablero (fig. 14) y de la carcasa metálica del arco (fig. 15).



Fig. 14



Fig. 15

Una vez completada la estructura metálica (fig. 16) se procedió al hormigonado interior del arco avanzando simétricamente desde ambos laterales hacia la clave, adecuando el rendimiento para evitar presiones excesivas del hormigón fresco.



Fig. 16

Posteriormente se ejecutó, por dovelas, la zona central de la sección del tablero mediante encofrados móviles apoyados en el núcleo metálico del mismo (fig. 17). Con cierto decalaje se construyeron los voladizos laterales que completan la sección, todo ello avanzando de forma simétrica y simultánea desde los extremos hacia el centro del puente (fig. 18). Entre las células laterales y el tablero mixto se dejaron unas juntas sin hormigonar para proceder, una vez completado el tablero, a la

realización de un cierre elástico del arco para relajar las leyes de esfuerzos de la estructura, reduciendo las tensiones y deformaciones producidas, hasta ese momento, por el proceso constructivo. Este cierre se efectuó mediante gatos, desde el apoyo móvil del arco.



Fig. 17



Fig. 18

Dado que se trata de un arco atirantado, durante las fases de hormigonado del tablero se fue introduciendo, por etapas, el pretensado longitudinal exterior, dispuesto dentro del núcleo metálico del tablero, para absorber las tracciones producidas en él al trabajar como tirante del arco. Análogamente se fueron tesando los cables verticales de conexión entre los extremos del tablero y los contrapesos de los estribos.

Como reflexión final de este apartado, creo que a esta evolución de las tipologías y procesos constructivos de los arcos, que he comentado, ha contribuido también el hecho de que los propios proyectistas hemos evolucionado en los últimos años, eliminando esa barrera imaginaria que nos dividía en dos grupos: “los del hormigón” y “los del acero”, decidiéndonos a utilizar, con naturalidad, ambos materiales, por separado o mezclados, en función de los requisitos estructurales de cada elemento y de su proceso de ejecución.

Datos técnicos y económicos

Expongo a continuación, en forma muy resumida, las características, cuantías y costes de las dos obras que han servido de referencia a todos los comentarios vertidos en este artículo.



Características	Arco de Tamaraceite	Arco de Onteniente
Esquema estático	Arco mixto. Tablero intermedio. Empotrado en el terreno. Péndolas tirantes de acero activo	Arco mixto. Tablero intermedio. Atirantado por el tablero. Células triangulares de compensación. Péndolas metálicas tubulares
Luz entre apoyos	162 m	140 m
Flecha	41 m	35 m
Canto arco	2,75 a 4,0 m	1,80 a 2,55 m
Anchura arco	3,60 m s/tablero 6,50 m b/tablero	3,0 m s/tablero 6,0 m b/tablero
Tablero	Hormigón pretensado	Acero+hormigón pretensado
Longitud total	212 m	190 m
Anchura plataforma	30 m	26 m

MATERIALES UTILIZADOS cuantías por m ² de tablero		ARCO DE TAMARACEITE	ARCO DE ONTENIENTE
ELEMENTO	MATERIAL		
ARCO	Hormigón H-300	0,18 m3	0,16 m3
	Acero estructural	65 Kg	54 Kg
	Acero pasivo	40 Kg	16 Kg
PENDOLAS	Acero estructural	--	14,5 Kg
	Acero activo	2,20 Kg	--
TABLERO	Hormigón H-350	0,47 m3	0,64 m3
	Acero activo	22 Kg	32 Kg
	Acero pasivo	76 Kg	73 Kg
	Acero estructural	--	33 Kg
COSTE PARA LA ADMINISTRACION por m ² de tablero		146.000 Pts.	181.000 Pts.

Dos conclusiones finales surgen de este análisis comparativo entre las dos estructuras.

La primera es que los arcos son económicamente competitivos, si se resuelve adecuadamente su proceso constructivo. El coste por metro cuadrado de tablero de ambas estructuras es parecido o incluso ligeramente inferior al que manejamos para otras tipologías, teniendo en cuenta la importancia de la luz que salvan.

La segunda conclusión es que contar con un buen terreno de cimentación que soporte los empujes inclinados del arco, sin necesidad de atirantamiento a través del tablero, redundará en un significativo ahorro, que, en el caso del arco de Onteniente, hubiera podido ser aproximadamente de un 15% porque, citando nuevamente un texto de Eduardo Torroja, “...*el arco juega con truco; escamotea parte de las funciones estructurales, pasándolas a otro elemento externo a la estructura propiamente dicha y existente con anterioridad, cual es el terreno*” y, como este elemento es gratis, la economía es evidente.