

Viaducto para Ferrocarril de Alta Velocidad sobre el Río Tajo en el Embalse de Alcántara

Viaduct for High-Speed Railway over the Tagus River in the Alcantara Reservoir

Antonio Martínez Cutillas ^a, Borja Martín Martínez ^{*,b}, Silvia Fuente García ^c, Lucía

Blanco Martín ^d, Héctor Faúndez Velasco ^e, Manuel Escamilla García-Galán ^f, Luis

Miguel Salazar Martín ^g

^a Doctor Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado, S.L. Ingeniero. amartinez@cfcsl.com

^b Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado, S.L. Ingeniero. bmartin@cfcsl.com

^c Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado, S.L. Ingeniero. sfuente@cfcsl.com

^d Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado, S.L. Ingeniero. lblanco@cfcsl.com

^e Ingeniero de Obras Públicas. Carlos Fernández Casado, S.L. / Modela Estructuras. Ingeniero. hfaundez@cfcsl.com

^f Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado, S.L. / PONTEM. Ingeniero. mescamilla@cfcsl.com

^g Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Carlos Fernández Casado, S.L. / PONTEM. Ingeniero. lsalazar@cfcsl.com

RESUMEN

Ubicado en la Línea de Alta Velocidad Madrid-Extremadura, el viaducto tiene una longitud total de 1488 m. Su distribución de luces viene influenciada por el salto del río Tajo, el cual se realiza mediante un arco de 324 m de luz, fragmentándose el tablero sobre el mismo en seis vanos de 54m. Los vanos de acceso se plantean de 60m, intercalándose entre ellos dos vanos de transición de 57m, uno a cada lado del arranque del arco. El elemento emblemático del viaducto es el citado arco. De directriz curva, consta de un cajón variable en canto entre 3.50 m y 4.00 m y en ancho entre 12.00 m en arranques y 6.00 m en clave. Tras su finalización, es uno de los mayores puentes arco ferroviario de hormigón en el mundo.

ABSTRACT

Located in the High-Speed Railway Line Madrid-Extremadura, this viaduct has a total length of 1488 m. Its span distribution is driven by the crossing over the Tagus River, which is materialized by an arch 324 m long, being divided the deck over it in six spans 54 m long. The approach spans are 54 m long, with two transition spans of 57 m, one at each side of the arch springings. The emblematic element of this viaduct is the mentioned arch. With curved directrix, it is formed by a hollow box, variable in height between 3.50 m and 4.00 m and in width between 12.00 m at its starts and 6.00 m at its key. After its completion, it is one of the longest railway concrete arch bridges in the world.

PALABRAS CLAVE: arco de gran luz, voladizos atirantados, carro de avance, cimbra autoportante.

KEYWORDS: long span arch bridge, stayed cantilevers, form traveller, movable scaffolding system.

1. Introducción

El proyecto y construcción de las nuevas líneas de ferrocarril de alta velocidad que se ha desarrollado en España en los últimos años ha permitido el desarrollo de tipologías y procedimientos de construcción específicos en el campo de los puentes.

En el cruce de los grandes ríos se ha construido puentes de gran luz; pero como siempre en nuestro país ha sido el cruce de los embalses y rías donde ha sido preciso construir los puentes ferroviarios de mayor luz, tal es el caso, en orden cronológico, el Puente sobre el Embalse de Contreras, Puente sobre la ría del Ulla, Puente sobre el río Ulla, Puente sobre el río Almonte y Puente sobre el río Tajo, ambos situados en la cabecera del Embalse de Alcántara.

De acuerdo con nuestra experiencia, iniciada con el Puente sobre el Embalse de Contreras, el puente arco de hormigón constituye una alternativa desde el punto de vista técnico y constructivo para puentes de ferrocarril de alta velocidad en el rango de luces entre 200 y 400 m siempre que se cumplan las condiciones adecuadas para su cimentación.

