

Carros de encofrado para la ejecución del arco del puente sobre el río Almonte

Formwork travellers for construction of the Almonte arch

Tomasz Smich^{a,*} y Enrique Bordó Bujalance^b

^a Departamento Técnico, Rubrica Ingeniería y Arquitectura S.L., Castellón, España

^b Departamento de Estructuras, IDEAM, S.A., Madrid, España

Recibido el 17 de octubre de 2017; aceptado el 30 de enero de 2018

RESUMEN

Descripción de los carros de encofrado para la ejecución del arco del puente sobre el río Almonte. Diseño, cinemática y maniobras especiales.

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

PALABRAS CLAVE: puente arco; puente río Almonte; carros de voladizos; encofrados especiales

ABSTRACT

Description of the travellers formwork used for construction of the arch of the river Almonte bridge. Design, kinematics and special manoeuvres.

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

KEYWORDS: arch bridge; Almonte river bridge; cantilever carriage; special formworks

1.

CONSIDERACIONES PREVIAS AL DISEÑO DE LOS CARROS DE ENCOFRADO

Durante la fase inicial del estudio de los carros de encofrado para la ejecución del arco por voladizos sucesivos se presentaron una serie de dificultades y condicionantes a nivel geométrico y estructural:

- Geometría variable del arco.
- Limitación del peso de los equipos.
- Presiones de hormigonado por utilización de hormigón auto-compactante.
- Transmisión de las reacciones de los carros a la estructura del arco en distintas fases de trabajo.

Geométricamente el arco es una estructura compuesta por 33 segmentos diferentes de cuatro tipos: 1 dovela de sección única en la base del arco, 14 dovelas de sección doble, 1 dovela de

transición (unión) y 17 dovelas de sección única. El ancho exterior de la dovela nº 3 a realizar con los carros fue de 17.95 m, pasando a escasos 6 m de la dovela nº 29 en adelante, y en alturas medidas fueron desde 6.90 m en el arranque hasta 4.80 m enclave. Las variaciones entre las secciones contiguas se produjeron prácticamente en todas las medidas, como la altura, el ancho, los espesores de las paredes y la separación entre los ramales iniciales. Las dovelas nº 1 y nº 2 se realizaron con cimbra tradicional formando el arranque del arco, y las 31 dovelas restantes fueron hormigonadas con los carros de encofrado. En la [figura 1](#) se han marcado las únicas zonas de la sección que conservaron su geometría a lo largo de todo el arco; por consiguiente, fueron elegidas como las zonas de interacción de los carros con la estructura para la transmisión de las cargas en las fases de vertido de hormigón y en el avance de los equipos.

Por debajo del chaflán inferior se situó la estructura principal portante del carro, compuesta por dos vigas armadas de canto variable arriostradas entre sí, referenciando su posición fija respecto a la cara vertical exterior de la sección. Este hecho

* Persona de contacto / Corresponding author.
Correo-e / email: tsmich@rubricaingenieria.es,
tomeksmich@gmail.com (Tomasz Smich)

