

Construcción del arco del viaducto de Almonte

Construction of the arch of the Almonte Viaduct

David Carnero^a, Florencio Milla^b, Agustín Alonso^a, Pedro Cavero^a

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. FCC Construcción, S.A.

^bIngeniero Industrial. FCC Construcción, S.A.

Recibido el 18 de diciembre de 2017, aceptado el 1 de agosto de 2018

RESUMEN

La ejecución del arco del viaducto de Almonte supuso el mayor reto, técnicamente hablando, de la construcción del viaducto para la línea ferroviaria de Alta Velocidad ubicado sobre la desembocadura del río Almonte en el embalse de Alcántara en la provincia de Cáceres, Extremadura. El arco fue construido por el sistema tradicional de avance en voladizo con atirantamiento provisional por medio de unos carros de avance en voladizo capaces de adaptarse a las formas cambiantes de la sección transversal del arco a lo largo de la longitud de este.

© 2020 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L.L. Todos los derechos reservados.

PALABRAS CLAVE: Carros de avance en voladizo, dovelas, sistema provisional de atirantamiento, ciclo, operación de cierre.

ABSTRACT

The construction of the arch of the Almonte viaduct supposed the greatest challenge, technically speaking, of the construction of the High Speed viaduct located over the mouth of the Almonte river into the Alcántara reservoir in Cáceres, Extremadura. The arch was constructed following the advanced cantilever method with a temporary stay system, by means of travelers capable of adapting to the changing shapes of the cross section of the arch along its length.

© 2020 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L.L. All rights reserved.

KEYWORDS: Travelers, segments, temporary stay system, cycle, closure operation.

1.

INTRODUCCIÓN

Dentro del corredor de Alta Velocidad que se está construyendo entre Madrid y Extremadura, y que en un futuro próximo conectará las capitales europeas de Madrid y Lisboa, se encuentra el viaducto de Almonte cruzando la desembocadura del río Almonte en el embalse de Alcántara, en una zona del río en que el cauce tiene una anchura de hasta 400 m. Dicho viaducto ha sido construido entre los años 2011 y 2016 por una UTE constituida por la empresa española FCC Construcción y la empresa portuguesa Conduril Engenharia S.A.

Por otro lado, cabe reseñar que la zona en que está enclavado el viaducto es una zona de un alto valor medioambiental, siendo calificada como ZEPA (zona de especial protección para las aves), por lo que el impacto medioambiental del viaducto

en el entorno debía ser mínimo, no pudiendo estar el cauce del río afectado por el viaducto. Por esta razón, durante la fase de estudio de soluciones para el viaducto, se analizaron distintas opciones para salvar el cauce, respetando de esta manera la Declaración de Impacto Ambiental. Finalmente se elige un arco de hormigón de 384 m de luz y de tablero superior para salvar el cauce del río Almonte.

Para dotar al arco de un mejor comportamiento frente a las acciones horizontales transversales (fundamentalmente frente al viento) se decide diseñar el arco de forma que arranque de la cimentación con dos ramas que se fundan en una sola a media distancia entre la clave y el arranque.

De cara a su ejecución por avance en voladizo, el arco se divide en 65 dovelas (32 dovelas por margen más la dovela de cierre), siendo todas ellas de dimensiones variables. No obs-

* Persona de contacto / Corresponding author.
Correo-e / email: dcarnerop@fcc.es (David Carnero)

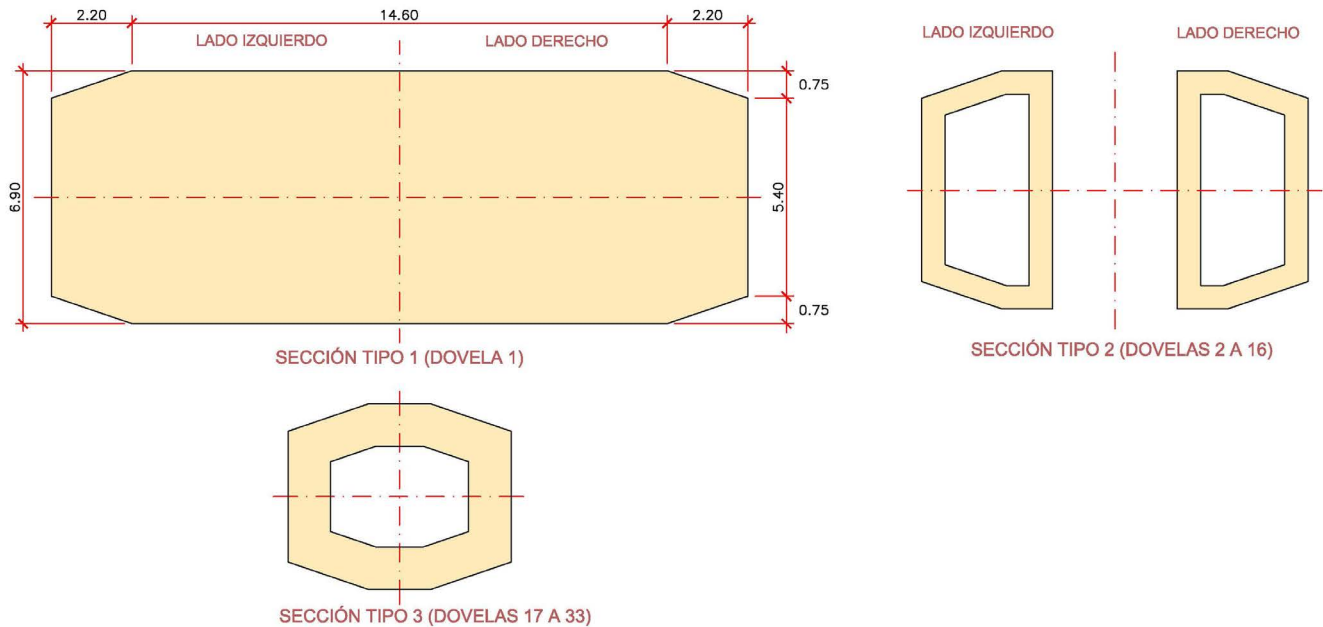


Figura 1. Secciones Transversales del arco.

tante, podemos diferenciar claramente los tramos de sección doble y sección única (figura 1):

- Sección Doble:** El arco tiene sección doble hexagonal de canto variable entre 6.90 m y 6.10 m y de pared variable entre 1.07 m y 0.64 m en los primeros 87 m de arco en ambas márgenes (dovela 2 a 15), existiendo una separación entre las caras laterales exteriores de ambas secciones de 19 m en el arranque y 8.37 m en el diafragma de unión en sección única.
- Sección Única:** En los 210 m centrales de arco (dovela 16 a 32 por ambas márgenes más la clave), este tiene una sección transversal octogonal de canto variable entre 6.10 m y 4.80 m en la clave y un espesor de pared variable entre 0.97 m y 1.16 m. La anchura de la sección también es variable disminuyendo hasta los 6 m en la clave.

Tal y como hemos comentado anteriormente, el arco del viaducto del Almonte se ha ejecutado por el sistema tradicional de avance en voladizo empleando un sistema de atirantamiento provisional formado por dos planos de 26 familias de tirantes en cada margen. Las ocho primeras familias de tirantes de cada margen se atirantaron contra las pilas principales, con sus retenidas respectivas ancladas a las zapatas de retenida, mientras que para las 18 familias restantes fue necesario el montaje de una torre de atirantamiento provisional sobre la pila principal, para conseguir la altura necesaria para que el ángulo de ataque del tirante fuera efectivo [1 y 2]. Los tirantes fueron realizados y montados por BBR PTE, empresa perteneciente al grupo FCC y de amplia experiencia a nivel internacional en el montaje y tesado de tirantes en puentes.

Para la construcción de las dovelas 3 a 15 (puesto que las dovelas 1 y 2 de cada margen se ejecutaron in situ, con el objeto de poder anclar los carros en ellas) se emplearon dos carros de avance en voladizo por cada margen trabajando de forma independiente para ejecutar el tramo de arco de sección doble. Una vez avanzados los carros a la dovela 16 fue necesario

ensamblar los dos carros de cada margen en altura, consiguiendo que trabajaran como un único carro, para poder ejecutar las dovelas del tramo de arco de sección octogonal única. Tras ejecutar los voladizos de ambas márgenes tan solo restaba por ejecutar el cierre del arco en la clave, cuya operación fue clave en la geometría final del arco, y la ejecución de los diafragmas interiores del arco.

Las mediciones de los elementos principales empleados en la ejecución del arco del viaducto sobre el río Almonte son las siguientes:

- Hormigón autocompactante HAC-80: 10 217 m³
- Acero pasivo B-500S: 2 299 000 kg
- Acero estructural en torres de atirantamiento provisional: 954 000 kg
- Acero en estructuras auxiliares de atirantamiento: 660 000 kg
- Acero en tirantes provisionales: 887 000 kg
- Carros de avance en voladizo autoestables y automotrices: 4 uds (2 uds por margen de 250 000 kg cada pareja)
- Grúas autoestables sobre el arco para trasiego de materiales: 4 uds (2 uds por margen)

2.

EJECUCIÓN DE LAS CIMENTACIONES DEL ARCO

Las cimentaciones del arco son cimentaciones conjuntas tanto del arco como de las pilas principales (P6 y P15) y se resolvieron con zapatas de volúmenes entre 6 000 y 7 000 m³ cuyo plano principal de apoyo es ortogonal a la directriz de cargas del arco en el arranque y la parte superior se materializa con un plano horizontal para poder apoyar las pilas principales (figura 3). En el caso de la cimentación del arco de la margen Norte tuvo que cambiarse ligeramente la superficie principal de apoyo, ya que se detectó una zona de roca algo más alterada



Figura 2. Ejecución del arco del viaducto de Almonte.

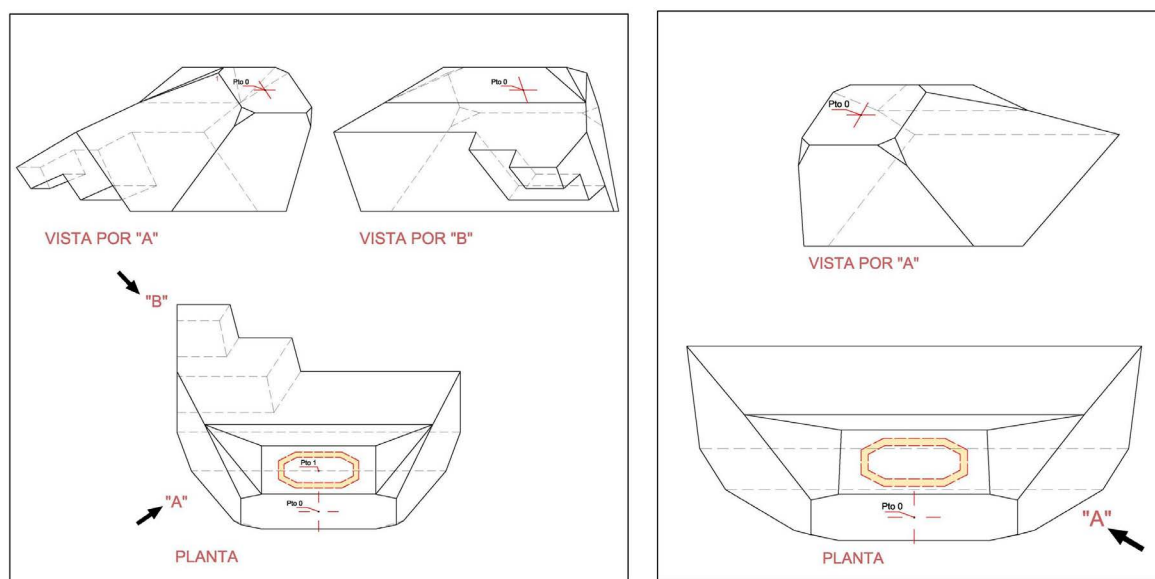


Figura 3. Cimentaciones del arco del viaducto de Almonte (Norte y Sur).

de lo deseable, por lo que tuvo que profundizarse más la excavación en la dirección de la directriz de cargas del arco. Estas cimentaciones se diseñaron para una tensión trabajo de 1 200 kPa en combinación característica, aunque lo que más condicionó su diseño fue la ausencia de movimientos importantes en situaciones de servicio, movimientos que podrían ser muy perjudiciales para la estructura.

El primer gran problema que hubo que afrontar en la ejecución de estas cimentaciones fue el derivado de la excavación necesaria para alojar la zapata. Estas zapatas tenían una dimensión en altura de casi 15 m en el caso de la cimentación de la margen Sur y de más de 18 m en el caso de la cimentación de la margen Norte, excavaciones equivalentes a las necesarias para 5-6 plantas de sótanos. Para afrontar estas excavaciones

fue necesario realizar un plan de excavación por fases y unos sostenimientos importantes en los taludes de excavación.

Una vez realizada la excavación de cada cimentación se procedió a la ejecución propiamente dicha de la cimentación de cada margen del arco. Las mediciones principales de cada cimentación en términos de hormigón y acero son los siguientes:

- Cimentación Margen Norte: 7 050 m³ HA-30 y 570 000 kg B500S
- Cimentación Margen Sur: 6 350 m³ HA-30 y 645 000 kg B500S

Cabe reseñar que tuvo que emplearse cemento sulforresistente en el hormigón que se empleó en las cimentaciones del arco,



Figura 4. Fase 4 de hormigonado de la cimentación sur del arco.

al considerarse que la zapata enterrada podía encontrarse en un ambiente agresivo.