Tanto en el Proyecto del Puente sobre el Embalse de Contreras, con una luz principal de 261 m [1] como en Puente sobre el río Tajo, con una luz principal de 324 m, confluyen condiciones de trazado y encaje en el terreno que han conducido a la utilización del arco de hormigón como la solución óptima. La necesidad de un viaducto de gran longitud en el que es preciso salvar una luz importante ante la imposibilidad de cimentar en el lecho del río o embalse por la gran profundidad de la cimentación y la enorme variabilidad de la cota del nivel de agua.

Para garantizar las posibilidades de construcción con independencia de la lámina de agua en ambos casos fue necesario el proyecto de un vano principal de gran luz. Las condiciones de cimentación propiciaron el encaje de un arco de tablero superior. Lo que se ha considerado fundamental ha sido, una vez elegida la luz óptima del viaducto de acceso, mantener la misma secuencia de luces sobre la estructura del arco. De esta forma el viaducto tiene una modulación única, soportándose de forma natural y eficaz sobre la estructura principal del arco. Esta unidad formal se complementa con la unidad constructiva del conjunto. El arco se construye independientemente del cauce inferior, por medio de voladizos sucesivos atirantados. Una vez cerrado el arco en clave y liberado del atirantamiento provisional, es decir, cuando el arco se convierte en arco, el tablero superior puede construirse con los mismos medios auxiliares convencionales que han permitido la construcción del viaducto de acceso, cimbra autolanzable o sistema de empuje.

Esta unidad formal y constructiva se ha conseguido gracias a un encaje cuidado de la geometría del arco para minimizar las flexiones en el mismo en situación de carga permanente y por las posibilidades resistentes que debe tener el arco ante las sobrecargas ferroviarias no simétricas, que le permiten tener márgenes para hormigonados no estrictamente simétricos de los tableros sobre el mismo. Adicionalmente, la tecnología actual permite la utilización de hormigones de alta resistencia tanto en el arco como en el tablero así como un control adecuado de la fisuración y las condiciones de estabilidad estructural en estado límite de servicio y último.

El resultado final, desde nuestro punto de vista, constituye una aportación al campo de los arcos de hormigón para ferrocarril, heredero en

el siglo XXI, del Puente de ferrocarril sobre el río Esla, Viaducto de Martín Gil, de 209 m de

luz, construido durante la posguerra, en el siglo XX. [2].

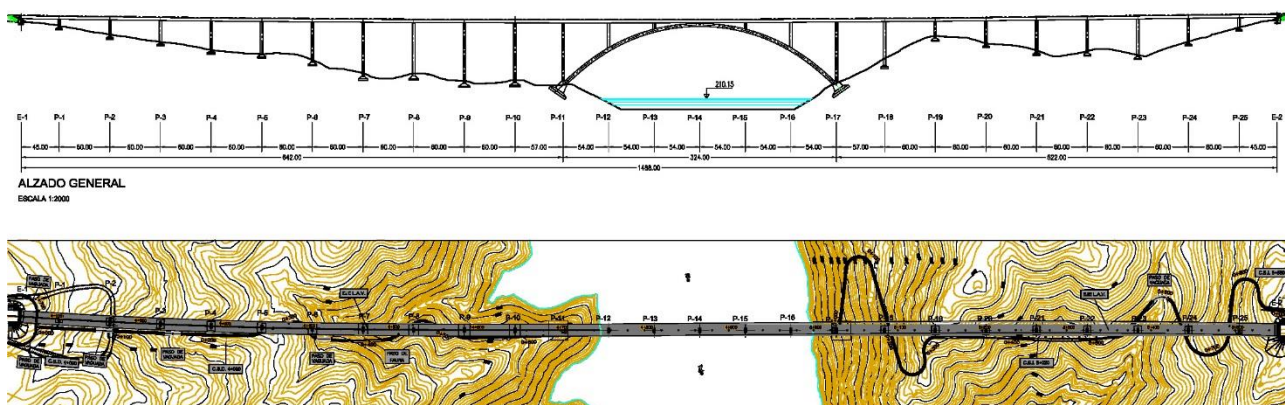


Figura 1. Planta y alzado generales

2. Descripción del Puente

El viaducto tiene una longitud total de 1488m con una distribución de luces de $45 + 9 \times 60 + 57 + 324 + 57 + 7 \times 60 + 45$ m.

