

Puentes arco de hormigón

Consideraciones sobre la construcción por avance en voladizo

Concrete Arch bridges. Considerations on cantilevered advance

Ricardo Llago Acero. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Director de Departamento. Proyectos de Estructuras Metálicas. ACCIONA Infraestructuras, S.A. rlagoa@acciona.es

Resumen: Conocidos desde la antigüedad, los puentes arco han ofrecido siempre una solución estructural interesante y universalmente aceptada. Esta tipología, empleando en su ejecución el acero estructural o el hormigón armado, ha sido utilizada habitualmente en las localizaciones más espectaculares. Tras ser considerada durante mucho tiempo como una estructura de ejecución costosa y complicada, la aplicación de los métodos de construcción por avance en voladizo y el empleo cada vez más frecuente de los sistemas de instrumentación, han logrado que los arcos de hormigón armado sean recuperados en los últimos tiempos en puentes de gran luz, adornando nuestros paisajes con su serenidad.

Palabras Clave: Puentes arco, Voladizo, Construcción

Abstract: Arch bridges have been around since ancient times and have always offered an interesting and universally accepted structural solution. This type of bridge, using structural steel or reinforced concrete, is commonly employed in the most spectacular settings. For many years this type of bridge was considered to be too expensive and complicated, but with the application of cantilevered launch construction methods and the increasing deployment of instrumentation systems, reinforced concrete arches have been more widely employed in recent times in large span bridges and leave an indelible and serene mark on the landscape.

Keywords: Arch bridge, Cantilever, Construction

Introducción

Los procesos constructivos por avance en voladizo han permitido recuperar, en el caso de los puentes arco de gran luz, una solución estructural conocida desde siempre. Definida en el puente de Alcántara por sus constructores como "*Ars ubi materia vincitur ipsa sua*" ("Arte mediante el cual la materia se vence a sí misma"), fue prácticamente abandonada durante un tiempo por las dificultades técnicas inherentes a su proceso constructivo y los altos costes asociados al mismo. La presencia de materiales con mayores características mecánicas, el desarrollo de medios auxiliares más flexibles y la aparición de elementos de control más fiables y precisos han logrado recuperar esta tipología, aumentando las realizaciones en nuestro país desde comienzos de la década de los noventa.

El método tradicional de construcción de los puentes arco de hormigón se basó, durante mucho tiempo, en el

empleo de cimbras que, al crecer la luz del arco, se convirtieron en verdaderos logros de ingeniería en sí mismas, costosas y con importantes dificultades técnicas en su diseño y ejecución. Desde finales del siglo XIX, los constructores de puentes arco, conscientes de las dificultades técnicas y económicas de esta tipología, encaminaron sus esfuerzos a la búsqueda de métodos constructivos que permitieran la supresión de las cimbras, cuyo montaje y coste penalizaba de tal forma la construcción que esta tipología estuvo a punto de desaparecer entre las soluciones de lo que podrían llamarse "puentes modernos". Pero tal vez en esa debilidad se hallaba su fortaleza, y los problemas que conducían a su extinción fueron los que obligaron a buscar nuevas soluciones que los revitalizaran. Inicialmente se investigaron métodos que abarataran y simplificaran el montaje de las cimbras y, después, se aplicaron estos métodos a la construcción del propio arco.

Grandes ingenieros dedicaron importantes esfuerzos a desarrollar soluciones técnicas que permitieran solven-

tar los problemas constructivos que plantea esta tipología. Entre ellos puede citarse a J. Melan, E. Freyssinet, E. Torroja, R. Coray y tantos otros. Pero no fue hasta 1.952 en que Eugène Freyssinet abrió el campo de los métodos constructivos en voladizo a los arcos de hormigón, al emplear en los puentes de la autopista Caracas – La Guaira (Venezuela) los procedimientos utilizados en los arcos de acero por G. Eiffel y James B. Eads a finales del XIX. Actualmente los métodos de avance en voladizo son prácticamente los únicos empleados en la construcción de arcos con luces importantes.

El artículo pretende, tras un breve repaso de los aspectos técnicos de la construcción de puentes arco de hormigón, presentar los problemas específicos detectados en la actualidad, indicando la forma en que han sido resueltos en dos casos particulares construidos por ACCIONA Infraestructuras, S.A.

1. Aspectos resistentes del arco en construcción

El arco es un sistema estructural que, gracias a su forma, salva una determinada luz, resistiendo los esfuerzos debidos a las cargas que actúan sobre él mediante un mecanismo estructural donde predominan las compresiones, evitando los esfuerzos de flexión o reduciéndolos a valores poco significativos en su comportamiento. Durante toda la historia de la construcción ha sido, y sigue siéndolo hoy en día, la estructura resistente por excelencia, donde su capacidad portante se debe a su forma o, lo que es lo mismo, es su geometría la que le proporciona su resistencia. Es esta circunstancia la que explica por qué su construcción se plantea partiendo de la idea de un comportamiento resistente.

El problema fundamental de los grandes arcos de hormigón, al igual que el de los metálicos, ha sido siempre su construcción. En los primeros el problema es aún más complejo, puesto que su peso es mayor. Como es sabido, el arco no funciona como tal hasta que no se ha completado su geometría, es decir, hasta que no se produce su cierre en clave, y por ello las diferentes configuraciones estructurales por las que atraviesa durante su construcción son diferentes en su comportamiento a la situación final, algo comprendido desde siempre, como puede resumirse en la definición dada por Leonardo da Vinci del arco: *"Es una fortaleza causada por dos debilidades"*. Es por ello que se requieren medios de construcción de una mayor envergadura que en otras tipologías estructurales. Durante un tiempo el coste de estos procesos hizo que los grandes arcos de hormigón fueran prácticamente abandonados hasta que se desarrollaron nuevos métodos constructivos que solucionaron los problemas de la "debilidad" de las estructuras parciales por las

que atraviesa hasta completarse. La cimbra, el único procedimiento que se empleaba en los arcos de gran luz, resultaba excesivamente caro. Pero los nuevos métodos que evitan su presencia los han revitalizado, y gracias a ello han vuelto a convertirse en una solución con gran interés estructural, cuando la forma del valle y las condiciones de cimentación resultan idóneas.

Como ya hemos indicado, el arco es una estructura que resiste las cargas aplicadas por forma, y ésta, y por tanto su comportamiento estructural, solo se desarrolla cuando se encuentra terminado. He aquí la razón de que la mayor dificultad de los grandes arcos haya sido siempre su construcción. En cualquier procedimiento que se emplee para su ejecución, las estructuras parciales que se van formando nunca pueden ser arcos. Tendrán que desarrollar otro comportamiento estructural diferente, mucho menos eficaz. Tal vez fue esta idea la que impulsó los primeros métodos empleados, los "métodos clásicos", donde su ejecución se realiza mediante la construcción de un arco previo, es decir, la cimbra o la autocimbra. Su ventaja se encuentra en que su ejecución es más sencilla que la del arco definitivo, puesto que su peso es menor.

Los diferentes comportamientos entre las estructuras parciales y la final obligan a la utilización de medios potentes para conseguir que los estados intermedios, diferentes al final, desarrollen un comportamiento estructural eficaz. Estos medios suponen una parte significativa del coste total de la obra, y ello podría hacer inviable en algunos casos la solución arco para las grandes luces, como de hecho ocurrió en ciertos períodos.

2. Procedimientos de construcción de puentes arco de hormigón

Si en cualquier estructura con luces importantes el método de ejecución puede condicionar su tipología, sus dimensiones y, a veces, su diseño global, en un puente arco, construido necesariamente de forma evolutiva, resulta más cierto aún. La elección de este proceso desde el momento del diseño, considerando todos los condicionantes, podría introducir grandes economías, reforzando la viabilidad de la solución. Presentaremos, a continuación, los métodos constructivos disponibles hoy en día para la ejecución de arcos de hormigón.