Debido a los grandes volúmenes de que constaban ambas cimentaciones tuvo que dividirse en varias fases el hormigonado de las zapatas, asegurando el cosido a rasante de unas fases con otras (figura 5). De esta forma se consiguieron hormigonados de volúmenes inferiores a 1 000 m³, máximo volumen que se consideró prudente acometer en un día de trabajo con los medios existentes en la obra.

Gracias a los dos motivos expuestos anteriormente no fue necesario realizar un control térmico del fraguado de las cimentaciones:

- a) Al emplear hormigón sulforresistente en las cimentaciones se consiguió reducir enormemente el calor de fraguado del hormigón, como consecuencia de un menor calor de hidratación del cemento.
- b) La subdivisión del hormigonado en varias fases de menos de 1 000 m³ cada una (ejecutadas en intervalos de tiempo suficientes como para que la fase anterior se haya enfriado) y con espesores de tongada por debajo de los 3 m evitó que se alcanzaran altas temperaturas en el fraguado del hormigón.

Para asegurar la geometría de las esperas del arco en la cimentación se diseñó una estructura metálica auxiliar embebida en la zapata que pudiera utilizarse a modo de plantilla y así asegurar la geometría y la inclinación de la sección de arranque.

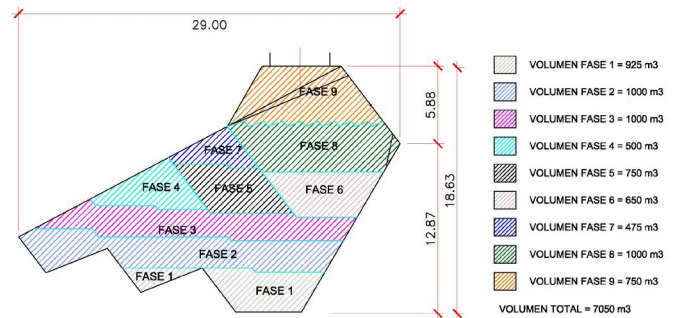


Figura 5. Fases de hormigonado de la cimentación norte del arco.

3. EJECUCIÓN DE LAS DOVELAS 1 Y 2 DEL ARCO

Para poder anclar los carros de avance en voladizo encargados de ejecutar el arco del viaducto de Almonte fue preciso ejecutar *in situ* las dovelas 1 y 2 del arco (figura 7), encofradas y cimbradas contra el terreno.

Las dovelas 1 y 2 tienen una longitud según la directriz del arco de 4.17 m y 4.50 m respectivamente, teniendo la primera una sección maciza octogonal única de dimensiones 19x6.9 m con chaflanes de 2.20 m de longitud y 0.75 m de altura mientras que la dovela 2 corresponde al inicio de la zona del arco formada por dos patas, teniendo cada rama una sección cajón

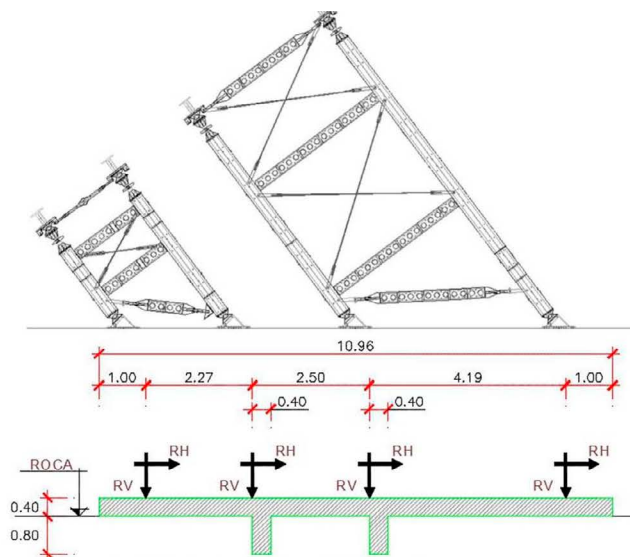
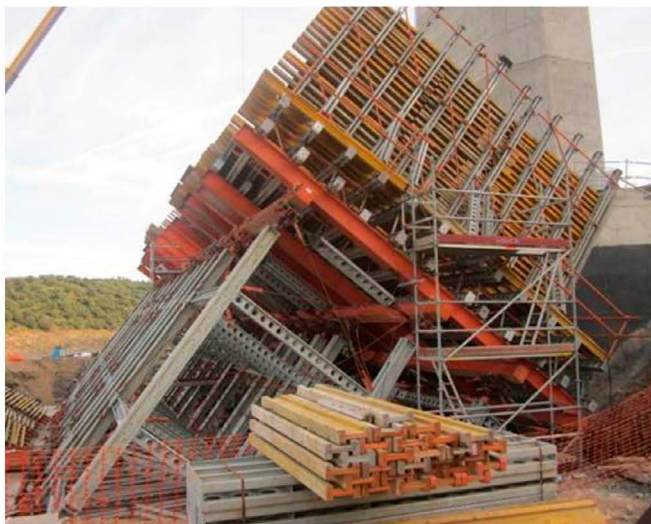


Figura 6. Cimbra empleada en la ejecución de las dovelas 1 y 2 del arco.



Figura 7. Dovelas 1 y 2 del arco.

hexagonal de 6.90x3.69 m con chaflanes de longitud 2.20 m y altura 0.75 m en las esquinas exteriores.

Las grandes dimensiones y volúmenes que atesoran ambas dovelas hacen que las cargas que tuvo que recibir la cimbra empleada en la ejecución de estas fueran muy grandes, debiendo transmitir estas al terreno, por lo que el empleo de cimbra convencional estaba descartado. Por otro lado la cimbra tenía que ser capaz de trabajar perpendicularmente a la directriz del arco, para evitar grandes movimientos debidos al hormigonado.

Por estos motivos se empleó una cimbra, compuesta por puntales inclinados de alta capacidad de carga (hasta 1 000 KN por pata), fabricados a partir de perfiles en "C" laminados en frío de canto 286 mm, espesor 6 mm y acero S355, empresillados dos a dos, armados mediante horizontales en ambas direcciones compuestas a base de perfiles aligerados, y diagonalizados mediante barras de rosca rápida, reduciendo de esta manera enormemente la longitud de pandeo de los puntales. Estos puntales se anclaban a la cimentación mediante unas placas en cuña rotuladas que evitaban la aparición de momentos de empotramiento en los puntales. Por otro lado, las torres disponen de gatos mecánicos niveladores

de forma que no es necesario recurrir a cuñas u otros elementos para su aplomado y regulación en altura, siendo posible su descimbrado sin necesidad de retirar completamente los puntales.

Debido a la transmisión de fuerzas horizontales importantes a la cimentación, fue necesario diseñar dos rastrillos perpendiculares a la directriz del arco, que impidieran el deslizamiento de la cimentación (figura 6).

En la ejecución de las dovelas 1 y 2 se dejaron pasatubos que permitieran posteriormente el anclaje de la viga principal del carro y de su amarre trasero, anclajes necesarios como veremos posteriormente para empotrar la viga principal del carro y que esta pueda funcionar en voladizo durante el hormigonado de la dovela 3, y por otro lado permitir el avance del carro de la dovela 3 a la dovela 4.

4. CARROS EMPLEADOS EN LA EJECUCIÓN DEL ARCO EN VOLADIZO

4.1. Descripción elemental de los carros de avance en voladizo empleados

Sin duda uno de los aspectos más complicados en la ejecución del viaducto y sobre el que recaería el éxito o fracaso en la construcción del arco era la elección y el diseño de unos carros de avance en voladizo con la versatilidad adecuada para adaptarse en todo momento a la geometría cambiante del arco, teniendo además la posibilidad de realizar tanto las dovelas de sección doble como las dovelas de sección única [3].

Dichos carros de avance debían ser capaces de resistir el peso fresco de una dovela trabajando en voladizo anclados en la dovela anterior y soportar presiones del hormigón de hasta 90 KN/m² (al tratarse de hormigón autocompactante) y por supuesto debían ser autoestables y automotrices.

El suministrador de los carros de avance fue una empresa española (Rúbrica) y el diseño de detalle fue llevado a cabo por dicha empresa en colaboración con los Servicios Técnicos de FCC.

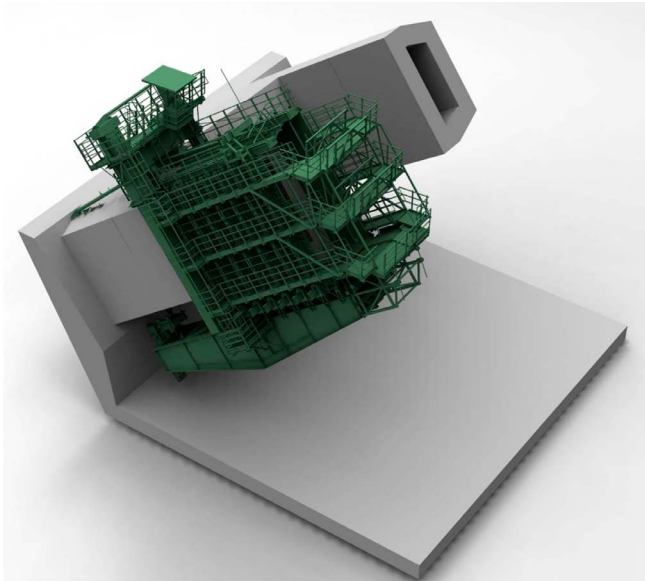


Figura 8. Modelo 3D del carro de encofrado utilizado.

Los carros de avance tienen dos esquemas estructurales distintos para cada una de las dos operaciones principales que deben llevar a cabo [4]:

- a) Hormigonado: El esquema resistente de los carros de avance para permitir el hormigonado de una determinada dovela se basa en una ménsula, empotrada en la dovela anterior. Para ello, cada carro de encofrado está formado por una viga principal inferior de canto variable sobre la que apoyan los encofrados para la ejecución de las dovelas y que se empotra en la dovela anterior mediante un doble apoyo. El apoyo traccionado se resuelve con barras de acero de alto límite elástico pretensadas contra la dovela y ancladas al carro (amarre principal), mientras que el comprimido simplemente con un tope metálico, situado en la cola del carro.
- b) Movimiento de avance a la siguiente dovela: En esta configuración el peso del carro se transfiere del amarre principal del carro a la cara superior de la dovela a través del pórtico principal. El avance de los carros se hace mediante un sistema hidráulico implementado tanto en la viga inferior como en la parte superior del pórtico principal. En la parte inferior del carro, el sistema hidráulico reacciona contra la parte inferior del arco, mediante un sistema de barras anclado en la cola del carro y pretensadas contra la dovela $n-2$ (siendo la dovela n la dovela recién hormigonada). Por otro lado, el sistema hidráulico de la parte superior reacciona contra el encofrado de la dovela recién hormigonada, gracias a un sistema de llaves de cortante embebidas en la dovela anterior e implementado en este. Ambas operaciones deben hacerse de manera sincronizada resultando un movimiento muy similar al de las orugas. La operación de avance se centraliza en un módulo existente en la parte superior del pórtico.

4.2. Montaje de los carros

Una vez ejecutadas *in situ* las dovelas 1 y 2 del arco dio comienzo el montaje de los carros. El montaje de los carros en las

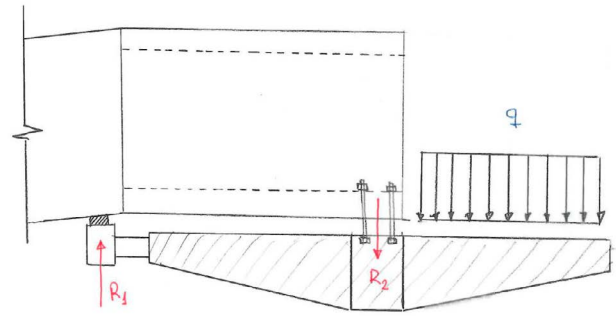


Figura 9. Esquema resistente del carro de avance frente al hormigonado de una dovela.

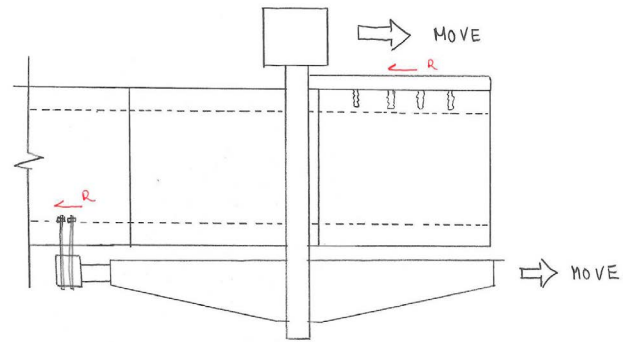


Figura 10. Esquema resistente del carro frente al avance.

dovelas 1 y 2 fue una operación muy compleja, realizada desde la península de trabajo situada en el arranque del arco, que necesitó incluso de un montaje en blanco del conjunto. Dicha operación consta de las siguientes operaciones:

- Premontaje de viga principal en solera.
- Anclaje de amarre principal a dovela, mediante 4 barras de Tesado Tipo Macalloy de 75mm.
- Izado de viga principal con ayuda de medios auxiliares de elevación (figura 11).
- Ensamblado del pórtico de traslado.
- Montaje de los paneles de fondo, panel de chaflán, paneles laterales exteriores e interiores, balcón frontal y de amarre.
- Montaje del encofrado interior.
- Izado y montaje de las plataformas superiores con la central hidráulica y el cuadro eléctrico.
- Montaje de protecciones colectivas, escalera de acceso principal y cilindros de elevación y descenso del carro.
- Montaje de encofrado superior.

Con esta última operación el carro queda preparado para la ejecución de la dovela 3 y en general para la ejecución del arco por avance en voladizo (figura 12).