2.1. Tablero

El tablero está formado por una sección cajón de hormigón pretensado de 4.00 m de canto. Esta esbeltez permite salvar adecuadamente las luces de 60m de los vanos de acceso y de 54m sobre el arco que, debido a su flexibilidad introduce flexiones complementarias. La losa inferior tiene 5.00 m de ancho y la superior 6.50 m, con voladizos que completan la anchura total de la sección de 14.00 m. El espesor de las almas es 0.50 m. La caracterización del

hormigón es HP-50 en los vanos del Viaducto de acceso y HP-70 para los vanos situados sobre el arco.

Los vanos de acceso tienen 5 cables de pretensado con entre 25 y 37 unidades de $\varnothing 0.6''$, por cada alma con un trazado. En los vanos sobre el arco se complementan con cables superiores e inferiores.

Dada la longitud del tablero, superior a 1200 m, se estudió la posibilidad de disponer el punto de anclaje de las acciones horizontales en la clave del arco. Los incrementos de tensiones en el arco eran asumibles por lo que se optó finalmente por esta disposición permitiendo el empleo de juntas de dilatación de vías en ambos estribos con dimensiones convencionales.

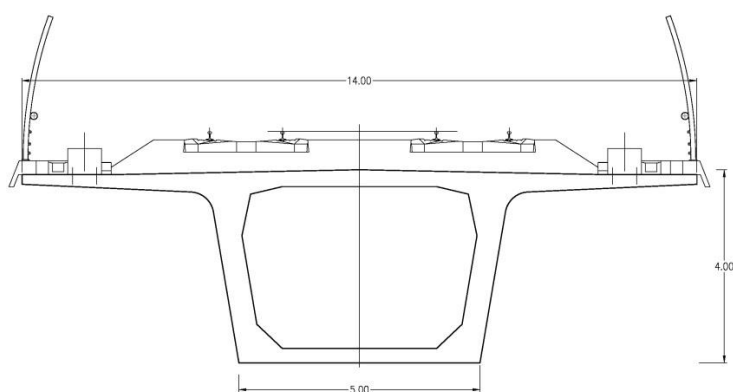


Figura 2. Definición de tablero



2.2. Arco

El arco tiene una directriz curvilínea en el plano vertical. Esta directriz ha sido obtenida a partir

de un estudio detallado de optimización de las flexiones de carga permanente con una aproximación a la curva antifunicular de dichas acciones. Está formado por una sección cajón

rectangular de canto variable entre la sección de arranques, 4.00m y clave, 3.50m. La anchura varía linealmente entre los 12.00m de la sección de arranques hasta los 6.00m en la sección de clave. El espesor de almas y losa superior varían para conseguir un estado de compresiones máximas lo más homogénea posible. La resistencia del hormigón necesaria es HA-70.

Debido a las condiciones meteorológicas del lugar así como la singularidad de la

estructura se realizó un estudio del comportamiento aeroelástico del arco tanto en construcción como en servicio en un ensayo en túnel de viento con modelo reducido. De dicho estudio se concluyó que la estructura no presentaba ningún fenómeno reseñable de inestabilidad frente al viento en las diferentes configuraciones estructurales.