2.1. Construcción sobre cimbra

La construcción sobre cimbra fue el procedimiento habitual hasta finales del XIX, y podría ser considerado, en el caso de los puentes arco de hormigón, como el "método clásico". Durante mucho tiempo la ejecución de los puentes arco de hormigón empleó cimbras fijas

para el hormigonado de sus secciones. Las luces cada vez mayores, los obstáculos naturales complicados, como barrancos profundos y ríos caudalosos, fueron dificultando cada vez más el diseño y el montaje de estos elementos, encareciendo enormemente el proceso de ejecución, lo que hizo que los arcos pasaran a convertirse en una solución excepcional. Muchos de los procedimientos que se emplearon en el montaje de estos elementos auxiliares fueron utilizados posteriormente en la construcción de los arcos, bien de acero, bien de hormigón.

En principio, a la vista de los métodos actuales, el empleo de las grandes cimbras empleadas en el XIX era un absurdo. Era preciso construir previamente un arco de madera, a veces con la misma luz que el puente definitivo, para ejecutar sobre él otro de hormigón. La única ventaja se encontraba en que el arco de madera era más ligero, y por tanto más fácil de montar. Sin embargo, era preciso construir dos veces la misma obra, aunque con diferentes materiales. Algo similar a lo que ocurre con el procedimiento de autocimbra desarrollado por J. Melan.

Además de su elevado coste, equivalente al del propio puente, lo que lo convertía en algo inviable económicamente, las grandes cimbras presentaban otros problemas importantes. Su descenso para proceder a la puesta en carga del arco era cada vez más complicado, y no resultaba fácil asegurar que éste no quedara irregularmente apoyado en ella, introduciendo esfuerzos de flexión indeseables. Fue Eugène Freyssinet quien logró descimbrar el puente de Veudre introduciendo gatos en clave, logrando que, al abrirlos, se produjera una deformación que separara el arco de la cimbra de una manera uniforme, alejando los riesgos de las flexiones parásitas. Desde entonces este procedimiento ha sido empleado para descimbrar los arcos construidos sobre cimbras, introduciendo gatos en clave, en arranques o en riñones.

Ingenieros como Richard Coray se especializaron en el diseño y construcción de estos elementos auxiliares, mezcla de madera y metal y, a veces, verdaderamente más atrevidos y desafiantes que la estructura definitiva a la que proporcionaban soporte temporal. Recordemos aquí la cimbra flotante diseñada por Eugène Freyssinet para la construcción de los tres arcos del Viaducto de Plougastel, quizá una de las soluciones más brillantes de este método de construcción.

Los costes de estos elementos llegaron a convertirse en prohibitivos, así como su incidencia en los plazos precisos para la ejecución del propio puente, totalmente dependiente de la construcción previa de estos medios auxiliares. Quedaron, pues, asociados a los puentes arco de pequeña luz, donde otros métodos no resultaban adecuados. Era necesario, por tanto, desarrollar otras solucio-

nes constructivas para evitar la desaparición de esta tipología en las grandes luces.

Aunque la propia construcción del arco sobre cimbra es un método sencillo y cómodo una vez ejecutada ésta, sus elevados costes han hecho abandonarla en las grandes luces, aunque aún se conserva en otras tipologías.

2.2. Construcción con armadura rígida (Autocimbra)

El coste y la dificultad que suponía la ejecución de la cimbra en los grandes arcos ha estado siempre presente en la mente de los constructores, por lo que muchos de sus esfuerzos se encaminaron a la supresión de la misma. A finales del siglo XIX, Joseph Melan desarrolla un procedimiento para la construcción de puentes arco de hormigón evitando el uso de la cimbra clásica. Su método consiste en construir primero un arco metálico, más ligero, que se emplea como cimbra autoportante y se utiliza, a la vez, como armadura del arco definitivo, hormigonando sus secciones sobre la estructura metálica. En realidad, la solución de J. Melan transfiere los problemas de construcción de un arco más pesado, el de hormigón, a uno más ligero, el de acero, empleando en su montaje los procedimientos disponibles en la época para la construcción de arcos metálicos, tales como el avance por voladizos sucesivos mediante atirantamiento provisional.

Este método logra que la estructura parcial y final coincidan en su comportamiento, aunque no resuelve los problemas económicos de la construcción de los arcos de hormigón. Su inconveniente se encuentra en la cantidad de acero que requiere el arco metálico inicial, muy superior a la armadura precisa para resistir las tracciones debidas a la flexión. Por esta razón puede considerarse un método caro, y aunque en su momento fue utilizado en algunos puentes, hoy en día apenas se emplea, salvo en raras ocasiones. Hay que destacar la contribución que Eduardo Torroja realizó a este método en el Viaducto de Martín Gil, sobre el embalse del Esla, finalizado en 1.942. Un detallado estudio de las fases de hormigonado, así como la regulación con cilindros hidráulicos optimizó enormemente el acero preciso en la autocimbra.

Aunque su aplicación como fue concebida por Joseph Melan ha caído en desuso, debemos destacar la construcción por este método del arco Wanxian, sobre el río Yangtze, en China. Actualmente es el mayor arco de hormigón ejecutado, con una luz de 420 metros.

Quizá el futuro de la aplicación de este procedimiento se encuentre en los arcos mixtos acero-hormigón, con algunas realizaciones importantes en nuestro país. En este caso podríamos considerar su sección metálica como una evolución de la solución de autocimbra desarrollada por Melan.

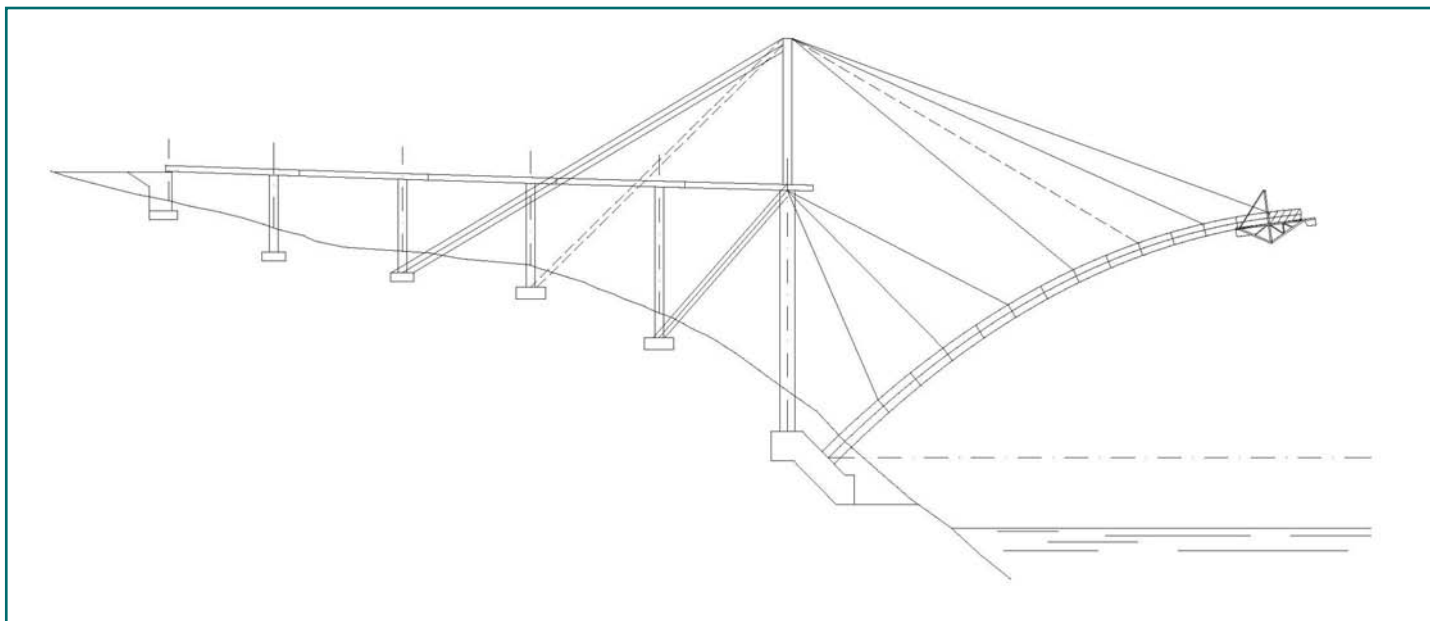


Fig. 1.
Construcción
del semiarco
por voladizo
atirantado.