4.3. Unión de carros para ejecución de sección única

El primer problema que nos encontramos a la hora de realizar la unión de los carros de ambas patas en la dovela D16 fue

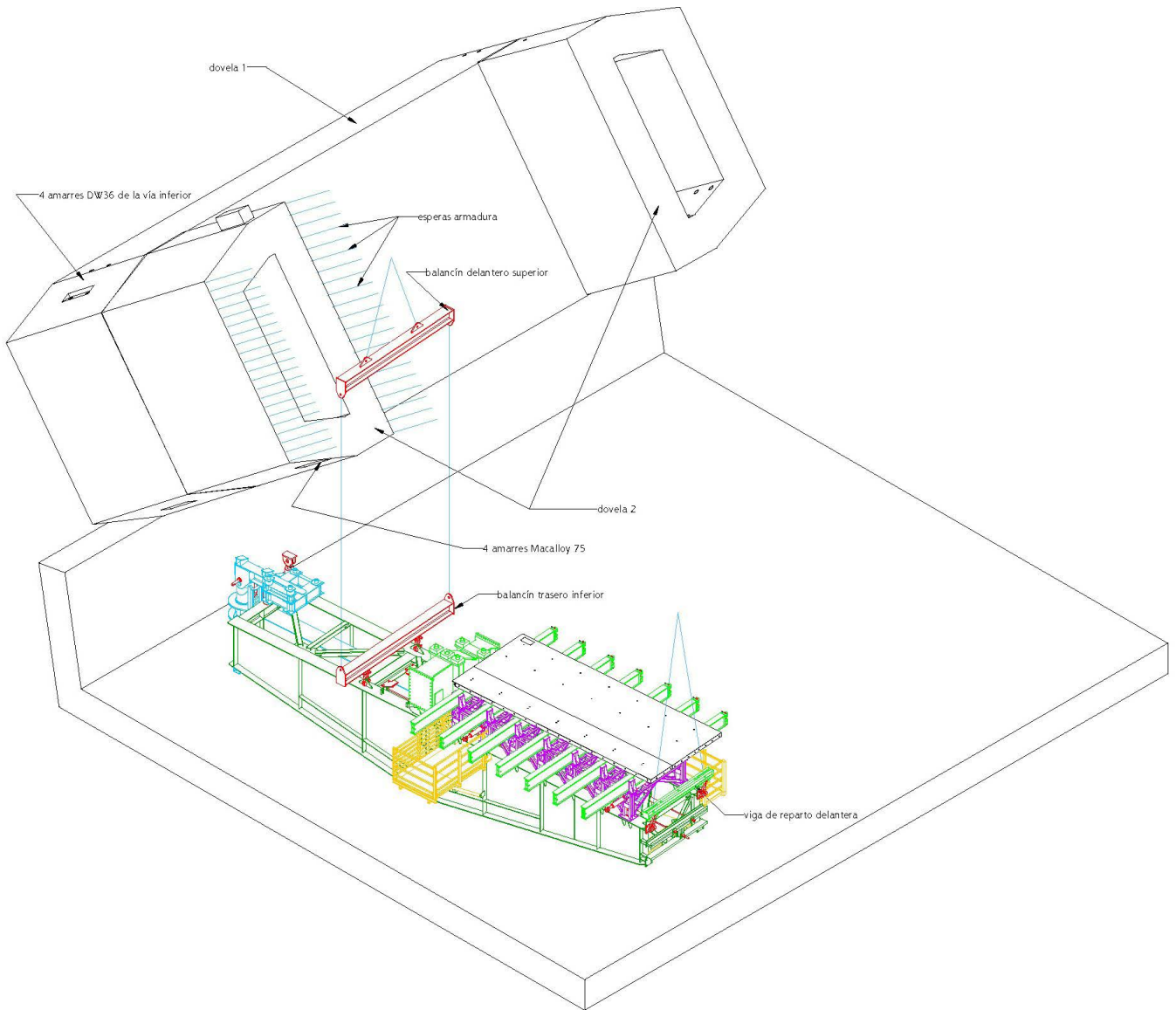


Figura 11. Izado de la viga principal de los carros de avance y anclaje en dovelas 1 y 2.

la interferencia entre ambos para la ejecución de las dovelas D13, D14 y D15 de una misma margen. Por esta razón tuvo que idearse un procedimiento que resolviera las interferencias entre ambos carros (figura 13), previo a la unión propiamente dicha. Dicho procedimiento consistía básicamente en la ejecución de las dovelas D13, D14 y D15 en una única rama dentro de la misma margen, desmontando posteriormente la cara interior del encofrado del carro situado en esa rama, que hubiera interferido con la ejecución de las dovelas D13, D14 y D15 de la otra rama.

Una vez ejecutadas las dos ramas de las dovelas D13, D14 y D15 de una misma margen dio comienzo el procedimiento de unión de ambos carros propiamente dicho y el avance como carro único hasta la dovela D16, uniendo ambos carros mediante las vigas transversales inferiores de la solera.

4.4. Desmontaje y descenso de la viga principal de los carros

Una vez finalizada la ejecución del arco, fue necesaria la retirada de los carros de encofrado para poder empezar a ejecutar



Figura 12. Montaje de los carros de avance una vez anclados en las dovelas 1 y 2.

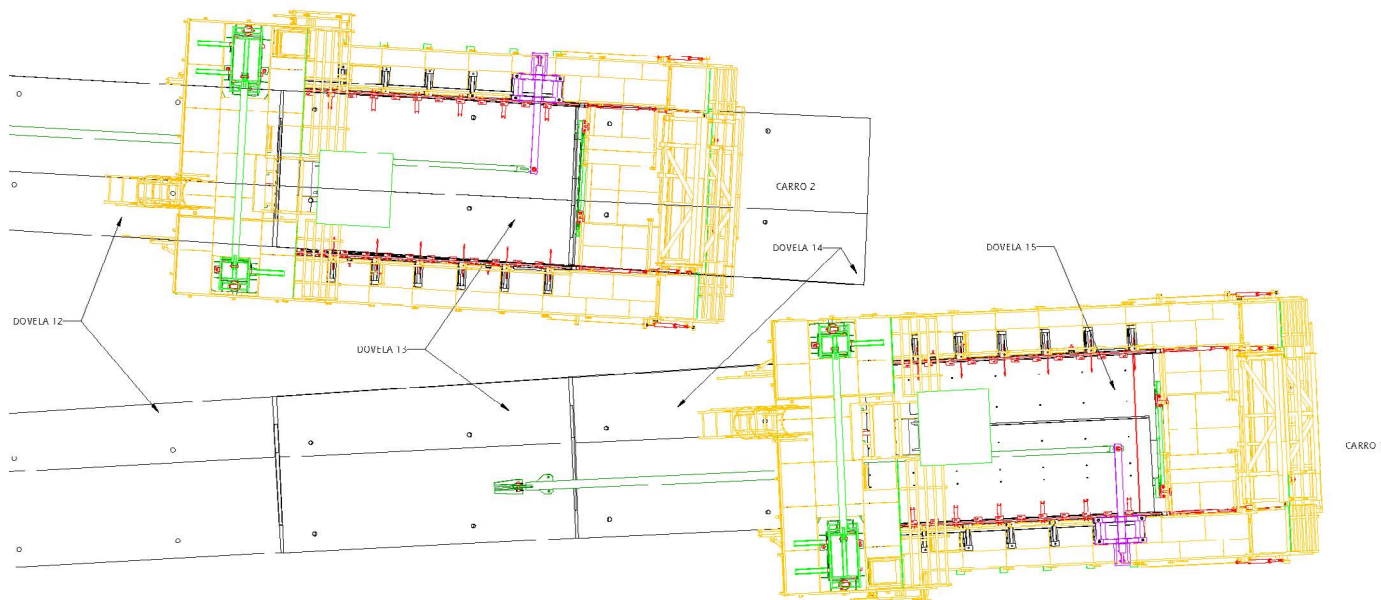


Figura 13. Interferencias entre carros en la ejecución de las dovela D13, D14 y D15.



Figura 14. Unión de los carros de la margen sur.

el tablero sobre el arco, aspecto que lógicamente tuvo que tenerse en cuenta para el control geométrico del arco, ya que la retirada de los carros es equivalente a la introducción de una carga puntual ascendente en la clave del arco igual al peso de los carros (2x250 t).

En primer lugar se procedió a la retirada de los carros de avance empleados en la ejecución del voladizo de la margen sur (ya que fue el primer voladizo en finalizar). La retirada total de los carros de la margen sur produjo una flecha ascendente en el frente de la dovela 32 de más de 10 cm.

Concluida la dovela de cierre, la cual se ejecutó con los carros de la margen norte, se procedió al desmontaje y descenso de los carros, ya con el arco cerrado. Cambiada la configuración estructural, la flecha ascendente obtenida al descender los carros fue mucho menor (del orden de 3 cm).

Tras un largo estudio de alternativas para realizar el desmontaje de los carros, finalmente se decidió desmontar estos en pequeñas piezas capaces de ser manipuladas por las grúas torre sobre el arco, dejando las vigas principales ancladas bajo el arco y el encofrado interior para ser descendidos posteriormente al embalse mediante una maniobra de *Heavy Lifting*, lugar donde serían trasladados a las plataformas de trabajo junto al arranque del arco con la ayuda de una pontona modular. De esta forma se consiguió conjugar todas las ventajas del desmontaje manual de las piezas de los carros de acceso cómodo, con la seguridad y rapidez de una maniobra de *Heavy Lifting* para la zona inaccesible de los carros por culpa del arco.

Para realizar la maniobra de *Heavy Lifting* se diseñó una estructura metálica ex profeso que, apoyada en la parte superior del arco fuera capaz de puentear la sección transversal de este, permitiendo que los cables de descenso fueran por los laterales del arco. Por esta razón, también fue necesario diseñar unas vigas de cuelgue, que permitieran colgar las dos vigas principales del carro de ellas (figura 15).

El descenso de los carros se realizó empleando cuatro gatos HL-0706 dispuestos formando un rectángulo en planta, con 5 cordones de acero $\Phi 15,2$ mm cada gato con una carga de rotura de 260 kN cada uno, disponiendo una longitud aproximada de 100 m de cable para una carrera estimada de 80 m (al encontrarse el nivel del embalse en el momento del descenso en una cota inferior a la habitual). Suponiendo en el peor de los casos una carga mayorada por 1,5 y que la mayor parte de la carga era cogida con los gatos traseros, los cables debían trabajar por debajo del 40% de la carga de rotura, valor adecuado y habitual al empleado en este tipo de maniobras [5].

Una vez realizado el enfilado y precarga manual de los cables de pretensado se procedió al tesado sincronizado de los

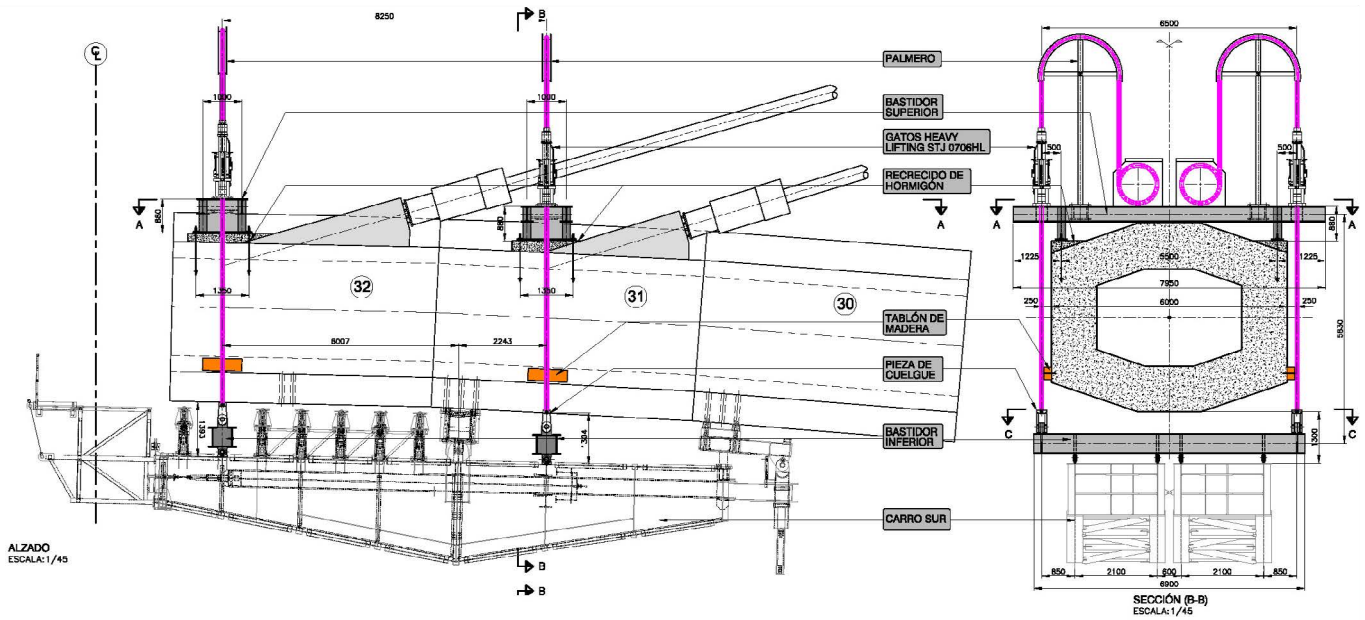


Figura 15. Croquis de las estructuras auxiliares empleadas en el descenso de los carros.

cables de pretensado hasta un valor igual al peso teórico de los carros (con el reparto adecuado de cargas entre los gatos delanteros y los gatos traseros) y posteriormente al destesado de las barras de anclaje del amarre principal, de forma que las vigas principales del carro quedaran suspendidas únicamente con los cables de pretensado de los gatos de *Heavy Lifting*. Cuando los gatos cogieron la carga esperada en la maniobra y se comprobó que la velocidad del viento era inferior a 12 m/s dio comienzo el descenso de los carros al embalse, a una velocidad media de 8-10 m/h (figura 16). En el momento de aproximación de los carros de encofrado a la pontona se redujo la velocidad de descenso hasta conseguir que los gatos perdieran completamente la carga, transfiriéndose esta a la pontona y terminando de esta manera la maniobra.