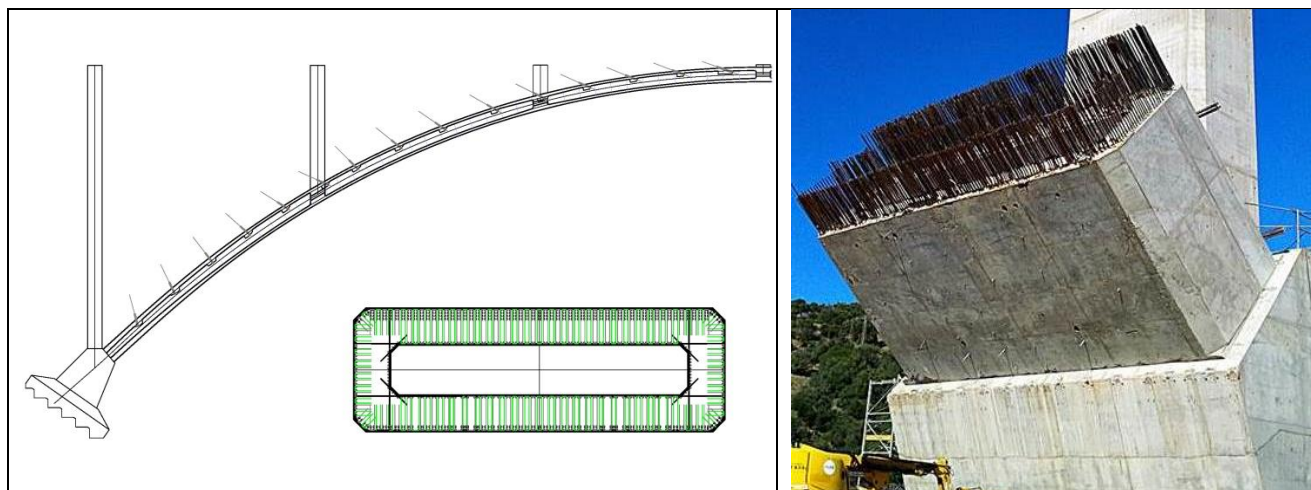


Figura 3. Definición de arco

2.3. Pilas

Las pilas tienen una altura variable entre 9.60 y 71.50m. Todas ellas están generadas por una pila básica de sección cajón rectangular de 3.00 m. de ancho constante y canto variable entre 5.20m en la parte superior, 3.20m. en la "cintura" situada a 5.00m de la parte superior y un ensanchamiento hacia la base.

2.4. Aparatos de apoyo y juntas

Los aparatos de apoyo son de teflón esféricos tanto unidireccionales como bidireccionales, salvo los situados en clave que son aparatos de apoyo fijos. Los de los estribos tienen una capacidad de carga vertical de 1100 T mientras que los de las pilas tienen una capacidad variable entre 1600 y 2500 T. La junta de ambos estribos debe admitir un movimiento total de 1100mm.

2.5. Estribos

Con objeto de sustentar sobre estructura los aparatos de dilatación de vía, se configuran estribos en cajón con cuchillos intermedios con alturas máximas 8.63 m en E-1 y 9.64 m en E-2.

2.6. Barrera de Protección

Para cumplir las prescripciones de la DIA resulta necesario disponer una protección de 3.00 m de altura para la protección de las aves. La barrera está formada por tubos de acero curvos de 100 mm de diámetro cada 0.50 m. En su parte inferior se disponen tubos horizontales de diámetros variables para formar la barandilla de protección. Se ha realizado un estudio específico sobre el comportamiento aeroelástico de las distintas tipologías de barreras aplicables en este caso, llegando a ésta como solución óptima.

3. Proceso de construcción

3.1. Ejecución del tablero en vanos de acceso

La construcción del tablero en los accesos se realiza vano a vano por medio de cimbra autoportante dispuesta desde ambos estribos, avanzando hasta una distancia igual a un cuarto de la luz de los primeros vanos a partir de las pilas situadas sobre los plintos de arranque del arco.

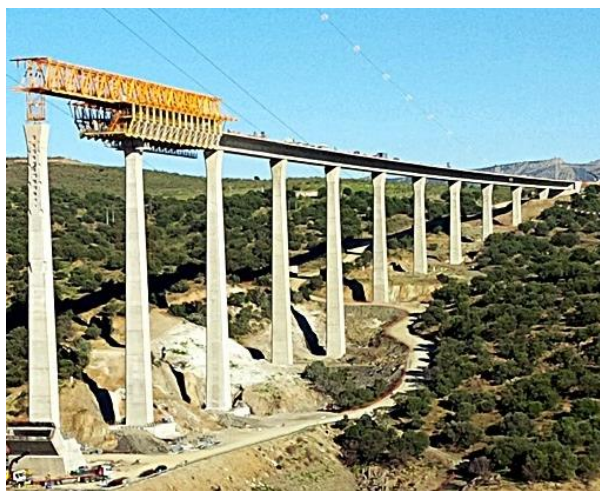


Figura 4. Ejecución de tablero con autocimbra

3.2. Definición general de ejecución del arco

La construcción del arco se realiza por voladizos sucesivos, atirantados por medio de una torre metálica provisional. La torre se atiranta a las cimentaciones de las pilas próximas que precisan de unidades de anclaje al terreno.