2.3. Construcción por voladizos sucesivos atirantados

El procedimiento de construcción de avance por voladizos sucesivos atirantados es el primer método que realmente permitió suprimir la cimbra en la construcción de los arcos de hormigón. El método se basa en el atirantamiento de las secciones hormigonadas desde una torre provisional, y su desarrollo ha sido el que ha permitido el renacimiento de esta tipología desde mediados de la década de los 50. En este procedimiento las estructuras parciales por las que atraviesa el arco en construcción nada tienen que ver con la estructura final, siendo preciso, por tanto, un sistema de atirantamiento auxiliar.

Este método de ejecución era conocido y empleado en el montaje de las cimbras, aunque realmente no se aplicó a la construcción de un arco propiamente dicho hasta finales del XIX, cuando James B. Eads lo empleó para construir el puente metálico de San Luis, sobre el río Mississippi, donde utilizó atirantamientos provisionales hasta cerrar los voladizos. Gustave Eiffel empleó igualmente este procedimiento en la construcción de los puentes arco metálicos de María Pía y Garabit.

Sin embargo, aunque era conocido en el caso de los arcos metálicos, no fue hasta 1.952 en que se emplea este procedimiento para la construcción de puentes arco de hormigón, cuando Eugène Freyssinet lo plantea en los viaductos de la autopista Caracas – La Guaira (Venezuela). En los tres arcos de 152, 146 y 138 metros de luz se sentaron las bases para el inicio del procedimiento de avance en voladizos sucesivos atirantados en los arcos de hormigón. Sin embargo, Freyssinet empleó este método de

forma parcial, únicamente en los arranques de los arcos. El resto se hormigonó sobre una cimbra metálica apoyada en los voladizos atirantados ya construidos. Al igual que los voladizos, la cimbra se atirantaba desde las pilas extremas.

Una característica habitual de este procedimiento es la construcción del arco exento, es decir, eliminando las pilas del proceso, puesto que no desarrollan ninguna función resistente y representan una fracción importante del peso de la estructura, además de crear importantes interferencias al paso de los tirantes. Una vez cerrado el arco se procede a la ejecución de las pilas y el tablero por métodos convencionales.

2.4. Construcción por voladizos sucesivos con diagonales temporales (Ménsula triangulada)

Se trata de una variante del sistema de avance en voladizo atirantado, aunque en este caso se logra una estructura de tipo triangulado, una celosía tipo Pratt de gran canto, muy rígida y de gran eficacia estructural, cuyo empotramiento se consigue anclando el cordón de tracción al terreno.

Este método crea una estructura triangulada avanzando en ménsula desde los arranques del arco. Para resistir la tracción debida a la flexión en los arranques por el trabajo en voladizo, hasta que se produce el cierre en clave, es necesario anclar el cordón superior mediante un sistema de retenidas, transmitiendo así la tracción generada al terreno. Una vez cerrada la clave se liberan los anclajes de retenida y se suprime la triangulación provisional.

En este procedimiento el arco funciona como cordón comprimido, las pilas como montantes de la celosía y las diagonales temporales desempeñan el papel de las diagonales de tracción. Para el cordón superior, como veremos posteriormente, puede emplearse el propio tablero, o, incluso, emplear un cordón superior provisional, como se ha hecho en el Viaducto sobre el río Almonte (Cáceres), o como se ejecutó el puente Krk, en 1979, en la antigua Yugoslavia, con una luz de 390 metros. La triangulación se completa en este caso con el semiarco, las pilas definitivas del tablero y tirantes provisionales para las diagonales temporales. Una vez cerrado el arco se desmontan las retenidas, las diagonales temporales y el cordón superior, y se construye el tablero sobre el arco completo. Es frecuente la disposición de tirantes intermedios auxiliares, de menor entidad que las diagonales temporales, hasta completar el recuadro entre cada dos montantes, retirándose estos elementos al completar el recuadro y disponer las diagonales temporales.

2.5. Construcción por abatimiento (Giro de los semiarcos)

Pese a que este método ya había sido utilizado en el montaje de las cimbras de madera, no se empleó en la construcción de arcos de hormigón hasta mediados de la década de los 50, cuando Ricardo Morandi lo plantea en la construcción de varios puentes.

En líneas generales, el procedimiento consiste en la construcción vertical de los semiarcos, y una vez terminados, abatirlos mediante un giro alrededor de su extre-

Fig. 2. Proceso de abatimiento de los semiarcos.



mo inferior. Posteriormente, y una vez situados en su posición, se procede al cierre en clave. Para la realización de este giro es necesario desplazar inicialmente el conjunto mediante cilindros hidráulicos dispuestos horizontalmente, hasta que el peso del semiarco actúa a favor, creando un efecto de desequilibrio que facilita el proceso, momento a partir del cual resulta preciso el empleo de retenidas para lograr un descenso controlado del conjunto.

Aunque este procedimiento se ha utilizado en la construcción de arcos de hormigón, las grandes cargas que deben movilizarse precisan importantes retenidas y rótulas de giro, lo que la convierte en una solución difícilmente competitiva en las grandes luces. No ocurre así en el caso de estructuras más ligeras, como es el caso de los arcos metálicos.

No debemos olvidar que, en su descenso, cada uno de los semiarcos, quedará sometido a esfuerzos de flexión, crecientes al incrementar su proyección horizontal, por lo que aparecerán puntos de retenida importantes en posiciones intermedias que, en su posición final, previa al cierre, se asimilarán enormemente en su consumo de acero a los métodos de avance en voladizo atirantados.

3. Planteamiento constructivo de un sistema de ménsula triangulada con diagonales temporales

Frente a los procedimientos de atirantamiento desde mástiles provisionales, los sistemas de avance en ménsula triangulada con diagonales temporales poseen la ventaja de una mayor rigidez interna, al emplear tirantes de menor longitud, mucho más fáciles de colocar, más rígidos y menos sensibles a los efectos térmicos. Sin embargo, desde el punto de vista de la ejecución del arco propiamente dicho, los sistemas con diagonales temporales presentan la desventaja de algunos tiempos muertos en el ciclo de ejecución de las dovelas del arco, puesto que al alcanzar la posición de las pilas es preciso detener el avance para proceder a su hormigonado y al del tablero, al contar con ellos como elementos imprescindibles en la triangulación. Si el método empleado es el avance desde mástiles atirantados, el arco progresa sin paradas hasta producirse el cierre, debiendo ejecutarse posteriormente las pilas sobre el arco ya cerrado antes de proceder a la construcción del tablero.