5. CICLO DE EJECUCIÓN DE UNA DOVELA

El ciclo de ejecución de una dovela “n” comprende una serie compleja de actividades entrelazadas que permiten ejecutar un segmento del arco avanzando en voladizo. Dicha serie de actividades, repetidas de una forma cíclica permiten ejecutar el arco en su totalidad, si no tenemos en cuenta las singularidades que aparecen a lo largo de este, como pueden ser la ejecución de diafragmas de pila, la unión de las dos ramas en una o el cierre en la dovela de clave, las cuales ha sido preciso ir resolviendo a medida que han ido apareciendo [6].

Las actividades que conforman el ciclo de ejecución de una dovela cualquiera “n” son las siguientes:

1) **Desencofrado de la dovela n-1.** Una vez realizado el hormigonado de la dovela anterior (n-1), es preciso proceder al desencofrado de tapes y del encofrado interior. Para ello es necesario retirar los espadines que unen el encofrado exterior con el interior y retirar los puntales

que aseguran el encofrado interior, una vez alcanzada una resistencia en el hormigón de al menos 20MPa y nunca antes de las 12 h desde la finalización del hormigón de la dovela. También es necesario retirar la parte inferior del encofrado interior con la ayuda de medios auxiliares de elevación.

2) **Destesado de las barras Macalloy del amarre principal** de los carros de avance en voladizo, transfiriendo la carga debida al peso propio del carro al pórtico y este a su vez a la parte superior de la dovela anterior hormigonada. Para poder proceder a la transferencia de carga del amarre principal del carro al pórtico es preciso que el hormigón de la dovela anterior haya alcanzado al menos una resistencia a compresión de 40 MPa (resistencia que solía alcanzarse a las 36 h).

Para este efecto se utilizó un hormigón que alcanzara altas resistencias a edades tempranas, algo conseguido fundamentalmente gracias a la alta cantidad de finos presentes en el cemento utilizado, empleando cantidades de cemento inferiores a las máximas de la norma española (460 kg/m³ frente a un máximo de 500 kg/m³ en la EHE-08)

3) **Avance del carro** por medio del sistema hidráulico implementado en la viga principal y en la tapa superior, reaccionando contra el amarre trasero previamente tesado y contra unos bulones de cortante dejados en la losa superior de la dovela anterior, trabajando colgado del pórtico según el segundo esquema resistente que veíamos en el apartado 3.1. Para proceder al avance del carro es preciso que el hormigón de la dovela anterior haya alcanzado al menos una resistencia a compresión de 50 MPa resistencia que se alcanzaba a las 36 – 48 h.

4) **Tesado de las barras Macalloy del amarre principal contra el frente de la dovela hormigonada anteriormente.** En ese momento se transfiere la carga del pórtico del carro a la viga principal, empezando a funcionar esta en ménsula.



Figura 16. Descenso de los carros de la margen norte a pontona modular.

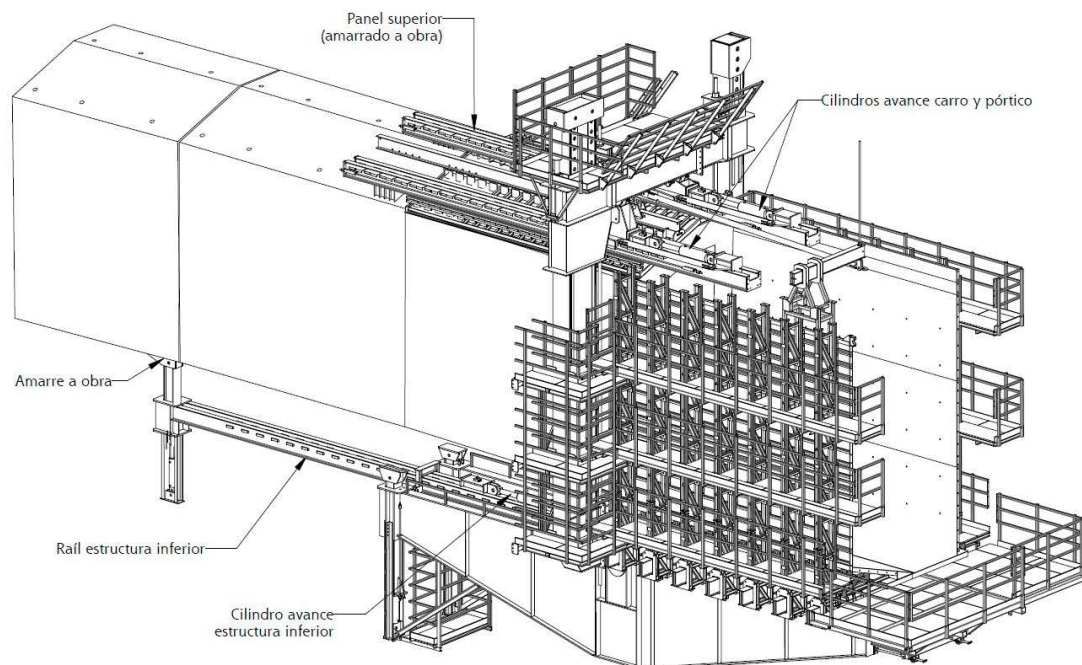


Figura 17. Avance y tesado del carro de avance en voladizo en la dovela n-1.

- 5) Destesado de las barras Macalloy del amarre trasero, anclado en la dovela n-3 (siendo la dovela n la dovela en ejecución y la dovela n-1 la hormigonada anteriormente).
- 6) Recogida de la cola del carro y tesado de las barras de acero activo del amarre trasero en la dovela n-2, de forma que el tope metálico situado en la cola esté en contacto con el hormigón, y de esta forma puedan transmitirse compresiones.
- 7) Posicionamiento topográfico de los carros de avance en voladizo según el procedimiento constructivo y teniendo

en cuenta contraflecha necesaria por deformabilidad de los carros y condicionantes térmicos en arco y tirantes. Para que este posicionamiento se viera afectado lo menos posible por el gradiente térmico en el hormigón del arco se intentó realizar el posicionamiento de los carros a primera de la mañana, momento en el que el gradiente térmico en el arco sería muy próximo a cero. Para el posicionamiento topográfico de los carros se emplearon 4 prismas situados en el frente de hormigonado de cada carro, los cuales se encontraban perfectamente referencia-

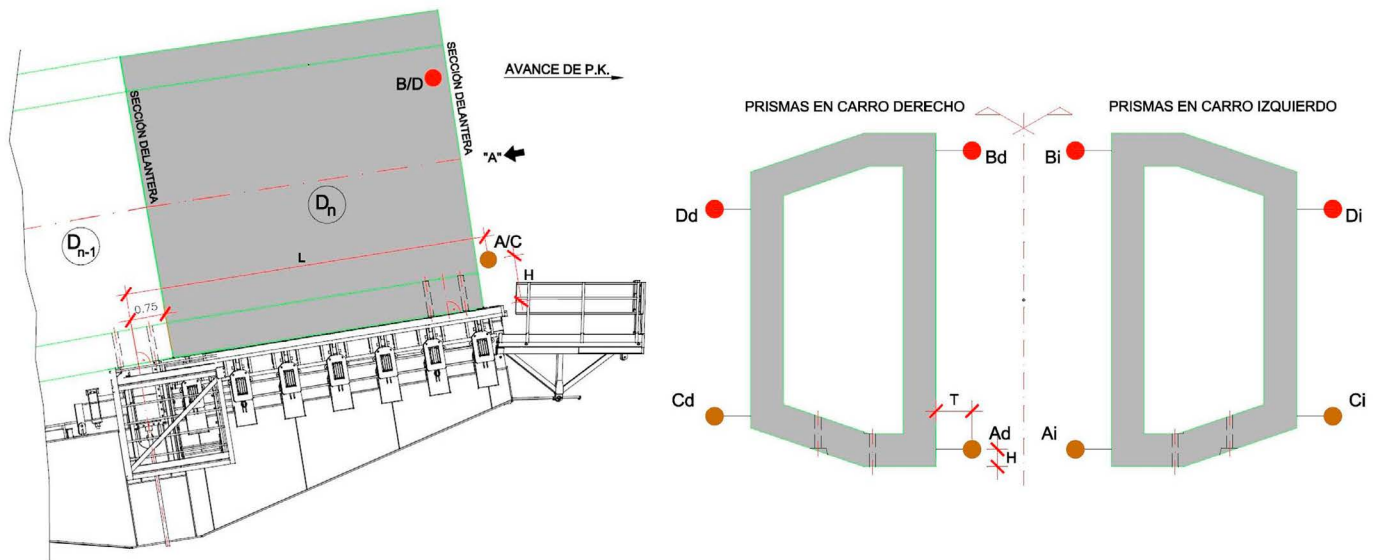


Figura 18. Prismas empleados en el posicionamiento de los carros de avance.

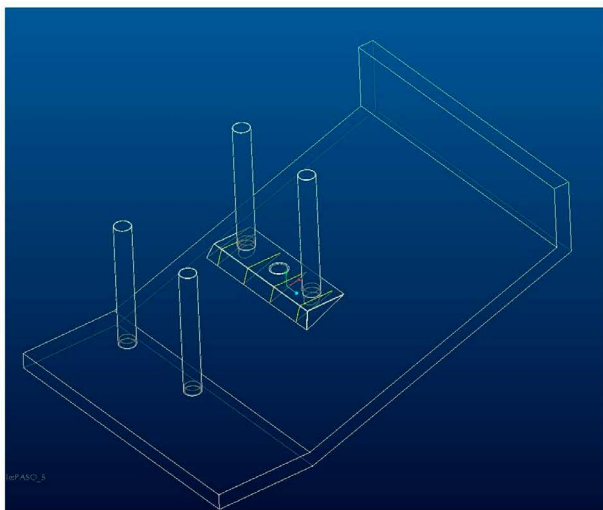


Figura 19. Plantilla para el anclaje del amarre principal de los carros.

dos a los vértices exteriores de la sección transversal (figura 18). Estos prismas se posicionaban mediante una estación total situada en terreno firme.

Para controlar los movimientos del voladizo durante la ejecución de una dovela, se analizaba la posición de los prismas del frente del carro en 4 momentos distintos del ciclo, pudiendo corregir en todo momento la contraflecha del carro en el caso de que los movimientos durante el ciclo se desviaran de los teóricos.

- Posicionamiento inicial del carro, una vez avanzado, con este en vacío.
- Posicionamiento del carro tras el ferrallado y el encofrado de la dovela.
- Posicionamiento del carro tras el tesado de la familia de tirantes de la dovela n-1
- Posicionamiento del carro tras el hormigonado de la dovela.

La posición de los prismas debía compararse con la posición teórica de cada fase corregida con las temperaturas registradas por la instrumentación en hormigón y tirantes.

- 8) **Montaje de la plantilla de barras Macalloy del amarre principal del carro.** Consiste en el montaje de un bastidor de posicionamiento de los 5 pasatubos necesarios para realizar el anclaje de cada uno de los dos carros una vez avanzados estos para ejecutar la dovela n+1 (figura 19). Esta estructura siempre estaba referida al tape de la losa inferior.
- 9) **Izado y montaje de la armadura y tape de los hastiales de la dovela,** previamente premontado el conjunto en las penínsulas de trabajo. Este premontaje permitió una optimización del ciclo y la reducción considerable de los trabajos en altura dentro de la dovela (figura 20). En las dovelas de rama única las barras de anclaje de los tirantes iban embebidas en los hastiales, por lo que fue preciso



Figura 20. Izado y montaje de un módulo de armadura de hastial.

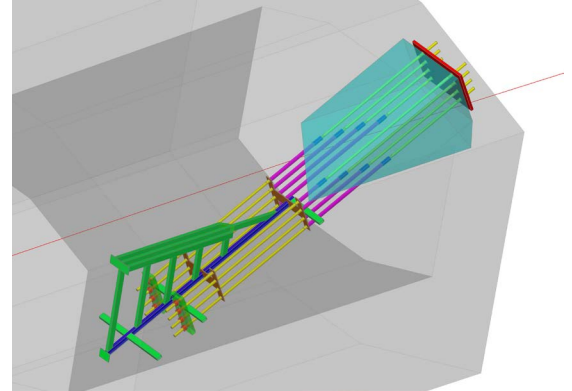
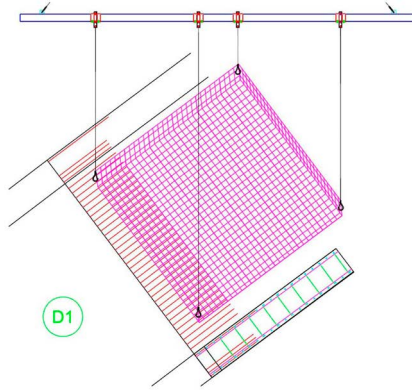


Figura 21. Bastidor de barras Macalloy en hastiales de sección única.