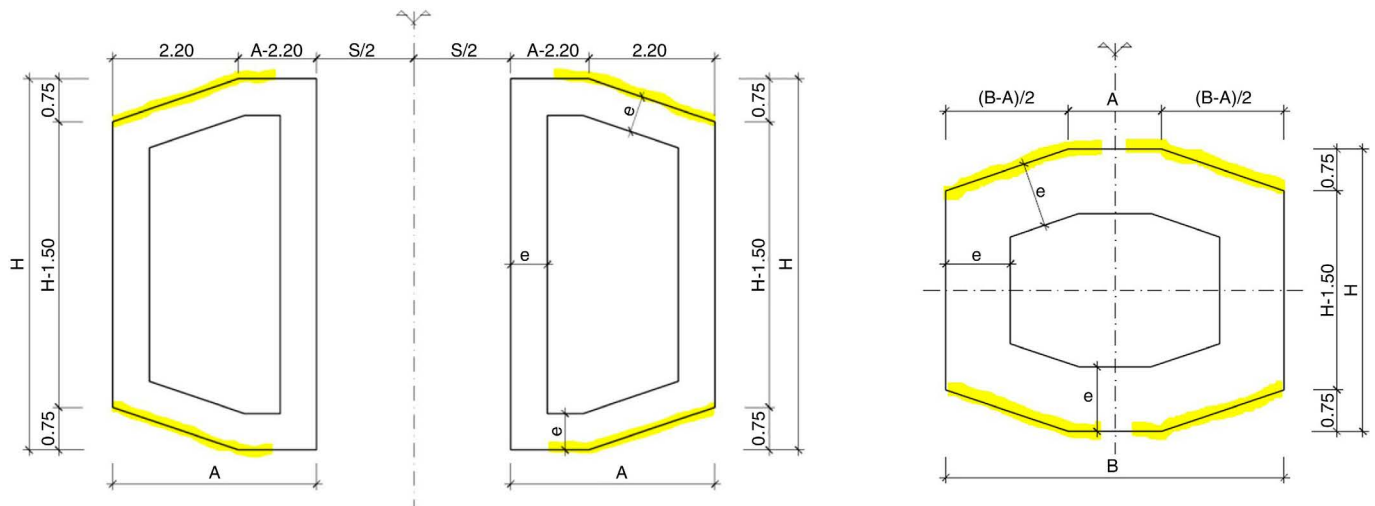


Figura 1. Caras de la sección del arco que conservaron su geometría

introdujo una dificultad añadida por el importante desplazamiento transversal del centro de gravedad comparando las secciones iniciales y finales.

La limitación en peso del carro debido a los esfuerzos sobre el arco en la fase de ejecución exigió la optimización del equipo, conservando el cumplimiento de normativas estructurales, funcionalidad y seguridad de los equipos. Una importante reducción de peso del sistema de encofrados fue derivada de la limitación de la presión máxima de hormigón fresco, basándose en los ensayos realizados en la obra con el hormigón auto-compactante [1] a utilizar en la construcción del arco.

Para transmitir las cargas del carro a la estructura en la fase de hormigonado se optó por un sistema de amarre mediante barras roscadas pretensadas atadas a la losa inferior. La reacción negativa de la cola del carro se transfirió a la estructura mediante un cilindro hidráulico con tuerca de bloqueo. Durante el avance del carro, el peso se transfería al arco mediante un pórtico apoyado sobre el chaflán superior. Dicho pórtico en la fase inicial envolvía toda la sección, pero una vez realizada la unión de los carros, estos quedaban abiertos en la cara interior teniendo la forma de C. Las fuerzas debidas al empuje del sistema de avance se repartían entre la cara inferior y la superior de la sección.

La idea de arrancar con un equipo único en cada lado fue descartada para evitar complejas reconfiguraciones del carro a lo largo del proceso constructivo y por las limitaciones en el peso del equipo. La opción elegida fue la de arrancar en cada estribo con 2 carros separados (figura 2) y unirlos una vez alcanzada la dovela n° 15.

La solución final del sistema de encofrado para la ejecución del arco fue resultado de un estudio previo de la solución técnica presentada por Rubrica Ingeniería a FCC y la posterior estrecha colaboración entre la Oficina Técnica de Rubrica y FCC [2]. En la fase inicial del desarrollo del proyecto, el trabajo conjunto con los Servicios Técnicos de FCC se centró en la definición de la estructura principal, los puntos de amarre del carro a la estructura y las interferencias con los cables provisionales de retenida. Una vez definida la estructura principal de los carros, quedaban por definir los aspectos funcionales del mismo. En esta fase se desarrolló el diseño de los sistemas hi-

dráulicos, los encofrados, los elementos de seguridad, los accesos y las plataformas de trabajo. Las aportaciones del equipo de obra de la UTE Alcántara permitieron crear un diseño óptimo en cuanto a la productividad, a la seguridad de los operarios y a las necesidades particulares del proyecto, verificado según la normativa [3] de aplicación.

La comprobación y la validación externa de la estructura principal fueron realizadas por IDEAM.

2.

DESCRIPCIÓN DE LOS CARROS DE ENCOFRADO

Para la construcción del arco se suministraron 4 equipos de encofrado, compuestos cada uno con dos sistemas independientes:

- Carro de encofrado exterior.
- Sistema de encofrado interior.

2.1. Carro de encofrado exterior

2.1.1. Descripción de general del carro exterior

Funcionalmente, en el carro de encofrado exterior podemos diferenciar 4 partes, indicadas en la figura 3:

Empezando por la parte inferior del carro, tenemos la estructura principal con los encofrados laterales y el panel de fondo. Dicha estructura sirve de apoyo del peso propio de los encofrados exteriores y peso del hormigón fresco en la fase de vertido y fraguado de la mezcla. En la siguiente imagen (figura 4) podemos observar las dos estructuras principales montadas sobre el arranque, las plataformas de trabajo, el panel de fondo y las vigas transversales de guiado de los paneles laterales.