3.1. Variantes del sistema

Dependiendo de las características del puente arco, es decir, de la longitud de sus vanos de acceso, de la existencia o no de calzadas desdobladas, de su luz,..., el sistema de ménsula triangulada con diagonales tempo-



Fig. 3. Empleo del tablero como cordón de tracción. A la derecha, fig. 4. Empleo de cordón de tracción temporal.



rales podría plantearse, desde un punto de vista constructivo, a través de dos variantes diferentes:

a) Empleo del tablero como cordón de tracción. En este caso se produce el avance en voladizo del conjunto arco-pilas-tablero. Esta opción posee la ventaja de no incluir un nuevo elemento auxiliar en el proceso constructivo, aunque si el material empleado en el tablero es el hormigón será preciso disponer un cierto pretensado adicional durante el proceso de construcción, llevando los esfuerzos de tracción hasta los estribos o tirantes de retenida, donde se producirá el anclaje al terreno. Presenta la ventaja de crear un fácil camino de acceso de los materiales al frente de trabajo, aunque en luces importantes el peso del tablero y cimbras podrían penalizar de una forma importante el comportamiento del sistema en fases avanzadas de construcción. Estas circunstancias podrían aconsejar el empleo de soluciones mixtas acero-hormigón, mucho más ligeras, y que presentan la ventaja adicional de poder emplear la parte metálica del tablero como elemento de tracción.

El proceso introduce tiempos muertos en el ciclo de construcción de las dovelas del arco debido a la necesidad de disponer u hormigonar nuevos tramos del tablero, más pesados o de ejecución más complicada que los elementos empleados en cordones superiores de tipo provisional.

Esta solución fue empleada, como veremos posteriormente, en la ejecución del Viaducto de la Peña, en la Variante Este de Bilbao (Vizcaya).

b) Empleo de cordones de tracción temporales. Esta variante del procedimiento logra independizar la eje-

cución del arco del resto del puente cuando los tramos de acceso tienen una longitud importante frente al puente arco propiamente dicho. Este método permite comenzar los trabajos en el arco sin necesidad de disponer del tablero, el cual puede ejecutarse en los vanos de acceso al mismo tiempo. Es igualmente aplicable en situaciones de calzadas desdobladas con arcos gemelos, donde permite la reutilización de los medios auxiliares empleados. Por otra parte reduce los esfuerzos que deberá soportar la ménsula triangulada, al disminuir las cargas presentes frente a las de un tablero de tipo convencional.

En esta opción, con vanos de acceso de longitud importante, el sistema de retenida no se lleva hasta los estribos, sino que se ancla al terreno en posiciones intermedias de las pilas de los vanos de acceso. Como veremos posteriormente, este sistema permite el empuje del tablero sobre el arco.

Esta variante ha sido la adoptada en la ejecución del Viaducto sobre el río Almonte, en la Autovía de la Plata (Cáceres).

3.2. Sistema de triangulación provisional

El objetivo del sistema de triangulación es transformar las cargas actuantes en el voladizo en una serie de esfuerzos axiales de tracción y compresión, eliminando, en la medida de lo posible, las flexiones en los semiarcos. En realidad, el cordón inferior formado por las secciones del arco se encuentra sometido a importantes cargas de peso propio, dando lugar a esfuerzos locales de flexión que precisan ser controlados para mantenerlos dentro de límites aceptables.

Puesto que el arco se emplea como cordón comprimido de la celosía y las pilas como montantes, el sistema de triangulación provisional deberá proporcionar aquellos elementos inexistentes en la celosía, por lo que se encuentra formado generalmente por los siguientes elementos auxiliares:

- Tirantes de retenida.
- Tirantes provisionales de recuadro abierto.
- Diagonales temporales.
- Cordón superior auxiliar.

La misión de los **tirantes de retenida** es transmitir los esfuerzos de tracción que se generan en el cordón superior hasta los anclajes al terreno. Suelen situarse partiendo de alguna de las pilas de los tramos de acceso, aunque a veces no existen como tales, sino que la tracción se ancla en los estribos y éstos directamente al terreno. Los tirantes de retenida suelen resolverse mediante cables de alto límite elástico, siendo elementos de tipo activo sobre los que se actúa en diferentes fases del proceso de avance para recoger las deformaciones del voladizo triangulado.

Los **tirantes provisionales de recuadro abierto** son diagonales auxiliares, de menor importancia que las diagonales temporales que triangulan el recuadro, y que se eliminan al final de la ejecución de éste, cuando se procede a la instalación de las diagonales temporales. Su misión es reducir los esfuerzos de flexión en las secciones del arco durante el avance, mientras se completa un módulo de la triangulación. Dependiendo del peso de la dovela y del carro empleado suelen disponerse en cada dovela o cada dos dovelas. Debido a su capacidad reducida suelen emplearse para estos elementos barras de pretensado o cables de alto límite elástico.

Las **diagonales temporales** son un elemento fundamental en el comportamiento del voladizo triangulado. Se disponen al finalizar un nuevo recuadro y antes de proceder al hormigonado de una nueva pila, permitiendo en ese momento la retirada de los tirantes provisionales empleados hasta ese momento. Para su diseño se emplean tirantes formados por cables de alto límite elástico o perfiles laminados, como se verá más tarde. Son elementos que precisan una regulación activa en determinadas fases del proceso, puesto que, al no ser elementos inextensibles, la distancia entre los nudos de la estructura aumentará, creciendo los esfuerzos de flexión en el arco.

El **cordón superior auxiliar** es un elemento que no siempre aparece en este método de construcción. Si la opción elegida es el avance arco-pilas-tablero es éste último el que desempeña esta misión. El diseño de esta estructura metálica debe considerar la vinculación elegida



Fig. 5. Sistema de triangulación temporal.

en la coronación de las pilas del arco, así como sistemas sencillos y fiables para la unión entre los tramos y los tirantes provisionales o diagonales temporales.

Debido a la existencia de contraflechas, deformaciones del conjunto y a las diferentes tolerancias de ejecución entre las estructuras de acero y hormigón, es preciso dotar a todos estos elementos de las holguras adecuadas que permitan su fácil montaje y un correcto funcionamiento.