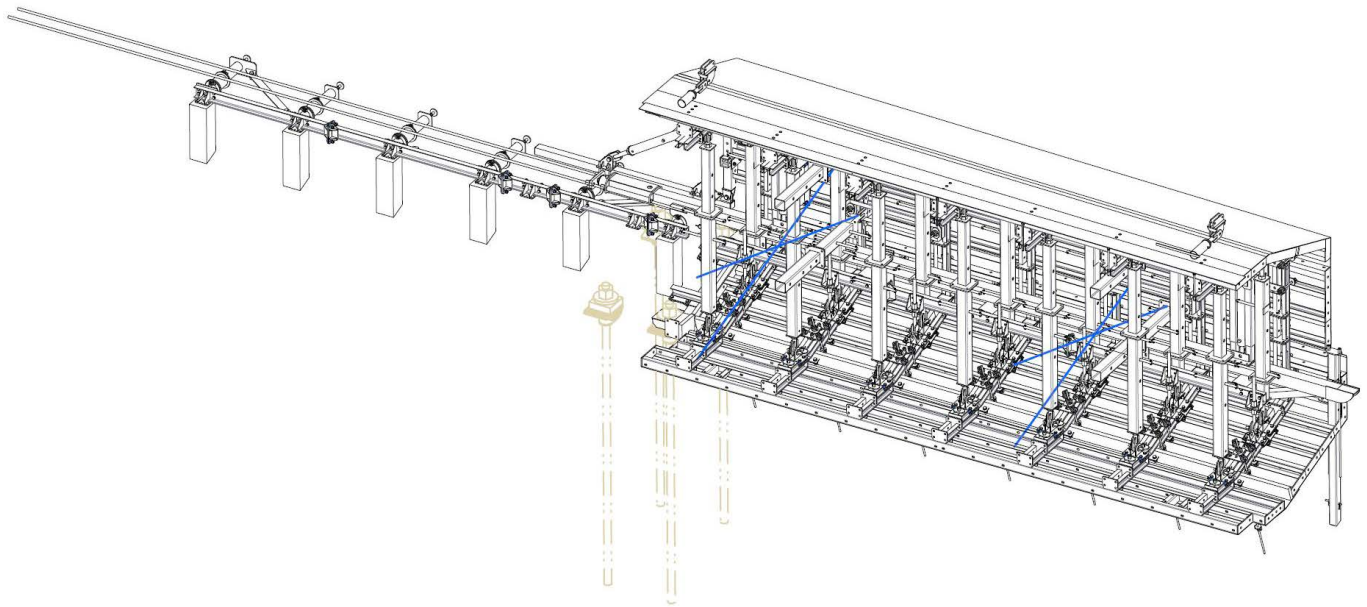


Figura 22. Avance hidráulico del encofrado interior.

diseñar una estructura de posicionamiento de las barras referida al tape e individual para cada tirante, que asegurara el ángulo de inclinación y de azimut de cada tirante, así como la posición relativa en la dovela. Para ello se realizaron modelos 3D de cada estructura de posicionamiento (figura 21). El premontaje de la ferralla del hastial se realizaba ya con la estructura de posicionamiento montada.

Estos bastidores consistían básicamente en una estructura tubular referenciada respecto de la estructura del tape del hastial, que constaba de sendas plantillas separadas una cierta distancia para permitir disponer las barras Macalloy en un determinado azimut y una determinada inclinación.

10) **Ferrallado *in situ* de la losa inferior.** Esta armadura no podía premontarse como consecuencia de la interferencia con la plantilla de amarre de los carros cuya ubicación era muy importante respetar, ya que un error superior a los dos centímetros podía imposibilitar el anclaje de los carros en la dovela en ejecución, una vez avanzados los carros.

11) **Montaje de la parte inferior del encofrado interior** con la ayuda de medios de elevación. Una vez aprobado el montaje de la ferralla se procedía a la limpieza del interior y al posterior encofrado de la parte superior de la losa inferior. Este encofrado se premontaba a la medida correcta en el suelo y se colocaba en la dovela en ejecución con ayuda de medios de elevación (fundamentalmente las grúas sobre el arco). Una vez montado, se procedía al cosido de la pieza de encofrado contra el fondo por medio de barras dywidag.

12) **Avance hidráulico de los laterales y de la parte superior del encofrado interior.** Cuando se montaba el encofrado de la parte superior y se preparaban los rodillos de avance de los paneles laterales interiores del encofrado interior se procedía al avance de este a través de los patines dispuestos para este fin (figura 22). Finalizado el avance del encofrado interior se procedía al montaje de espadines de cosido entre los paneles exteriores del encofrado y el encofrado interior.

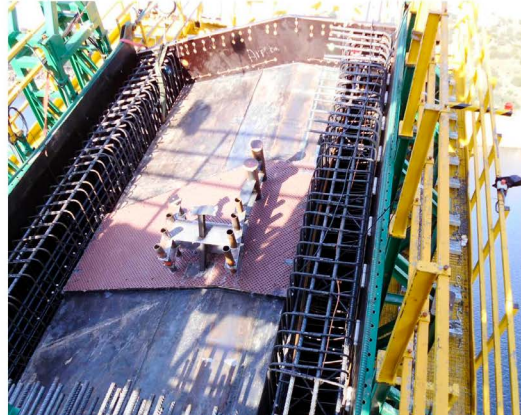
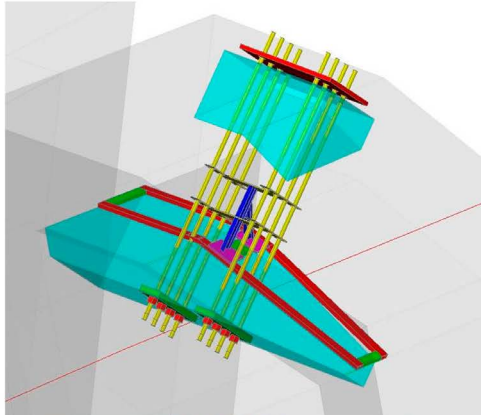


Figura 23. Bastidor de barras Macalloy en losa superior en dovelas de sección doble.

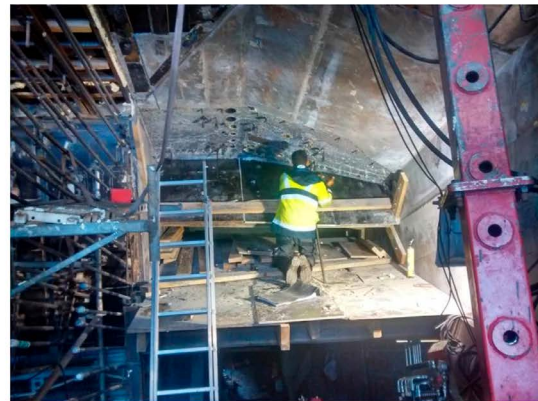
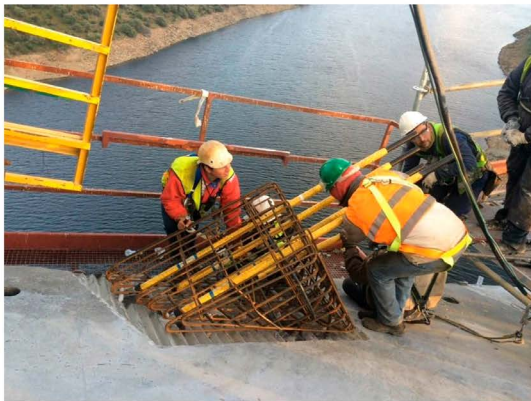


Figura 24. Ejecución de un mogote exterior y ejecución de un mogote interior.

13) **Montaje de plantilla y estructura de posicionamiento de las barras de anclaje de los tirantes** en la losa superior de la dovela, en el caso de las dovelas hexagonales de ramas separadas. En este caso, el tirante era necesario anclarlo en la losa superior de la dovela para lo que era preciso dejar una serie de pasatubos con la inclinación y azimut adecuados que permitieran el anclaje del tirante por medio de unas barras de acero activo que fueran hormigonadas posteriormente conjunto a una pieza de hormigón interior y otra exterior a la dovela. De la misma forma que en el caso de los bastidores en hastiales, se realizaron modelos 3D de la estructura de posicionamiento de los pasatubos, la cual era única para cada dovela (figura 23).

Para conseguir una superficie intencionadamente rugosa en la zona de salida de las barras de anclaje, necesaria para transmitir el rasante del tirante a la dovela, se disponía una membrana huevera de HDPE contra las superficies encofradas, de forma que se consiguiera el acabado requerido.

14) **Ferrallado *in situ* de la losa superior.** Este ferrallado tampoco era susceptible de ser premontado, por la unión con los hastiales y la existencia de plantillas, de forma que tenía que realizarse *in situ*.

15) **Avance hidráulico del encofrado de la losa superior.** De la misma forma que con la losa inferior, finalizado el montaje de ferralla, se procedía a la limpieza y posterior encofrado

de la losa. Para posicionar la parte superior del encofrado de la losa superior se utilizaba un sistema hidráulico implementado en el propio encofrado, el cual se avanzaba desde la dovela n-1 hasta la dovela en ejecución, utilizando para ello unos patines anclados al pórtico.

16) **Ejecución de mogotes en la dovela n-1.** Una vez realizado el avance del encofrado de la losa superior se procede a la ejecución de los mogotes exteriores e interiores (en el caso de dovelas hexagonales de ramas separadas), los cuales se construyen contra el hormigón de la dovela (figura 24).

Un mogote es una pieza prismática de hormigón armado adherida a la dovela que permite el anclaje y tesado del tirante contra el arco. La ejecución de estos mogotes se realiza con la ayuda de plataformas trepantes ancladas al hastial del arco (en el caso de los mogotes exteriores) y de plataformas interiores portantes (en el caso de los mogotes interiores), siendo hormigonados con medios auxiliares de elevación.

Cabe reseñar que no se podían ejecutar los mogotes hasta que no se procedía al avance del encofrado superior, una vez realizado el ferrallado de la losa superior de la dovela. Si avanzaba el encofrado superior, este tapaba completamente la superficie de anclaje de los mogotes. Este hecho motivó que el ciclo durara entre 2 y 3 días más.

17) **Posicionamiento y tesado del bastidor de anclaje del tirante al mogote exterior del arco.** Para realizar dicho

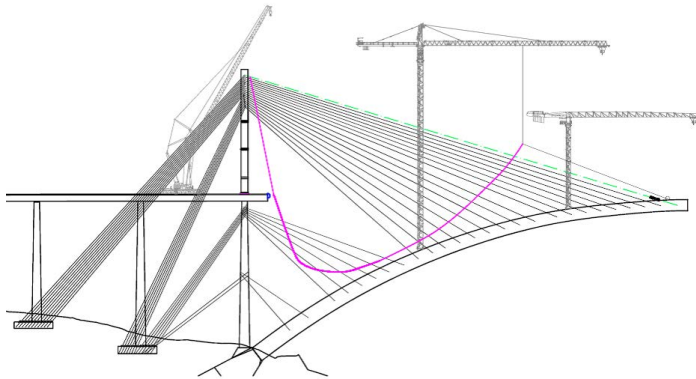


Figura 25. Montaje de un tirante de tiro una vez anclado el terminal en el pilono metálico.



Figura 26. Izado de un tirante para su anclaje en el pilono.

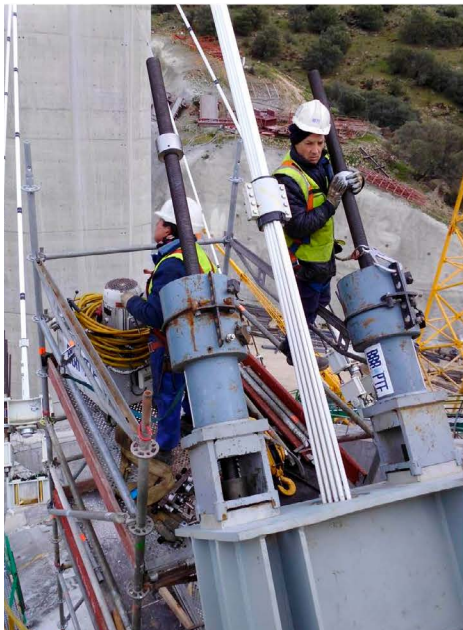


Figura 27. Tesado de un tirante.

posicionamiento se analizaba exclusivamente el ángulo de inclinación del bastidor así como su azimut, verificando que el error en ambos ángulos era inferior a $0,5^\circ$ centesimales. Una vez posicionado el bastidor se procedía al relleno de la capa de nivelación con un mortero de alta resistencia inicial, que permitiera el tesado del bastidor a las 3 h de haber vertido el *grout*.

18) **Montaje y tesado de la familia de tirantes de la dovela n-1.** Para el montaje de los tirantes de tiro ya premontados (los tirantes de retenida se solían montar unos días antes, para no interferir en el ciclo) se precisaba de las grúas torre sobre el arco, además de una o dos grúas automóvil ubicadas en la península de trabajo (en el caso de las familias de tirantes que iban a la pila) o por detrás del pilono metálico sobre el tablero (en el caso de las familias de tirantes que iban al pilono metálico). La aproximación de la cabeza de anclaje del tirante al bastidor de anclaje tesado en el arco se hacía por medio de un cabrestante eléctrico anclado en el propio bastidor (figura 25).

Para manipular los tirantes se hacía uso de útiles de

elevación que permitieran una curva suave en los cables durante el izado de estos, evitando la plastificación de los cables como consecuencia de deformaciones puntuales excesivas por una manipulación incorrecta (figura 26).