La vía inferior, junto con el amarre trasero, cumplía varias funciones dependiendo de la fase de trabajo. Durante el hormigonado, el amarre trasero era un elemento intermedio entre la estructura del arco y el cilindro hidráulico de cola del carro. En la fase de avance del carro, el amarre trasero permanecía fijado al arco y la vía inferior permitía lanzar y guiar el carro desde abajo.

El pórtico de avance, en la posición de hormigonado, estaba conectado a la estructura mediante 4 barras Macalloy preten-



Figura 2. Carros de encofrado montados sobre el arranque.

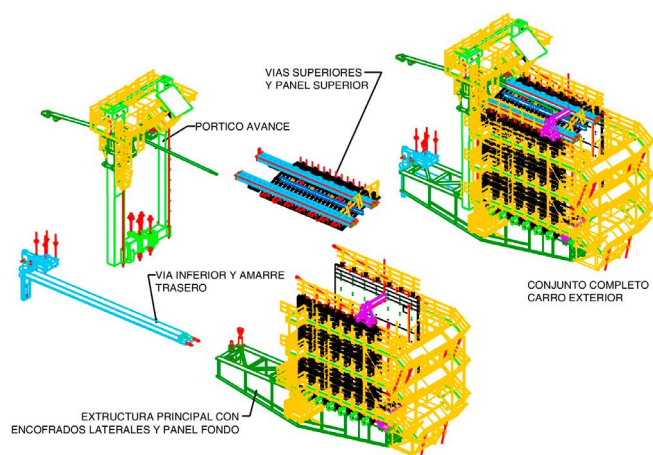


Figura 3. Partes principales del carro exterior.

sadas a 2500 kN cada una (figura 3: elementos de color rojo en la parte inferior del pórtico). Dichas barras creaban un punto «fijo» donde colgaba la estructura principal por medio de una articulación, permitiendo la inclinación longitudinal de esta para controlar el trazado del arco y la contraflecha del carro. Durante el avance del carro, las 4 barras Macalloy se retiraban para poder desencofrar el panel fondo. De esta manera se transmitía el peso del carro a las vías superiores, y a continuación a la cara superior de la dovela recién hormigonada.

El dimensionamiento de las barras Macalloy venía condicionado por la necesidad de resistir el peso del carro, de los encofrados y del hormigón de la dovela (en fase de hormigonado) sin destesar la unión con la dovela. A esta última hay que añadirle la necesidad de resistir por rozamiento la componente tangencial a la dovela del peso propio del carro y encofrados. A la hora de evaluar con más margen de seguridad las fuerzas de las barras, cubriendo posibles incertidumbres por posibles errores de tarado del gato y ajustes del apriete de las tuercas, se tuvo en cuenta una fuerza efectiva remanente de 2 500 kN por barra, algo inferior a los 2 900 kN de fuerza nominal teórica de tesado. Para el rozamiento [4,5] considerado para la interfaz hormigón-acero se tomó un valor minorado de 0.30.

El pórtico se diseñó como un conjunto rígido de vigas ar-

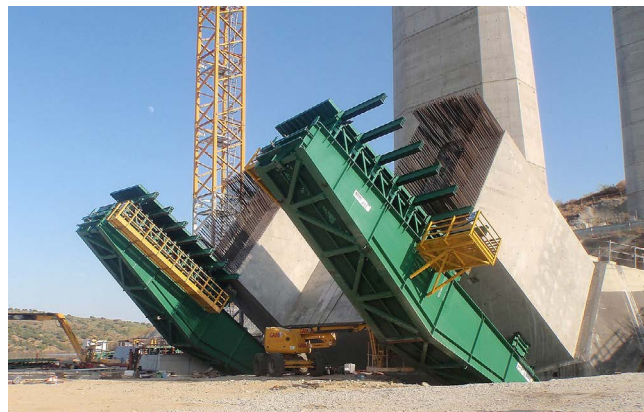


Figura 4. Estructuras principales en la fase de montaje inicial.

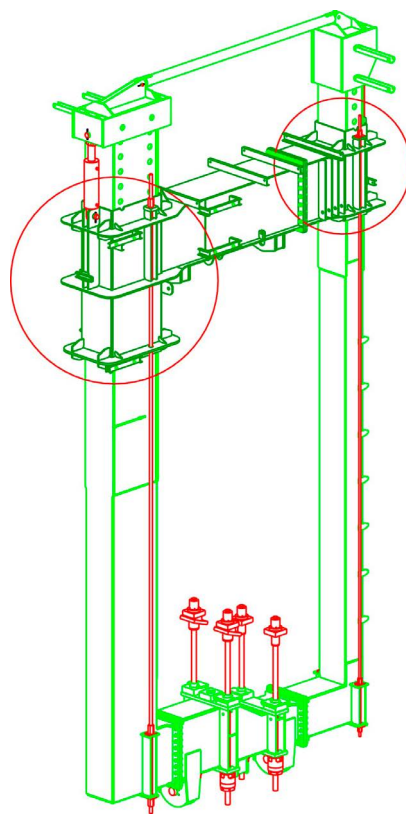


Figura 5. Vista del pórtico de vance indicando las partes deslizantes.