Los medios auxiliares necesarios para la construcción del arco son: una torre colocada sobre la cabeza de la pila 11 para la construcción de un semiarco y otra torre idéntica sobre la cabeza de la pila 17 para el otro semiarco; un carro de hormigonado para cada semiarco; un sistema de tirantes de acero que soporta el semiarco construido anclándose en la torre, otro sistema que soporta la torre anclándose en las cimentaciones de las pilas adyacentes y, finalmente, un sistema de anclajes

provisionales al terreno para sujetar las zapatas de las pilas contiguas.

La torre está formada por dos columnas arriostradas por una triangulación en K. La sección de cada columna es un cajón metálico. Las columnas están separadas seis metros y medio para permitir que el sistema de retención de la torre esté en un plano vertical pasando por las cimentaciones de las pilas aledañas.

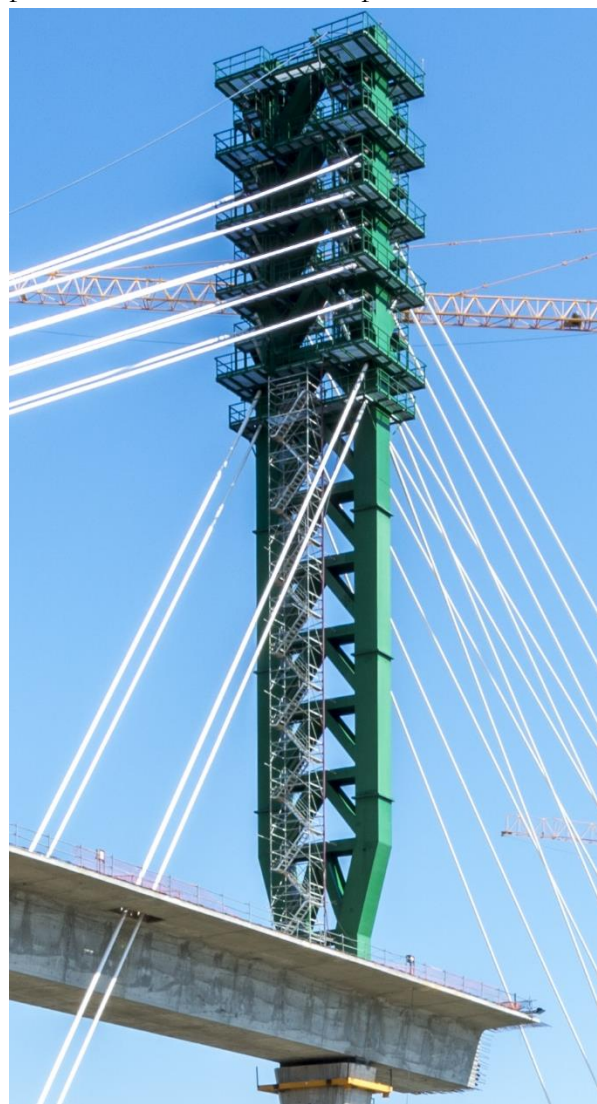


Figura 5. Torre de atirantamiento provisional

El carro de hormigonado es un elemento metálico que permite soportar el encofrado de cada dovela del arco y el hormigonado de la misma. Este carro se apoya en la zona del arco recién hormigonada para preparar el hormigonado de la siguiente dovela. Se consideró una longitud de cada dovela algo menor a cuatro metros.



Figura 6. Carro de hormigonado del arco

Se han considerado quince parejas de cables que sujetan el semiarco completo y otras quince parejas que retienen la torre. Los tirantes del arco están separados doce metros, es decir se coloca un cable cada tres dovelas. La separación de los tirantes en la torre es de dos metros salvo los dos primeros que, por ser muy verticales, están más alejados entre sí para que no se toquen los anclajes.