El tesado del tirante se realiza mediante el empleo de 2 o 4 gatos huecos actuando en las barras de acero activo que unen una estructura fija reaccionando contra el hormigón (bastidor) con una parte rotulada para permitir un giro longitudinal en el plano del tirante (balancín). Con el empleo de estas estructuras auxiliares de atirantamiento es posible tesar todos los cordones de un mismo tirante a la misma fuerza de tesado, pudiendo realizarse un retesado posterior de una manera sencilla y rápida. El tesado de una familia de tirantes debía realizarse de una manera sincronizada para los 4 tirantes que componen una familia (2 tiros y 2 retenidas). Para ello se utilizaban dos centrales de tesado distintas montadas en el arco y en la zapata de retenida respectivamente que sincronizaran los gatos de tiro o retenida. El desvío en fuerza entre tiro y retenida no podía superar nunca el 10% para evitar un



Figura 28. Hormigonado con autobomba de una dovela.

desequilibrio de fuerzas que podría afectar a pila o pilono, por lo que el tesado de la familia se realizaba en escalones del 10%, no comenzando el siguiente escalón hasta que los 4 tirantes se encontraran tesados a la misma fuerza.

Una vez realizado el tesado de la familia de tirantes ubicada en la dovela n-1 era necesario realizar una comprobación topográfica para determinar cómo se encontraba la dovela después del tesado. Si tras el tesado la dovela se encontraba fuera de su posición en cota (con una tolerancia aproximada de 3 cm), se procedía a modificar la contraflecha de los carros para corregir en la medida de lo posible el frente de la dovela en ejecución.

19) **Hormigonado de la dovela.** Dependiendo de la dovela a hormigonar, este se realizaba bien por medio de autobombas con plumas de hasta 63 m para las primeras dovelas del arco o bien por medio de dos bombas estáticas ubicadas en la península de trabajo y conectadas a sendas líneas de tubería que discurrían por la parte superior del arco, cuando la distancia del frente de la dovela a la península de trabajo era muy grande. El hormigonado se hacía a través de una serie de ventanas ubicadas en el encofrado de la losa superior así como a través de unas ventanas dejadas expreso en el tape frontal.

Antes de dar comienzo el hormigonado, cabe reseñar la importancia de un buen sellado del encofrado, al tratarse de hormigón autocompactante. Todas las juntas y todos los taladros realizados en el frente para la salida de las esperas de la siguiente dovela debían ser sellados con espuma de poliuretano, para evitar la salida del hormigón, ya que una fuga podía llegar a ser muy complicada de detener.

Todas estas actividades conformaban el ciclo de ejecución de una dovela tipo del arco del viaducto de Almonte. Como en la

ejecución de cualquier actividad cíclica, la duración del ciclo fue función de una curva de aprendizaje. En las primeras dovelas la duración del ciclo llegaba a ser de hasta 4 semanas, mientras que en las últimas dovelas se consiguieron rendimientos de hasta 10 días (si bien es cierto que el volumen de hormigón y de acero era bastante menor en estas últimas dovelas que en el arranque, como es lógico por otra parte). La duración media del ciclo fue de aproximadamente 2 semanas, trabajando 24 horas y 7 días a la semana. La mano de obra media que trabajó en cada uno de los dos márgenes para conseguir dicho rendimiento fue la siguiente:

- 1 Encargado por turno, 7 días a la semana
- 3 Mecánicos en turno de día, 7 días a la semana
- 9 Oficiales Encofradores en turno de día y 6 oficiales en turno de noche, 7 días a la semana
- 1 Soldador por turno, 7 días a la semana

6.

EJECUCIÓN DE LOS DIAFRAGMAS DEL ARCO

En aquellos puntos en los que se produce el arranque de una pilastra encargada de sustentar el tablero, se precisa de un macizado de la sección para permitir que las cargas procedentes del tablero se transmitan más eficazmente al arco, sin condicionar la flexión transversal de la sección del arco, materializándose un mecanismo de bielas y tirantes capaz de transformar las cargas verticales de la pilastra en axiles en el arco.

El arco consta por tanto de tantos diafragmas como pilasstras nacen del arco y dos diafragmas adicionales en la zona del arco en que este se funde con el tablero en una única sección, lo que hacen un total de 10 diafragmas. Por sus formas y condicionantes distinguimos tres tipos de diafragmas:

6.1. Diafragmas de pilasstras 7 y 14

Las primeras pilasstras ubicadas sobre el arco en cada margen son la pilastra 7 en la margen norte y la pilastra 14 en la margen sur. Ambas pilasstras nacen de las dovelas 9 y 10 de cada margen, en una zona en la que el arco aún no tiene sección única. Por esta razón, el diafragma de esta pilastra no solo debe macizar parte de la sección hueca de las dovelas del arco, sino que debe unir ambas ramas, materializándose de esta forma la base de la pilastra.

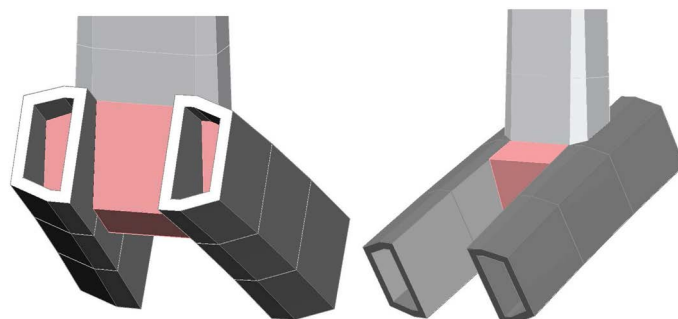


Figura 29. Vistas 3D del diafragma de pilasstras 7 y 14.

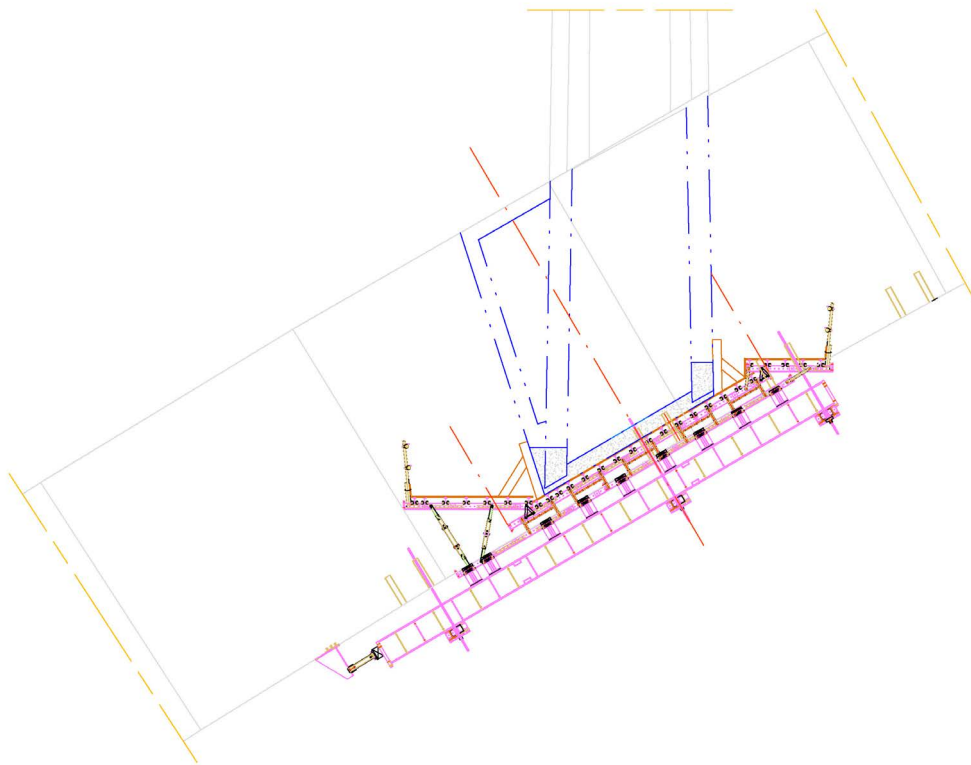


Figura 30. Plataforma auxiliar empleada en la ejecución del diafragma de las pilastras 7 y 14.

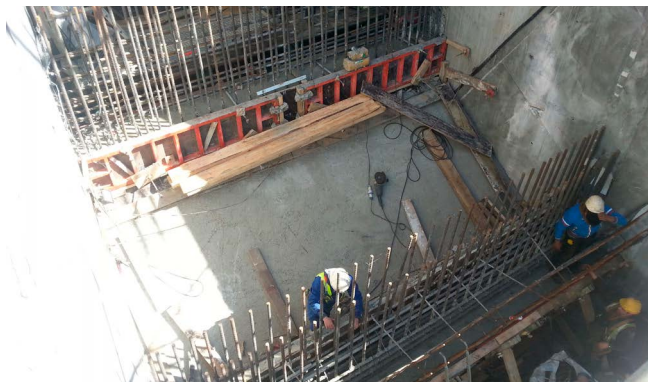


Figura 31. Ejecución del diafragma de la pilastra 14.

Previamente a la ejecución del diafragma en sí, fue necesario dejar previsto en las dovelas en las que iba ubicado el diafragma superficies de contacto intencionadamente rugosas, en las que se dispusieron plantillas para la colocación de acopladores mecánicos que dieran continuidad a la armadura pasiva de conexión entre la pilastra y el arco.

Para ejecutar estos diafragmas de unión entre ambas ramas se precisó de una plataforma auxiliar con las debidas protecciones colectivas, anclada al arco, sobre la que se ejecutó la losa inferior del diafragma y sobre la que se dispusieron posteriormente los encofrados necesarios para ejecutar los muros de unión entre ambas ramas (figura 30). Esta plataforma auxiliar se ancló al arco por medio de barras de acero pretensado, a través de los pasatubos dejados en las dovelas para el anclaje de los carros de avance en voladizo.

Esta plataforma se montó en el suelo y se subió al arco mediante dos grúas, una de ellas la grúa torre ubicada en la península de trabajo y otra grúa sobre ruedas ubicada también en la península.

El ferrallado y hormigonado de estos diafragmas se realizaba por fases. En primer lugar se ejecutó la losa inferior de unión de las dos ramas, recreciendo ligeramente los zunchos extremos, encargados de soportar el peso de los muros verticales. En segundo lugar se hormigonaron los muros verticales, dejando las esperas necesarias para el arranque de la pilastra. Y por último se hormigonó el muro inclinado y su cierre ubicado hacia los arranques del arco junto con los diafragmas interiores a realizar en las dovelas 9 y 10.

6.2. Diafragmas de pilastras 8 y 13

Los diafragmas de las pilastras 8 y 13 están ubicados en la zona del arco en que este pasa de tener dos ramas a tener una sección única (entre las dovelas 15 y 16). Por este motivo, la geometría tridimensional de la pieza es algo más complicada de lo normal, ya que el diafragma será el encargado, no solo de transmitir las cargas que bajen por las pilastras, sino también de bifurcar los axiles provenientes del arco en su tramo central a las dos ramas del arco en su zona de arranque.

Todas las superficies del diafragma en contacto con el arco son intencionadamente rugosas, acabado para el cual hubo que dejar plantillas forradas con huevera HDPE en el momento en que se ejecutaron las dovelas 15 y 16. Por otro lado, estas plantillas se utilizaron para posicionar todos los manguitos acopladores de armadura pasiva, necesarios para dar continui-

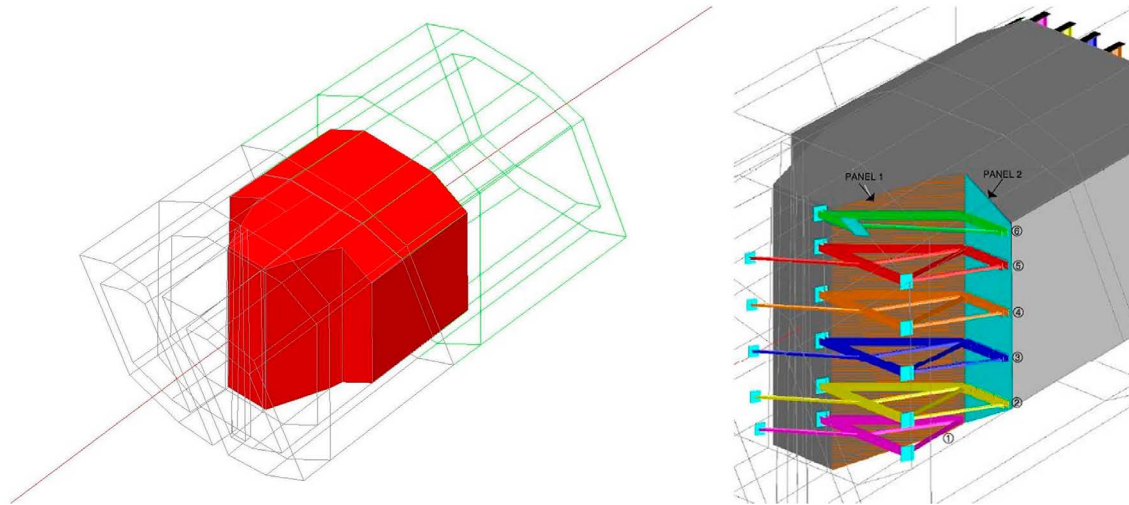


Figura 32. Modelo 3D del diafragma de las pilastras 8 y 13 y vista 3D del encofrado empleado.

dad a la armadura del diafragma dentro de los paramentos de las dovelas.

Para ejecutar estos diafragmas se tuvo que diseñar y construir un encofrado que se adaptara a las formas del diafragma en el interior del arco, resistiendo además los empujes hidrostáticos del hormigón autocompactante. Además ese encofrado tenía que ser montado *in situ* pieza a pieza, ya que el acarreo de grandes piezas dentro del arco no era posible. Este encofrado se componía fundamentalmente de perfiles metálicos anclados a las paredes interiores del arco y de tablonces de madera de 50 mm de espesor, dispuestos de forma similar a las entibaciones. Para evitar las fugas del hormigón autocompactante, los tablonces de madera se forraban posteriormente con un panel de cartón – pluma, y se realizaba un sellado meticuloso de todas las juntas con espuma de poliuretano.