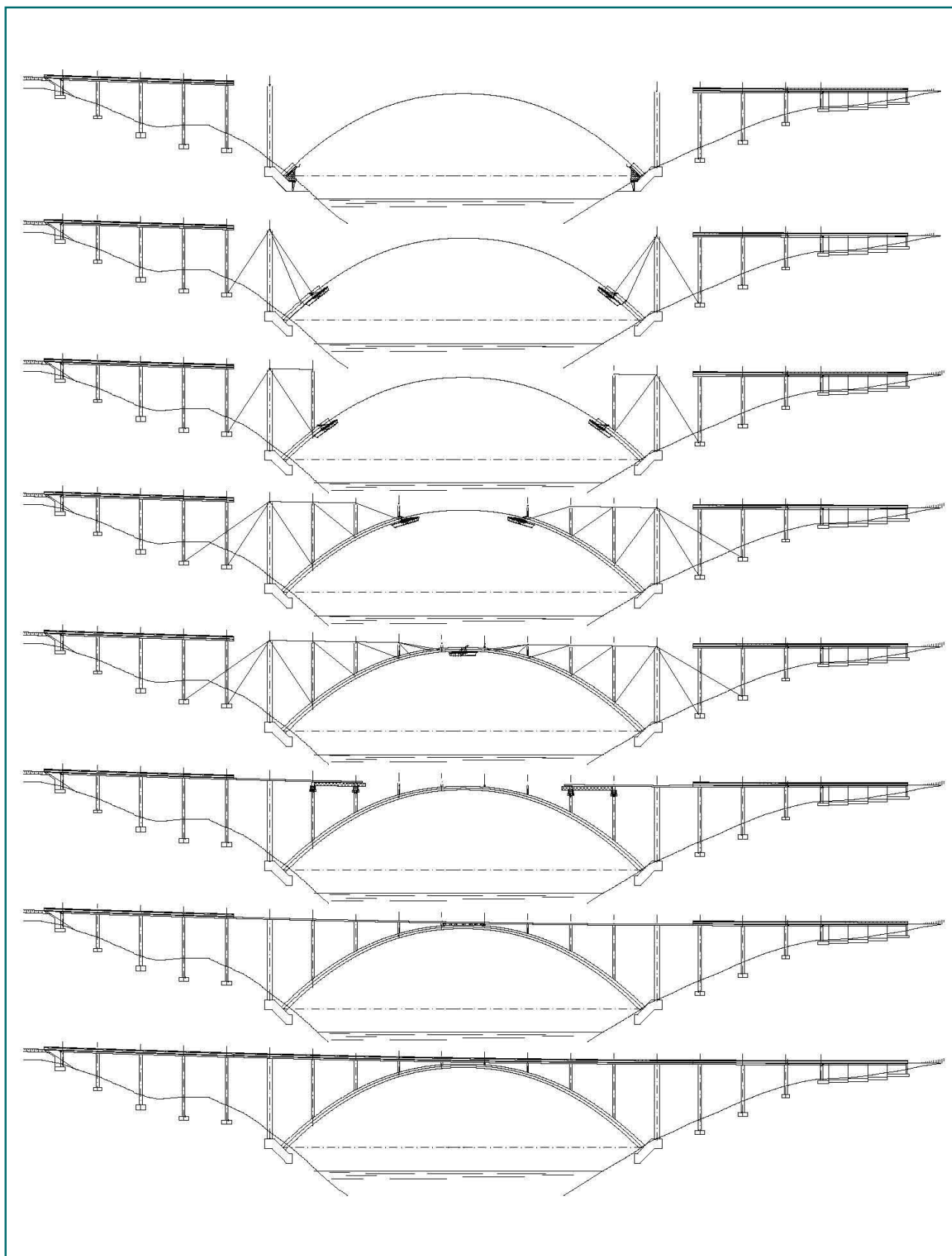
3.3. Proceso constructivo

A continuación describiremos aquellas fases de construcción específicas de este proceso, no considerándose aquí otros procedimientos más conocidos como puedan ser las excavaciones y ejecución de cimentaciones, ejecución de estribos y pilas, etc.

La construcción del arco comienza con el hormigonado de la dovela de arranque sobre cimbra convencional, al no resultar posible el montaje de los carros sin la presencia de este elemento. Sobre estas dovelas se realiza el montaje completo de los carros de avance, procediéndose a la ejecución de la primera dovela del arco. La longitud típica de estos elementos se encuentra habitualmente en el entorno de los 5 a 6 metros.

Finalizado el hormigonado de la dovela, el carro avanza a la siguiente posición, donde se procede a su nivelación y reglaje, incluyendo las contraflechas de ejecución previstas, suma de las propias del arco y del carro. Si es necesario se procederá igualmente al montaje y tesaado de los tirantes provisionales. Estos elementos, dependiendo del peso de la dovela y de los carros empleados, suelen disponerse en cada dovela, o cada dos dovelas,

Fig. 6.
Construcción
por
triangulación
temporal. Fases
del proceso.



permitiendo el control de los esfuerzos de flexión en el voladizo hasta completar un recuadro y disponer las diagonales temporales del sistema.

Cuando se completa un recuadro con el carro avanzado por delante de la posición de pila, se procede a la instalación de las diagonales temporales, tesa-das las cuales permiten la retirada de los tirantes provisionales. A partir de ese momento se realiza el trepado de las pilas. Debe indicarse que su ejecución no se efectúa necesariamente según la vertical, sino que puede ser preciso realizarla teniendo en cuenta el ángulo que forme la tangente al arco en esa situación del proceso constructivo.

Después del hormigonado de la pila se instala un nuevo módulo del cordón superior provisional o se procede a la ejecución de un nuevo tramo del tablero mediante el avance de las cimbras o el montaje de un nuevo tramo metálico, dependiendo de la solución estructural elegida. En esta fase se procede a la regulación de esfuerzos en las retenidas y diagonales temporales cuando es necesario, finalizado lo cual se procede al avance y hormigonado de las siguientes dovelas hasta completar un nuevo recuadro.

El proceso se repite hasta completar ambos semiarcos, después de lo cual se procede a la apertura en clave mediante cilindros hidráulicos y al hormigonado de la dovela de cierre. A partir de este momento puede realizarse la retirada de los elementos auxiliares y la ejecución del tablero o su finalización de acuerdo con la opción elegida.

3.4. Apertura en clave

La construcción del arco fase a fase provoca que, al final del proceso, la estructura se encuentre sometida a unos esfuerzos de peso propio que nada tienen que ver con los que le corresponderían si se hubiera construido completa sobre una cimbra fija. Es por ello que, una vez alcanzada la situación de máximo voladizo de los semiarcos, previamente al hormigonado de la dovela de cierre, se proceda a efectuar una apertura en clave mediante la introducción de esfuerzos autoequilibrados en los extremos de los voladizos. Con ello se busca compensar parte de las deformaciones y esfuerzos que los efectos reológicos introducirán después del cierre del arco.

La apertura en clave resulta una actividad delicada en la construcción de cualquier arco, por lo que precisa un análisis detallado para una correcta ejecución. Debido a la duración de la operación puede resultar conveniente, al menos con luces importantes, elegir con cuidado la hora de comienzo, adoptando el momento en que la temperatura de la estructura se corresponda con los valores adecuados. Para ello resulta enormemente útil el



Fig. 7. Apertura en clave.

registro térmico diario que puede proporcionar un sistema de auscultación.

La introducción de los esfuerzos previstos se efectúa habitualmente mediante el empleo de cilindros hidráulicos con capacidad y recorrido adecuados, y dotados de las correspondientes tuercas de seguridad para el bloqueo de los mismos una vez alcanzadas las cargas previstas. Para su apoyo podría resultar conveniente el diseño de muros transversales o riostras en el interior de la dovela, permitiendo así liberar su perímetro para facilitar las actividades de colocación de armadura y encofrados y el posterior hormigonado de la dovela de clave. Habitualmente esta dovela tiene longitudes en el entorno de los 2,00 metros, espacio suficiente para una cómoda realización de las operaciones. Debe prestarse una atención adecuada a las rotaciones y deformaciones que se producen durante el proceso en ambos semiarcos, evitando así posibles riesgos de atrapamiento o daños en los elementos hidráulicos.

De forma simplificada, las actividades consideradas en este proceso podrían ser las siguientes:

- Aproximación del carro correspondiente a uno de los semiarcos.
- Descenso del carro bajo la estructura para permitir acomodar los giros y movimientos verticales previstos en ambos semiarcos.
- Introducción de los esfuerzos previstos mediante cilindros hidráulicos.
- Bloqueo de las tuercas de seguridad de los cilindros hidráulicos.
- Elevación del carro y fijación del mismo.

- Colocación de las armaduras y encofrados correspondientes a la losa inferior y hastiales de la dovela.
- Hormigonado de la sección en "U".

Una vez alcanzada la resistencia prevista del hormigón se procede a la retirada de los cilindros hidráulicos, así como al hormigonado de la losa superior mediante encofrado perdido.

4. Posibles mejoras del proceso de avance en voladizo en ménsula triangulada con diagonales temporales

Los procedimientos de construcción por avance en voladizo en la ejecución de arcos de hormigón han pasado a ser, en los últimos tiempos, prácticamente los únicos considerados, habiendo caído en desuso en las grandes luces los llamados "métodos clásicos". Dentro de los procedimientos de avance en voladizo el método de avance en ménsula triangulada con diagonales temporales parece ser el de más amplia aceptación, y es esa circunstancia la que parece aconsejar un nuevo análisis que permita introducir una serie de mejoras y ponga al día un procedimiento constructivo que resulta muy interesante en la construcción de arcos de hormigón de gran luz. La experiencia en el empleo de este sistema en la construcción de arcos de hormigón permite plantear la necesidad de mejoras en los aspectos que se consideran a continuación.