El anclaje de los tirantes en la cimentación se hace de la manera siguiente: los ocho primeros cables en la zapata de la pila adyacente a la que se encuentra la torre y los otros siete a la cimentación de la pila contigua.

Dichas cimentaciones se anclan al terreno disponiéndose anclajes verticales e inclinados a cuarenta y cinco grados.

3.3. Optimización del proceso de ejecución del arco

Debido a los condicionantes propios de la obra, y en aras de optimizar el empleo de los medios auxiliares realmente disponibles y ajustar de un modo óptimo los plazos de ejecución, durante el desarrollo de la misma se plantean una serie de modificaciones en el proceso, con objeto de optimizar el sistema tanto desde un punto de vista estructural como de plazos. El procedimiento planteado se basa en la

posibilidad de adelantar el comienzo de la construcción del arco realizando los atirantamientos iniciales necesarios para la ejecución del mismo directamente desde la pila de hormigón sobre el plinto de arco.

En lo referente al diseño estructural, el principal condicionante de esta alternativa es que con el atirantamiento desde la pila se pierde altura y por lo tanto verticalidad en ángulo de ataque de los tirantes con respecto a la carga gravitatoria del peso del arco, al igual que ocurre con la retenida. Dado que esto supone un incremento de la carga horizontal a compensar en las zapatas de retenida, el alcance de esta solución debe condicionarse a un número máximo de dovelas de forma que no se penalicen en exceso los anclajes de retenida a realizar en las zapatas anexas al arranque del arco.

Tras el análisis de estos condicionantes se concluye que la solución ideal pasa por atirantar desde la pila de hormigón los 6 primeros pares de tirantes del arco. Ello permite lanzar un total de 20 dovelas del arco antes de que sea necesario disponer de la torre metálica de atirantamiento sobre las pilas.

Para librar el paso de los cables de retenida que se anclan en pilono, a través del tablero, es necesario realizar unas ventanas provisionales ubicadas en las alas, que serán cerradas tras la retirada del atirantamiento provisional.

Con este planteamiento se consiguen una serie de objetivos:

- Adelantar el comienzo de ejecución del arco.
- Sincronizar la ejecución del arco con la llegada del tablero hasta las pilas sobre plinto.
- Reducir el plazo de terminación del tablero.
- Acortar la altura del pilono y reducir la carga sobre la estructura metálica.
- Reducir la longitud de los cables de los 6 primeros pares de tirantes.
- Concentrar todas las operaciones de tesado, en la vertical de cada la pila.

- Permitir el acceso del material para la construcción del arco a través del tablero.



Figura 7. Proceso constructivo del arco (imagen de obra)

3.4. Sistema de tirantes provisionales

Los tirantes disponen de un anclaje pasivo ubicado en el arco en el caso de los cables de sustentación y en el caso de los cables de retenida en las zapatas de las pilas P9, P10, P18 y P19. El otro extremo del tirante se resuelve con un anclaje activo con sistema apto para su tesado, destesado y retesado, estando ubicado en la zona de la pila y del pilono.

El sistema dispone de dos de las cuatro barreras de protección contra la corrosión definidas para tirantes definitivos, con lo que queda garantizada su durabilidad para su periodo de servicio en la obra. Se permite una rápida sustitución de cualquiera de los cables que componen el tirante ante un fallo localizado de cualquiera de los mismos. El diseño realizado facilita el enfilado de cordones a posteriori, con el resto de los cables del tirante en servicio en el caso de que sea necesario incrementar la carga de cualquiera de los mismos, así como el del conjunto de los cables durante todo el proceso.

3.4.1. Anclajes en arco

El anclaje interior en el caso del cajón hueco del arco se resuelve mediante el empleo de unos carretes o tubos metálicos que se dejan

embebidos en el hormigón de la dovela y que posteriormente se suplementan desde el exterior con un tubo guía de menor diámetro, soldado al carrete embebido que permiten disponer el desviador del tirante en su posición de trabajo definitiva.