madas tipo cajón compuestas por la viga transversal inferior, la viga vertical exterior y la viga vertical interior (desmontable antes de la unión de las secciones). La estructura principal resistente a flexión se configuraba en forma de C, de tal modo que al unirse los dos pórticos más adelante resultase un único marco cerrado.

La viga transversal superior estaba unida a las vigas verticales mediante una deslizadora perpendicular para facilitar el ajuste de la geometría del pórtico por el cambio de altura de sección y para poder desencofrar el panel del fondo. El diseño del nudo de la viga estaba preparado para poder pasar los esfuerzos de flexión y, a la vez, permitir el deslizamiento del brazo vertical del pórtico (figura 5). La flexión se transmitía por apalancamiento a través de la aplicación de un par de fuerzas

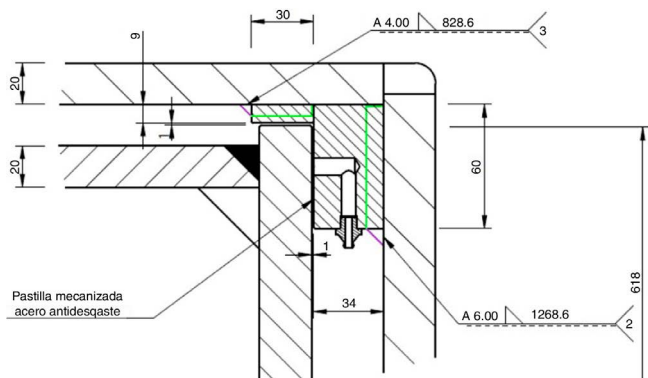


Figura 6. Detalle de contacto en pieza deslizante

a compresión, localizadas en los laterales del marco y aplicadas puntualmente sobre unas placas de acero con alta resistencia al desgaste, convenientemente lubricadas para minimizar el rozamiento (figura 6). La carga vertical se resistía por medio de una unión embulonada en el telescópico y de un cuelgue redundante con barras por el exterior.

Por el uso del hormigón autocompactante, por el trazado y por la geometría del arco fue necesario emplear un panel exterior superior que cerraba completamente el encofrado exterior y generaba un contorno estanco. Dicho panel y las vías superiores sobresalían ligeramente por la parte trasera para poder apoyar el pórtico en el inicio del avance. Esta solución permitió reducir la ocupación del espacio en la cara superior de la sección por parte del carro, permitiendo la instalación de los cables de retenida antes de lanzar el carro.

2.1.2. Esquema estático de trabajo del carro exterior en fase de hormigonado

En la figura 7 se muestra el esquema estático del carro durante la fase de hormigonado en la dovela inicial. Como se puede observar, se trataba de un voladizo empotrado en la estructura del arco por medio de un par de apoyos articulados, de los cuales el apoyo delantero era una articulación fija y el apoyo trasero permitía el desplazamiento longitudinal. Simplificando, el dintel inferior del pórtico quedaba unido a la estructura del arco generando un punto fijo. Las cargas laterales debidas al viento transversal generaban sobre la estructura un empuje lateral y una torsión debida a la descompensación de las superficies de exposición. Para el empuje lateral se dispuso un tope lateral (ver figura 7, sección C-C), y la torsión se convertía en un par de fuerzas paralelas a la directriz del arco, transmitidas al pórtico por las orejetas de cuelgue (ver figura 7, sección C-C) situadas sobre cada una de las vigas armadas de la estructura principal.