4.1. Empleo de diagonales temporales rígidas

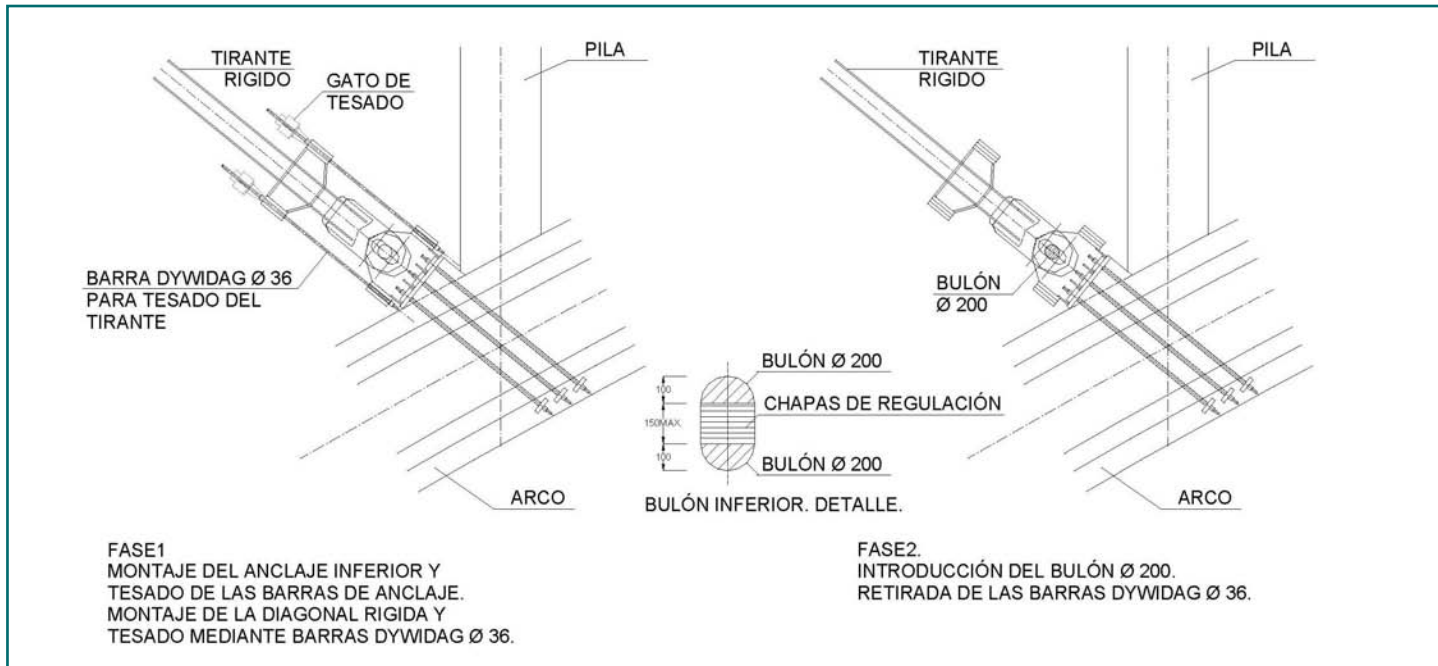
Durante el avance del tramo en voladizo, la ejecución de un nuevo recuadro añade nuevas cargas que deberán ser resistidas por el tramo de estructura ya construido. En particular, los esfuerzos que transmiten las diagonales temporales aumentan con la ejecución de cada nueva dovela. Debido a que habitualmente se resuelven con cables de alto límite elástico (y por tanto, con áreas pequeñas), resultan elementos muy flexibles. El aumento de los esfuerzos que las solicitan produce alargamientos mayores que las deformaciones que se producen en el resto de elementos que componen el sistema (cordón o tablero, pilas y arco). Si no se actuara sobre las diagonales temporales, es decir, si se tratara de elementos pasivos, estas deformaciones harían que el voladizo no se comportara como una celosía Pratt, sino que su comportamiento se asimilaría al de una viga Vierendeel, apareciendo flexiones inaceptables en las secciones del arco. Esta circunstancia obliga a actuar sobre ellas, es decir, obliga a que sean de tipo activo. Es preciso, por tanto, eliminar estas deformaciones en las diagonales en regula-



Fig. 8. Tirantes auxiliares y diagonales rígidas.

ciones sucesivas a lo largo del proceso de construcción mediante retesados de las mismas.

Los criterios de regulación habitualmente empleados se basan en considerar una rigidez axil infinita en las diagonales, evitando así que la longitud entre los nudos varíe cuando crecen los esfuerzos que las solicitan. En la práctica, la presencia de áreas finitas en estos elementos hace que esta hipótesis resulte imposible de cumplir, por lo que será preciso actuar en pequeños incrementos, de tal forma que, ante un nuevo escalón de carga, sean algo más cortas que su valor teórico, y después del nuevo escalón sean algo más largas. De esta manera, al oscilar su longitud sobre el valor teórico a un lado y otro, con variaciones suficientemente pequeñas, el comportamiento en la práctica equivale a una rigidez axil infinita. Sin embargo, aunque se trate de la solución habitualmente empleada, resulta técnicamente poco elegante, y desde el punto de vista de la ejecución, responsable de un consumo importante de tiempo en el ciclo de construcción.



Una solución a este problema podría ser el empleo de perfiles laminados de acero estructural como diagonales temporales, debido a su mayor área y, por tanto, mayor rigidez interna del sistema. Así, comparando un perfil HEB-360, calidad S-355 J2G3, con su equivalente en cables de alto límite elástico, 33T15, la relación entre los alargamientos de ambos sería, para un axil dado:

$$\frac{\Delta L_{\text{CABLE}}}{\Delta L_{\text{PERFIL}}} = \frac{NL/(EA)_{\text{CABLE}}}{NL/(EA)_{\text{PERFIL}}} = \frac{(EA)_{\text{PERFIL}}}{(EA)_{\text{CABLE}}} = \frac{2,1 \times 10^7 \times 180,6 \times 10^{-4}}{1,95 \times 10^7 \times 49,5 \times 10^{-4}} = 3,929$$

La cifra mostrada resulta suficientemente significativa, lo que se traduce, en el caso de diagonales formadas por cables de alto límite elástico, en un importante número de fases de regulación mediante el retesado de los cables.

Pese a un coste de instalación inicial teóricamente algo más elevado, el empleo de perfiles laminados de acero estructural como diagonales temporales presenta amplias ventajas frente a las soluciones formadas por cables de alto límite elástico en el desarrollo de una triangulación, más aún si estos elementos se resuelven en sus uniones extremas mediante detalles articulados con bulones. La disminución o la ausencia de fases de retesado en el proceso hace que su coste algo más elevado se diluya rápidamente en el proceso, resultando elementos mucho más eficaces y, por tanto, de mayor economía global.

Estos elementos fueron utilizados por primera vez en la construcción de un arco de hormigón en España en las obras que ENTRECANALES Y TAVORA, S.A. (actualmente

ACCIONA Infraestructuras, S.A.) llevó a cabo en la Variante Este de Bilbao, en el Viaducto de la Peña, con dovelas inusualmente anchas y pesadas debido a las dimensiones excepcionales de la solución. Las experiencias obtenidas en esta obra hicieron que se planteara esta opción en la construcción del Viaducto sobre el río Almonte (Cáceres), donde dichos elementos únicamente precisaron un tesado inicial, sin necesidad de regulaciones posteriores a lo largo del proceso constructivo.

De forma diferente a como se aplicaron en el Viaducto de la Peña, donde la presencia del tablero de hormigón pretensado facilitaba el tesado de las diagonales desde ese nivel, la ausencia del tablero en el Viaducto sobre el río Almonte hizo que fuera necesario desarrollar nuevos detalles para el tesado inicial de las diagonales rígidas. Para ello se emplearon barras auxiliares de pretensado y chapas de regulación. El sistema desarrollado demostró su idoneidad para el proceso previsto, permitiendo el correcto posicionamiento de las diagonales y el tesado de las mismas con gran precisión. Para estas operaciones resultó de gran utilidad el sistema de auscultación dispuesto, proporcionando un contraste de los valores de las presiones de los cilindros hidráulicos con las tensiones reales en las diagonales y su correlación con la variación prevista de los esfuerzos en los tirantes de retenida.