Figura 8. Anclaje pasivo en arco

3.4.2. Anclajes en zapatas de retenida

En cuanto a los anclajes en las zapatas de retenida, se plantea del mismo modo un anclaje por medio de tubo pasante en la sección de hormigón. Para resolver la disposición de los anclajes inferiores se crean en los laterales de la zapata dos galerías interiores con el fin de hacer posible el enfilado y montaje de los tirantes. Por lo demás la solución del anclaje se resuelve mediante la creación de unas cuñas interiores alineadas con las placas de anclaje que mediante la correspondiente armadura de difusión

permitirán la transmisión de esfuerzos a la sección de hormigón de la zapata de retenida.



Figura 9. Anclajes pasivos en zapata de retenida

3.4.3. Anclajes en pilas de hormigón

La zona más compleja para la aplicación de la solución propuesta es el paso de los tirantes por las pilas P11 y P17. Estas deberán alojar los tubos de anclaje de los 6 primeros grupos de tirantes provisionales (un total de 24 tirantes).

Dado el elevado número de anclajes y las reducidas dimensiones de los fustes de las pilas de hormigón, se desarrolla un estudio geométrico tridimensional de la parte superior del fuste de la pila. Se comprueba que es posible embeber la nueva tipología de anclajes en la parte superior de las pilas sin interferencias entre ellos. Para ello se tienen en cuenta las dimensiones reales de los tubos de los anclajes en función del dimensionamiento del sistema de atirantamiento de tipo fijo.

Para solventar la concentración de anclajes en la cabeza de las pilas y evitar una excesiva concentración de esfuerzos sobre la sección hueca de hormigón se procede a macizar las pilas en la sección afectada por los anclajes.

Se propone premontar los citados tubos sobre un bastidor metálico en taller, de forma que se garantice un replanteo preciso para estos elementos. Posteriormente estos bastidores se trasladan a obra para, sobre los mismos, montar la armadura de refuerzo de la pila. De esta forma para su colocación sobre la pila solo es

necesario replantear de forma correcta la posición de la jaula metálica completa, con su armado incluido y proseguir a posteriori con el trepado del molde exterior de la pila.

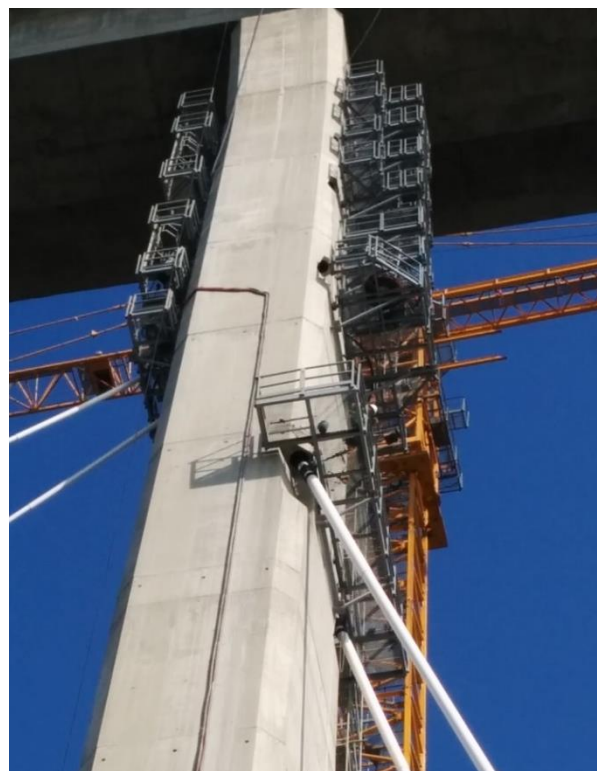


Figura 10. Anclajes activos en pila

3.5. Secuencia de fases de ejecución del arco

El proceso de construcción de cada semiarco se inicia con el hormigonado de la dovela inicial cuyo encofrado se soporta mediante una cimbra apoyada en la cimentación del arco. Esta dovela inicial debe tener la longitud necesaria para que se pueda colocar el carro de avance y así comenzar el proceso de avance por voladizos sucesivos. Colocado el carro en su posición se hormigona la primera dovela en ménsula, posteriormente se mueve el carro sobre ésta y se prepara para el hormigonado de la segunda dovela en ménsula.