Para hormigonar los diafragmas se dejaron una serie de pasatubos en la losa superior de las dovelas 15 y 16, por los que se realizaba el vertido del hormigón desde la parte superior del arco.

6.3. Diafragmas de pilastras 9, 10, 11 y 12 y diafragmas de clave

La geometría del resto de diafragmas a ejecutar en el arco (pilastras 9, 10, 11, 12 y diafragmas de clave) es muy parecida en todos los casos, tratándose cada diafragma únicamente de dos tabiques transversales interiores de espesor variable dependiente del diafragma considerado, coincidentes con los tabiques de la pilastra.

Al igual que en el caso anterior, todas las superficies del diafragma en contacto con el arco son intencionadamente rugosas, acabado conseguido con plantillas forradas con huevera HDPE cuando se ejecutaron las dovelas pertinentes. Y de la misma forma que en el caso anterior, estas plantillas se usaron para posicionar todos los acopladores de armadura pasiva, necesarios para dar continuidad a la armadura del diafragma dentro de los paramentos de las dovelas.

Por otro lado, también fue necesario diseñar y construir un encofrado que se adaptara a las formas interiores del arco, aunque esta vez las formas eran mucho más fáciles que en el



Figura 33. Ferrallado del diafragma de la pilastra 13.



Figura 34. Ferrallado y encofrado del diafragma de la pilastra 9.

diafragma de las pilastras 8 y 13. Este encofrado, compuesto de la misma forma que en el caso anterior de perfiles metálicos anclados a las paredes interiores del arco y de tablonces de madera (para poder ser montado *in situ* pieza a pieza), pudo ser adaptado de unos diafragmas a otros, optimizándose de esta manera el material empleado.

El hormigonado de estos diafragmas se ejecutaba también a través de pasatubos dejados en la losa superior del arco, de forma que pudiera salir el aire por unos, mientras se realizaba el hormigonado por otros.

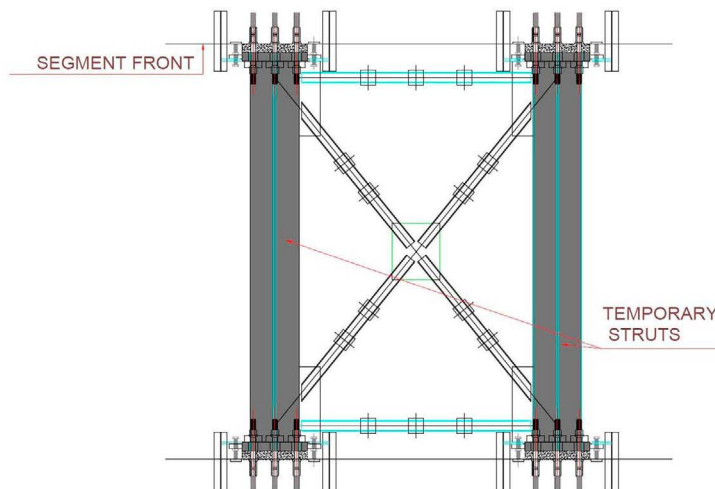
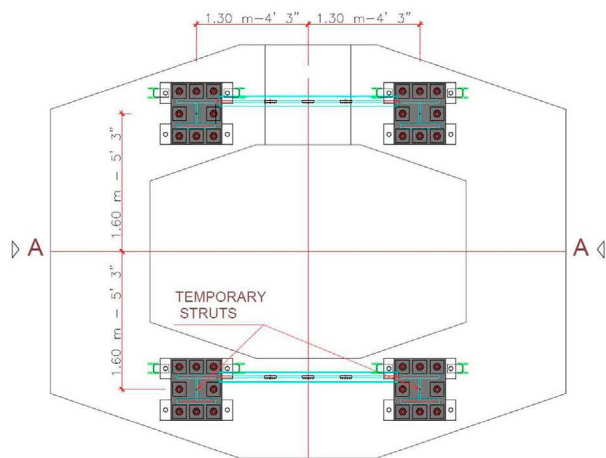


Figura 35. Estructura de bloqueo para el cierre del arco.

7. CIERRE DEL ARCO

Una de las operaciones más complicadas en la ejecución del arco fue el cierre de este, operación clave de cara a la geometría final de su directriz. La misión fundamental de este tipo de operaciones en los puentes de hormigón ejecutados por voladizos sucesivos es anular los movimientos relativos entre ambos voladizos durante el hormigonado para evitar la fisuración de la dovela de cierre.

La estructura diseñada para intentar anular estos movimientos consistía en 4 perfiles armados (2 en la parte superior de la dovela y 2 en la parte inferior de esta) arriostrados en el plano horizontal para evitar el pandeo transversal de los perfiles (figura 35).

Para agilizar el proceso de cierre del arco se montaron los perfiles metálicos el día antes del día del bloqueo, procediendo en ese mismo momento a la nivelación y tesado de las barras de acero activo al frente de uno de los dos voladizos, dejando en la otra margen una cierta holgura de cara a los posibles movimientos que se pudieran producir en 24 h. De esta forma, los 4 perfiles se quedaron trabajando en ménsula bajo su peso propio hasta el día siguiente.

El momento elegido para realizar el bloqueo entre ambos voladizos fue el momento del día con menor recorrido térmico, estimado entre las 6:30 y las 9:30. En ese lapso de tiempo se procedió a rellenar con *grout* de fraguado rápido el espacio entre el frente de la dovela y las placas de los perfiles y posteriormente a tesar las barras de conexión dejadas en el frente libre contra dichas placas, finalizando el tesado de las barras antes de las 14:00. La operación fue un rotundo éxito consiguiendo anular casi completamente el movimiento vertical del arco y reduciendo considerablemente el movimiento transversal. El error en cota entre ambos márgenes fue inferior a 10 mm.

Una vez realizado el bloqueo de ambos voladizos se procedió al ferrallado y hormigonado de la dovela de cierre, la cual se rellenó enteramente a través de ventanas dejadas en el encofrado de la cara superior. El bloqueo se realizó el 6 de agosto de 2015 y el hormigonado de la dovela de cierre se llevó a cabo el 8 de agosto de 2015. Ya con el arco cerrado comenzó

el desmontaje del sistema de atirantamiento provisional y la ejecución de pilastras, entrando el arco en carga.

8. GRÚAS AUTOESTABLES SOBRE EL ARCO

Para la ejecución del arco fue necesario disponer de grúas torre sobre el propio arco para el traslado de materiales hasta el frente. Estas grúas han sido ancladas al arco por medio de barras de acero activo postesadas. Analizando profundamente el procedimiento constructivo del arco se decidieron una serie de variables, a partir de las cuales realizar un replanteo de las grúas necesarias en la ejecución del arco:

- Numero de grúas torre sobre el arco.
- Posición absoluta de cada grúa torre en el arco.
- Alcance y carga máxima de cada grúa torre.

Una vez estudiado el procedimiento constructivo del arco se decidió disponer de dos grúas torre por margen (figura 37) La primera de ellas se instaló inicialmente en la plataforma de trabajo situada en el arranque del arco. Esta primera grúa torre debía tener un mástil de más de 140 m para que la flecha de la grúa fuera capaz de pasar por encima del pilono metálico. En el caso de la margen sur, esta grúa se montó con un arriostramiento a la pila 15, trabajando de esta forma con un apoyo a 45 m de altura; sin embargo en el caso de la margen norte, al no tener disponibilidad de ese tipo de grúas la empresa adjudataria del alquiler de las grúas torre, fue preciso montar una grúa autoestable de más de 140 m, cuya cimentación duplicó en dimensiones a la de la margen sur. El alcance máximo de estas grúas era de 81 m y su capacidad de carga a esa distancia era de 5.5 toneladas.

Una vez ejecutada la dovela 16, se trasladó dicha grúa a una posición distante 70 m del arranque del arco (entre las dovelas 14 y 15), por lo que el alcance y la capacidad máxima de carga de la grúa seguía siendo la misma que en el caso anterior. El anclaje de esta grúa al arco se hizo mediante un conjunto de barras de acero de pretensar embebidas en el arco y mediante una estructura metálica cuya finalidad era conseguir un plano

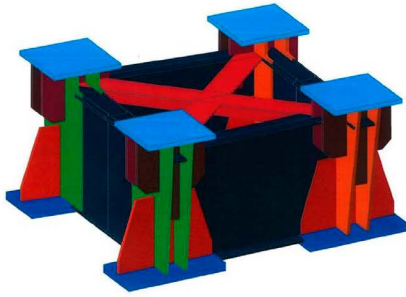


Figura 36. Grúa torre sobre las dovelas 14-15 y estructura metálica empleada en la base.

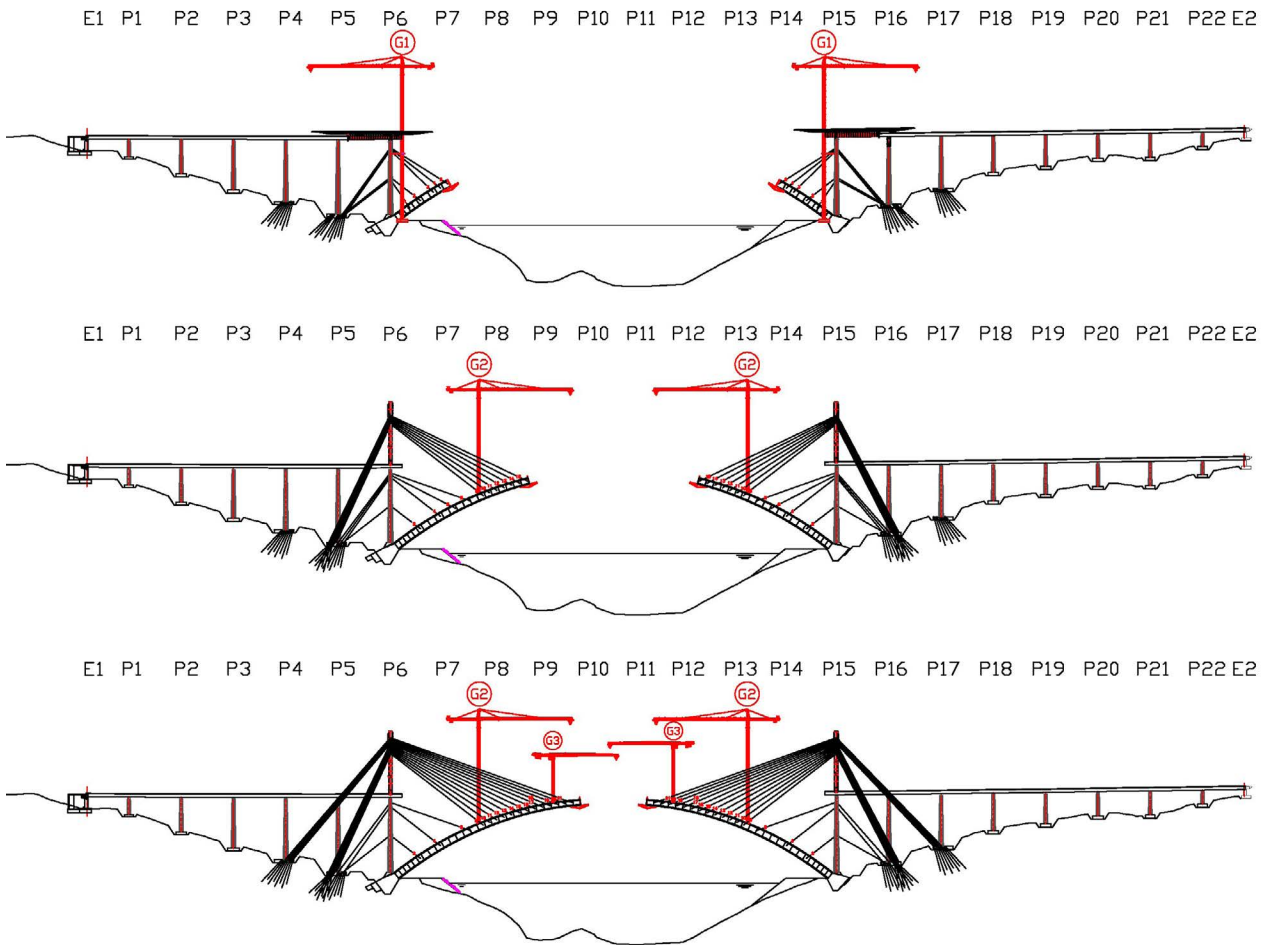


Figura 37. Configuración de grúas torre empleadas en la ejecución del arco del viaducto de Almonte.

horizontal en la base de la grúa, arriostrando las 4 patas de la grúa y transmitiendo los esfuerzos provenientes de esta al arco. Para el apoyo de esta estructura en el arco se ejecutaron dos muretes apoyados en el hastial interior de ambas ramas a través de los cuales se dispusieron barras Macalloy para el tesado de la estructura metálica al arco (figura 36).