2.1.3. Esquema estático y cinemática en la fase de avance del carro

Durante la fase de avance, la estructura del carro estaba formada básicamente por un sistema de dos vigas articuladas entre sí. La primera se encontraba en el pórtico con sus telescopajes internos, y la segunda estaba formada por la estructura principal y la vía inferior (figura 8, esquema del lado derecho). El pórtico entraba en carga al desmontar las 4 barras Macalloy de amarre principal. Las cargas de peso propio normales a la directriz del

arco se transmitían a la estructura a través de dos puntos: en la parte delantera, a través el pórtico de avance y del patín superior a las vías superiores hasta la dovela hormigonada; y en la parte trasera, a través del amarre trasero como reacción hacia al arco. Debido a la inclinación del carro, cercana a 36 grados respecto a la horizontal, la componente del peso propio paralela a la directriz del arco era importante. Al estar el centro de gravedad del carro muy bajo, cercano a la articulación central, la componente de peso paralela a la directriz del arco se transmitía principalmente a través de la vía inferior hasta el amarre trasero, y de este a la estructura. No obstante, un pequeño porcentaje de esta componente se transmite a la parte superior del arco a través del patín y las vías superiores. El movimiento del carro se producía al actuar sobre las barras de avance (inferior y superior) mediante los cilindros hidráulicos de avance. El movimiento se realizaba en avances cortos iguales a la carrera de los cilindros hidráulicos, y durante el retroceso de los cilindros la estructura quedaba retenida mediante un sistema de tuercas de bloqueo. El sistema de avance propuesto se caracterizaba por su simplicidad y alto nivel de seguridad debido a redundancias en los elementos sensibles y al esquema estático. Este último era estable incluso en caso de fallo de uno de los sistemas de avance, produciéndose un enclavamiento del carro sobre las dovelas anteriormente ejecutadas.

2.1.4. Transformación de la pareja de carros en uno

La maniobra de unión de los carros en uno presentó uno de los mayores retos técnicos del proyecto, dado que se produjo a una distancia y altura considerables, encima del embalse. Por otro lado, se requería una elevada precisión en ejecución de los dos ramales del arco para garantizar la posición prácticamente exacta de los carros en la zona de encuentro. El objetivo fue alcanzado por el equipo de obra, ya que las dos maniobras de conexión se realizaron sin dificultades. A partir de la dovela nº 12, los carros han tenido que realizar las últimas puestas con un desfase debido a la reducida distancia entre los ramales. Dicha distancia reducida impedía la colocación de los dos carros en el mismo segmento por interferencias entre los dos equipos. En la figura 9 (vista en planta) se puede observar la secuencia de avance de los carros. En la figura 9a los dos carros están posicionados en la dovela nº 12, en la figura 9b el carro 1 avanza a la dovela nº 13. El carro nº 2 no puede avanzar a la siguiente dovela hasta que el carro 1 no alcance la dovela nº 15, situación reflejada en la figura 9c. Una vez el carro 1 hubo realizado la dovela nº 15, se procedió al desmontaje del panel vertical interior (figura 9d, en la que se observa el carro 2 realizando la dovela nº 14. En la figura 9e los dos carros están posicionados en la dovela nº 15, donde se produce la unión de los carros.

En la fotografía de la figura 10 puede observarse la situación reflejada esquemáticamente en la figura 9c, donde se aprecia la interferencia entre los paneles de encofrado verticales interiores.

La conexión entre los dos equipos se realizó uniendo las vigas transversales telescópicas situadas debajo de los paneles de fondo. En la figura 11a podemos observar la vista en planta de los dos carros antes de la conexión, y en la figura 11b podemos ver las vigas transversales unidas mediante una unión articulada que permitía girar los carros a medida que avanzan hasta quedarse las estructuras principales paralelas entre sí. En esta maniobra fue necesario reconfigurar el panel de fondo para cubrir el hueco entre los dos carros.