El montaje del primer tirante requiere mayor atención ya que la torre está todavía sin arriostrar. Se empieza por dar el 25% de la carga de montaje del cable que va a la cimentación, a continuación el 25% de la carga del primer tirante del arco, luego otro 25% del

tirante de la zapata y así sucesivamente. Es necesario controlar los movimientos longitudinales de la punta de la torre. Colocado el primer tirante se continúa con la secuencia de hormigonado de dovela y traslado de carro hasta alcanzar la posición de montaje del segundo tirante. El proceso entra en fase secuencial.

En algunas fases resulta necesario destesar o retesar adicionalmente alguno de los cables anteriores del arco, actuaciones obligadas por el control de la fisuración del arco.

La secuencia finaliza después de colocar los últimos tirantes y realizar un ajuste de carga

en tirantes para llegar a la geometría deseada. Se retira entonces uno de los carros y con el otro se hormigona la clave quedando así cerrado el arco. Se completa el proceso desmontando los tirantes provisionales empezando por el último del lado del arco, luego el del lado de la cimentación, se pasa a continuación por el penúltimo cable del arco, el penúltimo de la cimentación y así sucesivamente. Cuando se han retirado todos los cables se procede al desmontaje de las torres metálicas y la retirada de los anclajes al terreno.



Figura 11. Final de ejecución de arco



Figura 12. Ejecución de talero sobre arco

3.6. Ejecución del tablero sobre arco

La construcción del tablero se realiza vano a vano por medio de dos cimbras autoportantes. A partir de los datos derivados de las cargas y cinemática de las autocimbras finalmente empleadas, así como del esquema de fases de ejecución, se procedió a realizar un cálculo completo evolutivo de todas las fases:

- Avance de Autocimbra Norte hasta disponer el apoyo delantero en P-12 y Autocimbra Sur hasta disponer el apoyo delantero en P-16.
- Hormigonado simultáneo desde +13.50 de P-11 a +13.50 de P-12 y desde -13.50 de P-17 a -13.50 de P-16. Tesado de dichas Fases.
- Avance de Autocimbra Norte hasta disponer el apoyo delantero en P-13. Y Autocimbra Sur hasta disponer el apoyo delantero en P-15.

- Hormigonado simultáneo desde +13.50 de P-12 a +13.50 de P-13 y desde -13.50 de P-16 a -13.50 de P-15). Tesado de dichas Fases.
- Retirada de Autocimbra Sur
- Avance de Autocimbra Norte hasta disponer el apoyo delantero en P-14.
- Hormigonado desde +13.50 de P-13 a +13.50 de P-14. Tesado de dicha Fase.
- Avance de Autocimbra Norte hasta disponer el apoyo delantero apoyo delantero en P-15.
- Hormigonado de cierre, desde +13.50 de P-14 a -13.50 de P-15. Tesado Fase Final.
- Retirada Autocimbra Norte



Figura 13. Puente finalizado

Agradecimientos

Propiedad y Dirección de Proyecto y Obra:
ADIF

Proyecto del Tramo:
TYPESA

Proyecto del Viaducto:
CARLOS FERNANDEZ CASADO, S.L.

Empresa Constructora:
UTE COPISA-COPASA

Asistencia Técnica a la Dirección de Obra:

UTE AYESA-IDEAM
INES INGENIEROS CONSULTORES

Asistencia Técnica a la Constructora:

CARLOS FERNANDEZ CASADO, S.L.
PONTEM

Referencias

- [1] Manterola, J.; Martínez, A.; Navarro, J.A.;
Martín, B. Puente arco de ferrocarril sobre el

embalse de Contreras en la línea de alta velocidad Madrid-Levante. Hormigón y Acero nº261 (2012)

- [2] Fernández Troyano, Leonardo. Camino sobre el río. Historia de los Puentes Españoles. Correos, (2013)