4.2. Carros de avance

Para adquirir su forma definitiva, el hormigón precisa de una serie de elementos, como son los encofrados, que lo contengan hasta que se produzca su fraguado. En el

Fig. 9.
Viaducto sobre el río Almonte.
Tesado de las diagonales rígidas.

caso de la construcción por avance en voladizo estos elementos precisan, a su vez, de un sistema de soporte y traslación, dotado de los correspondientes mecanismos de ajuste y nivelación, los llamados carros de avance. En la construcción de los puentes arco podemos encontrar tres tipos diferentes, función de la sección adoptada para el arco. Cada uno de ellos presenta sus ventajas e inconvenientes.

a) Carros convencionales. Son los habitualmente empleados en la construcción de puentes arco de hormigón. Podrían considerarse una evolución de los carros empleados habitualmente en la construcción de puentes por voladizos sucesivos, aunque en este caso están dotados de inclinación variable, permitiendo la ejecución de dovelas de canto variable, tanto en altura como en anchura, adaptándose en las sucesivas posiciones a la geometría del arco. Los equipos habitualmente disponibles permiten la ejecución de dovelas de hasta 6 metros de longitud, con pesos en el entorno de las 300 toneladas. Permiten el hormigonado de la dovela completa, aunque su importante peso puede penalizar el proceso constructivo.

b) Carros tipo losa. Se trata de elementos muy sencillos, puesto que su finalidad es el hormigonado en voladizo de una losa, aligerada o maciza. Su empleo corresponde a los llamados "arcos con tablero de rigidez", donde el dintel posee una función resistente comparable a la del arco frente a la actuación de las cargas verticales. Puesto que en estas soluciones, desarrolladas inicialmente por Maillart, el arco suele resolverse mediante una losa, estos carros de avance no precisan encofrado interior.

c) Carros tipo "autotrepa". Corresponden a las últimas generaciones en el diseño de carros de avance de geometría variable. Aprovechan las técnicas disponibles en los sistemas habitualmente empleados en los procesos de trepado. Una de estas soluciones ha sido empleada con éxito en el Viaducto sobre el río Almonte (Cáceres). Mediante la división del hormigonado de la dovela en tres fases diferentes (losa inferior, hastiales y losa superior) permiten un diseño muy ligero y funcional, con pesos inferiores a las 30 toneladas para dovelas de longitud cercana a los 6 metros, frente a las casi 60 toneladas de un carro de tipo convencional. La separación de las fases decaladas en diferentes dovelas permite un hormigonado conjunto de la losa superior y los diafragmas correspondientes a las secciones de pila. Su versatilidad permite ciclos similares a los obtenidos con carros de tipo convencional.

Es de esperar que en un futuro próximo, las técnicas de los encofrados y sus medios de avance permitan de-



Fig. 10. Empleo de carro de avance tipo "autotrepa".

sarrollar soluciones mucho más ligeras y versátiles, que penalicen en menor medida los esfuerzos en los voladizos y acorten los plazos de ejecución. La solución empleada en el Viaducto sobre el río Almonte así parece indicarlo.

4.3. Empuje del tablero sobre el arco

Si el método elegido para la ejecución del arco y las pilas no ha considerado la ejecución simultánea del tablero, es decir, el proceso de avance no ha sido el de arco-pilas-tablero, será preciso, una vez cerrado el arco, proceder a la ejecución del mismo. Aceptando que se trata de un tablero de hormigón, éste podría ser construido por cualquiera de los métodos siguientes:

- Hormigonado vano a vano con cimbra móvil.
- Montaje de elementos prefabricados con vigas de lanzamiento.
- Empuje del tablero sobre el arco.

El empuje de vigas continuas sobre el arco representa una buena solución con respecto a los requerimientos de seguridad de los trabajadores, a una mejora en la calidad estructural, a la reducción de los plazos de ejecución y a los posibles ahorros en la construcción de la obra. Igualmente, desde el punto de vista de diseño, ofrece la posibilidad de incrementar la separación entre las pilas en el arco y en los vanos de acceso eliminando la restricción derivada de los costes crecientes de las cimbras o vigas de lanzamiento precisas para la construcción del tablero, así como una optimización en la interacción entre el arco y el tablero.

La asimetría de cargas durante el empuje del tablero desde uno de los estribos podría ser evitada efectuando el empuje desde ambos estribos hacia el centro. Sin embargo, la presencia de cargas simétricas en solo parte del arco provoca igualmente esfuerzos de flexión en la bóveda, y esta circunstancia, sumada a que el coste de dos parques de empuje resulta poco competitivo, hace que deba plantearse desde uno de los estribos únicamente. Esta asimetría de cargas podría ser equilibrada mediante un sistema de atirantamiento temporal que equilibre el sistema y arriestre las pilas más altas del arco. Otra posible opción sería la disposición de contrapesos o, incluso, el llenado de tramos del arco con agua aprovechando la presencia de los diafragmas de las pilas.

El empuje del tablero sobre el arco genera menores desequilibrios en las cargas verticales que los métodos alternativos de construcción del tablero, puesto que no se añade el peso de ningún equipo auxiliar al peso propio de la estructura. Por el contrario, los esfuerzos horizontales son mayores debido a los esfuerzos de empuje. Ambos, esfuerzos de empuje y asimetría de cargas verticales, podrían ser equilibrados mediante el atirantamiento provisional de pilas y arco. El atirantamiento temporal en este caso no afecta a los costes de construcción, puesto que dichos elementos han sido empleados en la ejecución del arco por avance en voladizo.

Las ventajas del empuje del tablero aumentan más aún si éste es de tipo mixto acero-hormigón. Las cargas verticales sobre el arco son menores, al igual que el desequilibrio de las cargas y las fuerzas de empuje, lo que logra que la eficiencia global de la estructura se incremente. El empuje del tablero podría, por tanto, abrir nuevas perspectivas en la construcción de este tipo de estructuras.

4.4. Sistemas de instrumentación y control

La ejecución de procesos constructivos evolutivos, como son los empleados en el caso de los arcos de hormigón construidos por avance en voladizo, aconsejan el empleo de los medios de auscultación y control disponibles hoy en día en el mercado, algo más sofisticados que los habituales controles geométricos. En cualquier caso, dichos medios complementan los controles geométricos efectuados por medios topográficos, siendo una herramienta tremendamente útil para el control de procesos evolutivos.

Hoy en día se encuentran a nuestra disposición elementos precisos y fiables que permiten controlar múltiples parámetros estructurales siempre complementados por las técnicas topográficas de control geométrico. Es importante que el control sea redundante, es decir, que se disponga de datos que puedan ser corroborados entre sí

y nos permitan comprobar o interpretar una determinada etapa, pudiendo decidir si se ha producido o no una anomalía.

Durante la ejecución del Viaducto sobre el río Almon-te (Cáceres) se empleó un sistema de auscultación controlado por un sistema de adquisición dinámica de datos, el cual facilitaba información en tiempo real, vía internet, de todos los parámetros auscultados, permitiendo el control a distancia de aquellas fases de construcción consideradas como más relevantes o sensibles en el proceso.

El sistema de auscultación empleado contaba con células de carga en los tirantes de retenida, extensómetros en las diagonales temporales, cordón de tracción y secciones de control del arco, clinómetros en las pilas de retenida y sondas térmicas. Todo ello, conjuntamente con los controles topográficos previstos, permitió, sobre la base de datos redundantes, eliminar cualquier tipo de incertidumbre en el proceso constructivo.