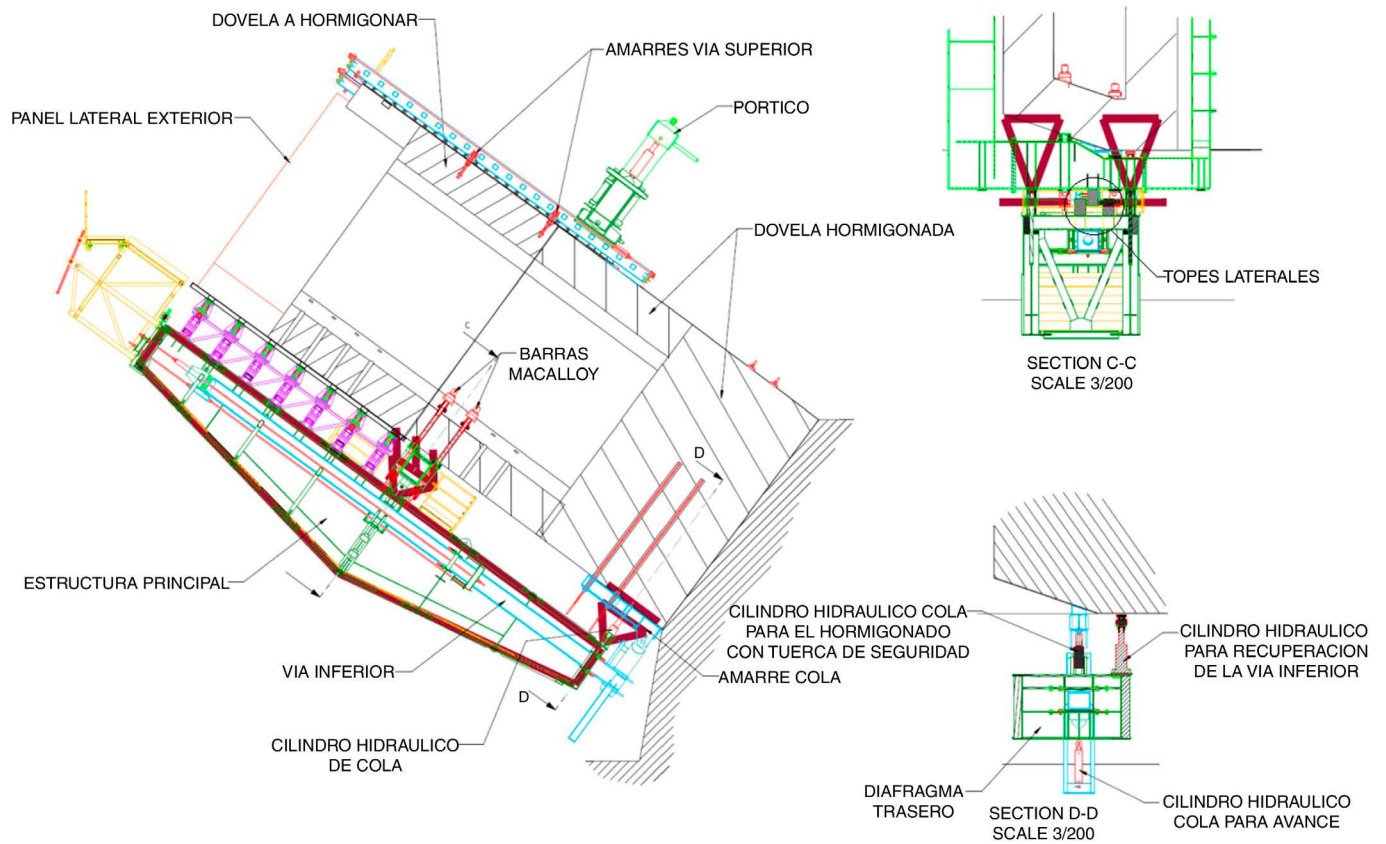


Figura 7. Esquema estático: fase de hormigonado.