Cuando el alcance de esta grúa no fue suficiente para abastecer el frente, se instaló una segunda grúa sobre el arco, distan-

te 140 m del arranque de este (en la dovela 24). De esta forma se pudo abastecer el frente de materiales en todo momento. Esta grúa ya se pudo anclar directamente al arco, sin necesidad de una estructura auxiliar como en el caso de la primera grúa situada sobre el arco. Lo que si fue necesario diseñar, fue una plataforma ubicada entre las grúas sobre el arco para poder realizar el intercambio de materiales entre una grúa y otra. El alcance de estas grúas era un poco inferior que en el caso an-

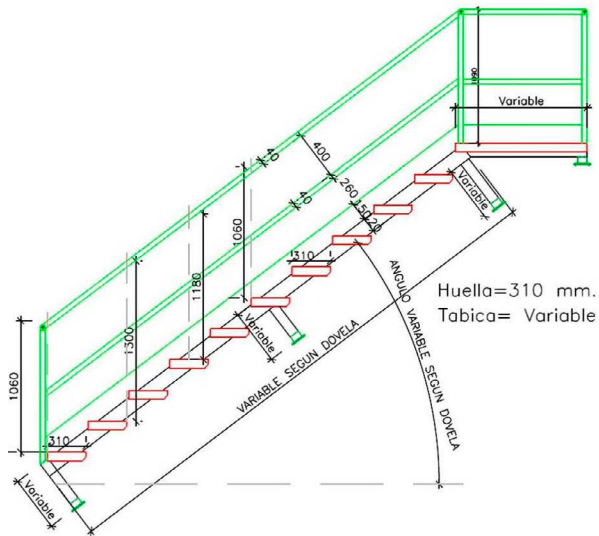


Figura 38. Escaleras de acceso del arco del viaducto de Almonte.

terior y su capacidad de carga a máximo alcance era de 4.5 toneladas.

Las reacciones transmitidas por estas grúas al arco tuvieron que ser tenidas en cuenta, no solo para el dimensionamiento del arco, sino también en el control geométrico del voladizo, ya que hubo que modificar las contraflechas de construcción para tener en cuenta el montaje y desmontaje de las grúas torre.

9. OTROS MEDIOS AUXILIARES EMPLEADOS EN LA EJECUCIÓN DEL ARCO

9.1. Escaleras de acceso

Uno de los problemas que plantea la ejecución de un arco es el acceso desde el arranque hasta el frente de trabajo, dado que la gran inclinación en el arranque hace intransitable la losa superior. Para tener acceso en todo momento al frente de trabajo se diseñaron y fabricaron tramos de escalera metálica, cuya longitud era la de una dovela, de forma que cuando se realizaba el avance de los carros a la siguiente dovela se montaban estos tramos de escalera metálica, la cual se anclaba a la losa superior del arco por medio de anclajes mecánicos de expansión. De esta forma se garantizaba el acceso a los carros en todo momento (figura 38).

También fue necesario realizar una serie de plataformas auxiliares con acceso desde las escaleras anteriormente referidas para poder ejecutar ciertas unidades y salvar ciertos obstáculos que de otra forma hubieran impedido el acceso al frente. Estas plataformas fueron las siguientes:

- Plataformas *bypass* de la escalera en los alrededores de las pilastras P9, P10, P11 y P12: Debido a la existencia de las pilastras, fue necesario plantear una serie de plataformas *bypass* que sortearan las pilastras (ya que estas ocupan la

mayor parte de la losa superior del arco en su arranque) por el lateral del arco, trabajando anclada a este en voladizo

- Plataformas de unión entre ramas para garantizar el acceso a la grúa torre ubicada en las dovelas 14 y 15.
- Plataforma de acceso al diafragma interior de las pilastras 8 y 13, por el lateral interior del arco en la zona de dovelas dobles. Fue necesario plantear un acceso al encofrado de la cara del lado del arranque del arco en el diafragma de las pilastras 8 y 13, ya que el arco no es visitable en esa zona y era preciso tener un acceso para realizar el encofrado y desencofrado de esa cara.
- Plataformas para la disposición de compresores de gran volumen.

El diseño y ejecución de estructuras metálicas auxiliares para garantizar el acceso a todos los frentes de trabajo del arco fue clave en la ejecución del arco del viaducto de Almonte. La disposición de un taller de estructura metálica a pie de obra garantizó que la obra nunca se parara por no existir un acceso adecuado y seguro para la ejecución de una determinada unidad elemental del arco.

9.2. Instalaciones de energía, agua, aire comprimido y hormigón

De la misma manera que era necesario garantizar un correcto acceso al frente de trabajo, fue necesario también suministrar energía, agua, aire comprimido y por supuesto hormigón, sin los que hubiera sido imposible ejecutar el arco del viaducto de Almonte.

- a) **ENERGÍA:** Para garantizar el suministro de energía al frente de trabajo, necesaria para el funcionamiento de muchos mecanismos del carro, así como para el funcionamiento de las grúas torre y de la pequeña



Figura 39. Bomba de hormigón e instalación de tubería a lo largo del arco del viaducto de Almonte.

maquinaria necesaria durante el ciclo de trabajo, se dispuso de una acometida eléctrica desde una red de Alta tensión (45KV) existente en la zona. Para ello fue necesario disponer de dos transformadores en ambos márgenes del río, que pasaran el alto voltaje a 380V, voltaje requerido para el funcionamiento de la maquinaria anteriormente referida. Para llevar la energía hasta el frente se dispusieron una serie de mangueras eléctricas hasta el frente de trabajo (o hasta la máquina en cuestión), discurriendo por la parte superior del arco, en zonas accesibles, para permitir posibles reparaciones, distribuyendo esta a la distinta maquinaria a través de cuadros eléctricos.

También se precisaba de energía en la planta de hormigón montada ex profeso a pie de obra, para lo cual se condujo la acometida eléctrica también a la planta. Para evitar un posible corte de energía durante el hormigonado de una dovela, se dispuso de un grupo electrógeno de 300 Kvas en *Stand-by* capaz de suministrar energía a la planta de hormigón durante la fabricación de este.

- b) **AIRE COMPRIMIDO:** Como se ha comentado anteriormente, se dispusieron en el arco compresores de aire de gran volumen para una serie de actividades en las que se requería de un gran caudal de aire comprimido:
- Apriete de tornillos y barras de acero activo en el carro.
 - Movimiento de avance del carro.
 - Demolición controlada por rotopercusión para el desencofrado de los tapes y para la detección de acopladores de armadura pasiva tapados por hormigón.
 - Aproximación y tesado de tirantes.

Para evitar las pérdidas de carga, se dispuso de dos plataformas a lo largo del voladizo en cada margen, para la ubicación de compresores de gran volumen capaces de suministrar un gran caudal de aire comprimido en el frente. Desde el compresor hasta el frente de trabajo se condujo el aire comprimido por mangueras reforzadas flexibles, las cuales discurrían, al igual que las mangueras eléctricas, por la losa superior del arco, de forma que fueran accesibles en caso de avería.

- c) **AGUA:** El agua se utilizaba fundamentalmente para el correcto fraguado de las dovelas y como remedio en caso de incendio en el frente. Para conseguir disponer de agua

en el frente de trabajo se diseñó un sistema de bombeo con captación autorizada del embalse hasta un depósito situado en la plataforma de trabajo, y desde el depósito, a través de tuberías, hasta el frente de trabajo. Estas tuberías discurrían paralelas a las de aire comprimido y energía, siendo accesibles desde las escaleras y plataformas auxiliares en caso de avería.

- d) **HORMIGÓN:** Debido a la lejanía de las plantas de fabricación de hormigón más próximas (situadas a casi 50 km del viaducto de Almonte) fue necesario disponer de una planta de hormigón a pie de obra que asegurara el suministro de hormigón de las dovelas en plazos relativamente cortos de tiempo, que permitieran un vertido lento del hormigón sin que este perdiera sus propiedades de bombeo. La velocidad de vertido tenía que ser lenta para evitar posibles fugas del hormigón y para no sobrecargar en exceso los encofrados (que aunque diseñados para hormigón autocompactante era preferible no llevar a sus límites).

Para bombear el hormigón de una dovela desde la plataforma de trabajo (a donde llega en camiones hormigonera desde la planta) hasta el frente del voladizo se emplearon grupos estáticos de bombeo conectados a tuberías metálicas que discurrían por la parte superior de las dovelas (figura 39). Para evitar posibles atrancos en la tubería (algo muy común en los hormigonados por tubería) se realizaba un exhaustivo mantenimiento y limpieza de estas, realizando una lubricación previa al hormigonado de una dovela con lechada de cemento que era recogida en contenedores en el frente.

9.3. Plataformas de trasiego de materiales

Como se ha comentado anteriormente, en el momento en que fue preciso disponer de una segunda grúa sobre el arco, fue totalmente imprescindible la ejecución de una plataforma horizontal sobre el arco en un punto intermedio entre las dos grúas de una misma margen, de forma que se permitiera el trasiego de materiales entre una grúa y otra, para que los materiales puedan llegar al frente. Esta plataforma tenía que tener unas dimensiones considerables, de forma que se pudiera acopiar un hastial de ferralla premontado. Esta plataforma se ubicó entre los dos planos de tirantes, teniendo la mayor dimensión posible en anchura que permitieron ambos planos (figura 40).

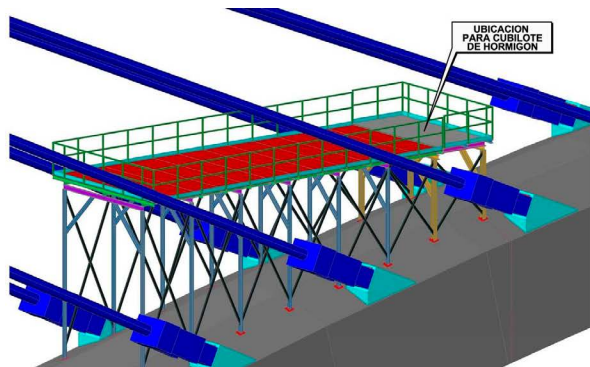


Figura 40. Plataforma auxiliar para trasiego de materiales.

Por otro lado, fue necesario reforzar una zona de la plataforma para permitir el acopio de un cubilote de hormigón lleno (casi 9 ton puntuales), necesario para el hormigonado de los mogotes de anclaje de los tirantes.

9.4. Instalaciones de instrumentación

Un puente con la complejidad en el proceso constructivo y la magnitud del viaducto de Almonte requiere de un control exhaustivo de una serie de parámetros que nos puedan informar de cómo está siendo el comportamiento estructural durante la construcción del puente y una vez finalizado, y especialmente durante la ejecución del arco en voladizo, momento en el cual muchos de los elementos resistentes estarán sometidos a los máximos esfuerzos de su vida estructural.

Estos parámetros se miden a través de una serie de sensores instalados en los distintos elementos resistentes del viaducto y se registran y se transmiten mediante un sistema informático de comunicaciones a un servidor, desde donde se procesan los datos, que pueden ser posteriormente consultados en una página web diseñada ex profeso. Si dichos datos superan unos umbrales preestablecidos en función de los resultados del modelo, automáticamente se envía una alarma a las personas responsables de la ejecución del viaducto.

Estos sensores dispuestos a lo largo del arco (en hormigón, acero estructural y tirantes) estaban conectados por cable a la estación remota satélite de envío por ondas más cercana. Dichos cables discurrían por canaletas situadas en la losa superior del arco, de forma que hubiera acceso en caso de avería, y asegurando una cierta distancia de los cables de energía que pudiera causar una cierta interferencia. Cuando los datos eran recogidos por la estación receptora eran enviados a un servidor remoto de forma inalámbrica, de forma que podían ser consultados en tiempo real, a través de una web realizada ex profeso.

Los sensores dispuestos en el viaducto de Almonte fueron los siguientes:

a) **Sensores de control geométrico:** Eran de dos tipos: Por un lado aquellos cuya lectura no era automática siendo necesario su registro en momentos puntuales. Estos sensores eran fundamentalmente prismas y dianas ubicados en arco, pilastras y pilonos. Por otro lado se dispusieron clinómetros en pilas, pilastras y pilonos que registraban automáticamente cada diez minutos inclinaciones en los elementos en los que estaban dispuestos.

- b) **Sensores de control térmico y meteorológico:** Se dispusieron estaciones meteorológicas para registrar datos ambientales y termómetros para registrar temperaturas en dovelas, pilas y tirantes y así obtener variaciones térmicas y gradientes en los principales elementos implicados.
- c) **Sensores de tensión y deformación:** Se utilizaron fundamentalmente bandas extensométricas dispuestas en acero pasivo, tirantes o acero estructural (en el caso del pilono) para registrar deformaciones y tensiones en estos elementos, y de células de carga para registrar las variaciones en la carga los anclajes al terreno dispuestos en las zapatas de retenida.
- d) **Sensores de movimiento del terreno:** Extensómetros de varilla e inclinómetros para el cálculo de asentamientos en las cimentaciones y en las penínsulas de trabajo

10. CONCLUSIONES

La construcción de uno de los arcos de hormigón de puente ferroviario de mayor luz del mundo ha sido realizada por el sistema tradicional de avance en voladizo, por medio de unos carros de encofrado lo suficientemente versátiles para ir adaptándose a las formas cambiantes del arco en su desarrollo y realizando un atirantamiento provisional de este hasta su cierre.

Su ejecución ha supuesto un gran reto técnico para todos los trabajadores implicados en su construcción.

Referencias

- [1] VII CONGRESO ACHE 2017. 103 Viaducto de Almonte. Proceso Constructivo
- [2] VII CONGRESO ACHE 2017. 107 Viaducto de Almonte. Diseño de detalle
- [3] ROSIGNOLI, M. "Bridge Construction Equipment" published by ICE Publishing, Thomas Telford Limited 2013, p. 245-248.
- [4] E-Mosty. Issue 4 December 2016. Arch Bridges
- [5] ACHE. MONOGRAFÍA 25. Recomendaciones para el movimiento de grandes pesos, editado por CINTER y realizado por el grupo de trabajo 3/8 de la comisión 3, p.43 – 55.
- [6] IBC 16-13. 107 Almonte Viaduct Construction Process.