Hay que destacar aquí la importancia de los registros históricos de temperatura en las secciones del arco para el planteamiento del cierre en clave, permitiendo elegir el momento más idóneo para la puesta en carga. Igualmente el sistema permitió controlar con todo detalle el proceso de apertura en clave, así como el control de todos los parámetros involucrados mostrando una magnífica coincidencia con los valores teóricos previstos y los controles geométricos desarrollados.

4.5. Hormigones ligeros y de alta resistencia

Los avances que se producen día a día en el campo de los hormigones de alta resistencia o en los hormigones ligeros y su frecuente incorporación a nuestras obras, podrían considerarse posibles mejoras del sistema, como de hecho así ha ocurrido en las recientes realizaciones de esta tipología en nuestro país. Así, por ejemplo, el empleo de hormigones ligeros, al menos en las fases avanzadas del proceso, podría reducir en forma apreciable el peso del tramo, afectando, por tanto, a los sistemas de atirantamiento auxiliares.

Los hormigones de alta resistencia podrían tener efectos similares en las secciones del arco, reduciendo los espesores precisos en las losas y hastiales de las dovelas, o mejorando la resistencia a tracción del hormigón, un parámetro importante durante la ejecución. Debe destacarse que durante el proceso constructivo las tracciones en el hormigón suelen limitarse al valor característico de la resistencia media, garantizando así que durante las fases de avance no se produzca una pérdida de la rigidez de los elementos, siempre de difícil evaluación, alterando los valores de los desplazamientos previstos y planteando problemas sobre la idoneidad de determinadas situaciones de construcción.

5. Aplicación del sistema de ménsula triangular.

Casos reales

Como se ha indicado anteriormente, el sistema de ménsula triangulada con diagonales temporales ha sido aplicado con éxito por ACCIONA Infraestructuras, S.A. en la construcción de dos puentes arco de hormigón armado de importantes características.

5.1. Viaducto de La Peña. Variante este de Bilbao (Vizcaya)

El Viaducto de la Peña fue ejecutado por la UTE formada por ENTRECANALES Y TAVORA, S.A. (actualmente ACCIONA Infraestructuras, S.A.) y Construcciones Moyúa entre Julio de 1993 y Febrero de 1995 para el Departamento de Obras Públicas de la Diputación Foral de Vizcaya.

Proyectado por APIA XXI para cruzar la ría del Nervión entre Miraflores y San Adrián, la solución elegida fue un arco de hormigón armado y tablero superior postensado, adoptándose como sistema de construcción el avance simultáneo en voladizo del conjunto arco-pilas-tablero mediante una triangulación provisional, anclando los dos semiarcos a través de los tableros de acceso y sus estribos al terreno mediante anclajes provisionales.

Las diagonales temporales empleadas en la triangulación provisional estaban formadas por perfiles laminados HEM, con longitudes máximas en el entorno de los 50 metros. El tablero, de sección maciza, se encontraba sometido a unos esfuerzos de pretensado longitudinal de unas 7.000 toneladas, incluyendo el pretensado adicional para el anclaje de ambos semiarcos. Los anclajes dispuestos en ambos estribos transmiten la fuerza de anclaje provisional de ambos semiarcos a la roca.

El tablero de 318,5 metros de longitud, de sección maciza nervada, está constituido por 15 vanos con una anchura de 25 metros y una luz media de 22 metros, apoyado sobre pilas circulares de hormigón, con diámetros entre 1,40 y 1,80 metros. El arco, de hormigón armado, posee una luz de 148 metros, con una flecha de 45 metros. La anchura de las dovelas es de 15 metros, encontrándose formada la sección transversal rectangular por tres células. La longitud de las dovelas adoptada fue de 6 metros.

El Viaducto de la Peña fue abierto al tráfico en Mayo de 1995.

5.2. Viaducto sobre el río Almonte. Autovía de La Plata (Cáceres)

El Viaducto sobre el río Almonte fue ejecutado por ACCIONA Infraestructuras, S.A. dentro de los trabajos de-



Fig. 11. Viaducto de la Peña.

sarrollados en el tramo Hinojal – Cáceres Norte de la Autovía de la Plata, entre Marzo de 2002 y Julio de 2006 para el Ministerio de Fomento.

Diseñado por la oficina de proyectos Siegrist y Moreno, S.L., el Viaducto sobre el río Almonte es la estructura más importante del tramo, permitiendo el paso de la Autovía sobre el embalse de Alcántara, a la altura del río Almonte. Se encuentra formado por dos arcos gemelos de hormigón armado, de tablero superior, con una luz de 184 metros y una flecha en clave de 42 metros. La sección transversal está formada por un cajón rectangular de hormigón armado, con un canto variable entre 3,00 metros en la sección de arranque y 1,80 metros en la sección de clave. El tablero posee una anchura de 13,50 metros, encontrándose contenido dentro de un acuerdo parabólico de tipo cóncavo. La estructura del mismo se resuelve mediante una losa aligerada continua de hormigón postensado, con una longitud de 388 metros dividida en 18 vanos para la calzada izquierda, y 432 metros con 20 vanos en la calzada derecha. La luz típica del tablero a su paso sobre los arcos es de 22,00 metros. Para la sección transversal de las pilas se adoptan secciones rectangulares en cajón, llegando a convertirse en secciones rectangulares macizas al disminuir sus dimensiones en las zonas cercanas a la clave del arco.



Fig. 12. Viaducto sobre el río Almonte.

El proceso constructivo propuesto en el proyecto contemplaba la ejecución de los arcos exentos mediante avance en voladizo atirantado, empleando para ello tirantes formados por cables que partían de torres provisionales de hormigón situadas sobre las pilas correspondientes a los arranques del arco. Posteriormente, una vez realizado el cierre en clave, se efectuaba el trepado de las pilas, y mediante el empleo de autocimbras, se procedía al hormigonado del tablero de forma simétrica desde ambos estribos.

La presencia de dos arcos, así como el programa de trabajos considerado y la importancia de los accesos aconsejaron independizar la construcción del arco de la del resto de la estructura, empleando para ello un sistema de ménsula triangulada. Como es habitual en este tipo de estructuras, la ejecución del arco forma parte del camino crítico, por lo que la construcción simultánea del tablero en los vanos de acceso y el arco de forma independiente aseguraría el cumplimiento de los programas de trabajo. Esta circunstancia planteó la utilización de un dintel metálico provisional como cordón de tracción, en lugar de emplear la secuencia de avance arco-pilas-tablero. La repetición de los trabajos en la segunda calzada permitió la reutilización de estos elementos.

Los trabajos correspondientes al Viaducto sobre el río Almonte finalizaron durante el mes de Febrero de 2005, habiéndose efectuado las correspondientes pruebas de carga estáticas y dinámicas durante los primeros días del mes de Marzo de 2005. Las actividades correspondientes al arco de la calzada izquierda comenzaron durante el mes de Marzo de 2003, completándose el cierre del mismo en el mes de Abril de 2004. El cierre de la calzada derecha se efectuó a mediados de Agosto de 2004.

El Viaducto sobre el río Almonte ha sido abierto al tráfico a finales de Julio de 2006. ♦

Referencias:

- FERNANDEZ TROYANO, L. *Tierra sobre el agua. Visión histórica universal de los Puentes*. Colegio de Ingenieros de Caminos, C. y P., 1999.
- ARENAS, JUAN J. *Camino en el aire. Los puentes*. Colegio de Ingenieros de Caminos, C. y P., 2002.
- TORROJA, E. *Las estructuras de Eduardo Torroja*. CEDEX - CEHOPU. Ministerio de Fomento, 1999.
- MATHIVAT, J. *Construcción de puentes de hormigón pretensado por voladizos sucesivos*. Editores Técnicos Asociados, S.A., 1980.
- MELBOURNE, C. *Arch bridges*. Thomas Telford, 1995.
- BROWN, DAVID J. *Bridges*. Mitchell Breazley, 1996.
- ROSIGNOLI, M. *Bridge launching*. Thomas Telford, 2002.