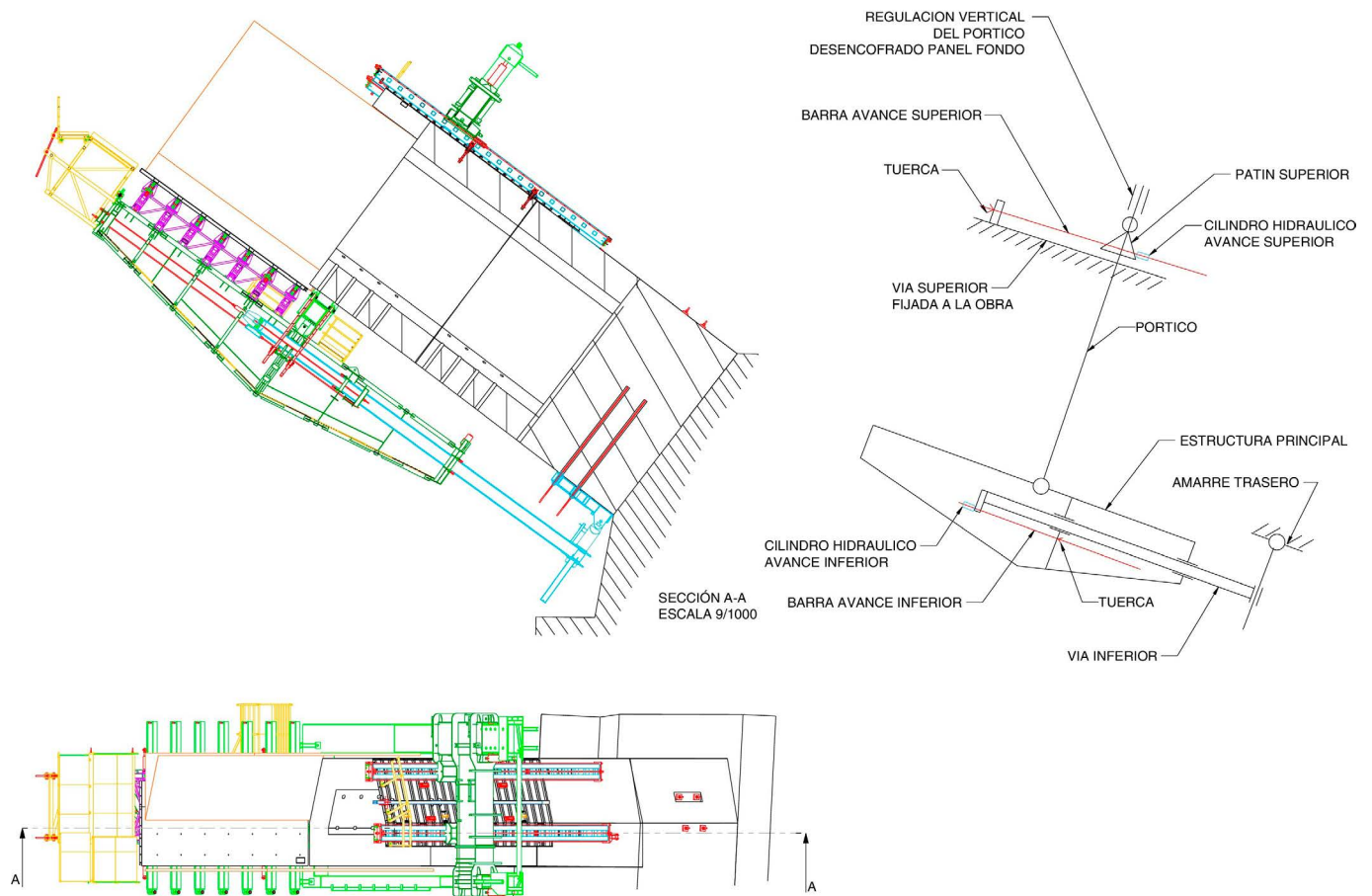


Figura 8. Esquema estático: fase de avance.

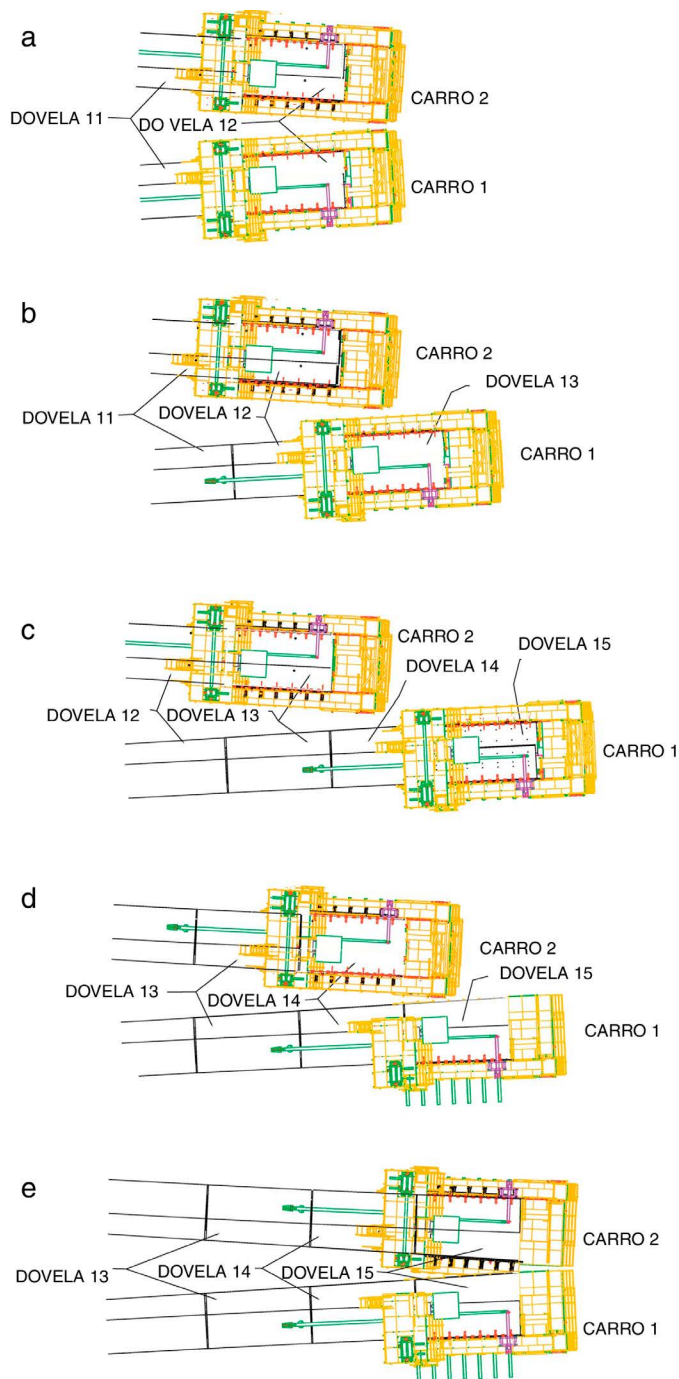


Figura 9. Pasos de aproximación de carros a la dovela n° 15.

La fotografía de la figura 12 es una imagen tomada en la obra desde el estribo lado sur una vez realizada la maniobra de unión de los carros. En el carro derecho podemos ver que el pórtico seguía completo y en el carro izquierdo habrían sido desmontados el elemento vertical y parte del dintel superior.

A partir de este momento los dos carros avanzaron conjuntamente, requiriendo una perfecta coordinación de avance entre los dos lados. El hecho de no estar aún las vías de avance paralelas hizo necesario corregir la separación de los carros mediante ajuste de las vigas transversales para compensar el efecto de convergencia entre los dos ramales. Para tal fin, se prepararon tablas con valores de compensaciones necesarios a aplicar en cada paso durante las maniobras de avance.

2.1.5. Dovela de cierre y desmontaje de carros

Para realizar la dovela de cierre del arco, se realizaron las doveles en el lado sur hasta el segmento número 32. Dicho carro se desmontó mediante las grúas torre situadas sobre la estructura del arco, dejando únicamente las dos estructuras principales situadas debajo del arco. El descenso de las estructuras principales se realizó utilizando el sistema de gatos hidráulicos tipo *heavy lifting* [6] y una barcaza modular para recoger la carga en el embalse. El carro lado norte ha sido utilizado para realizar el segmento de clave. Para realizar esta puesta, se colocaron dispositivos entre los dos semiarcos para absorber los movimientos debidos a efectos térmicos. El carro fue amarrado en ambos lados, trabajando estáticamente como una viga biapoyada. En la figura 13 podemos ver el carro en la dovela de cierre con los amarres delanteros situados en la parte delantera de las estructuras principales.

Una vez realizada la dovela de cierre, se desmontó el carro del mismo modo en el que se hizo con el otro equipo. En la imagen (figura 14) vemos el descenso del equipo y la barcaza en medio del embalse.

2.2. Sistema de encofrado interior

El sistema de encofrado interior se diseñó como un conjunto de paneles metálicos, dotados de sistemas hidráulico-mecánicos para poder realizar ajustes y cambios de geometría para las cerca de 30 diferentes secciones a realizar. De igual forma que en el carro exterior, los encofrados interiores se unieron. La unión se realizó en la dovela n° 17, a diferencia del encofrado exterior, que se realizó en la dovela n° 15. El avance de los encofrados interiores se realizaba en tres fases. Antes de lanzar el carro exterior se retiraba el panel de fondo del encofrado interior para dar acceso a los amarres del carro en la siguiente puesta. A continuación se realizaba el avance, amarre y posicionamiento del carro exterior. Una vez colocadas las barras de armado de la losa de fondo y de los hastiales, se volvía a colocar el panel de fondo del encofrado interior. Dicho panel, y una serie de rodillos amarrados a las caras interiores de las paredes de la puesta recién hecha, servían de soporte para poder realizar el lanzamiento del resto del encofrado interior. En la figura 15 podemos observar los encofrados interiores sin el panel de la losa de fondo. Debajo de los paneles se encuentran los rodillos de lanzamiento (elementos de color rojo). Los paneles del encofrado interior iban dotados de un sistema hidráulico para realizar el lanzamiento a la siguiente posición. En la figura 15, el encofrado exterior se encuentra en la fase de avance.

En las imágenes de la figura 16, a modo de comparación, vemos la transformación del encofrado interior. La imagen a la izquierda fue tomada durante la instalación del encofrado interior en la primera puesta. La imagen de la derecha se tomó en una de las últimas doveles antes de la clave.

Técnicamente, en el diseño se presentaron varios problemas a resolver, de los que destacan la complicada geometría, el sistema de avance y el problema de la flotación de los paneles de fondo. En el sentido vertical la posición del encofrado interior y exterior era muy variable debido a los continuos cambios de espesores de la losa inferior, obligando a disponer cerca de 900 taladros en cada encofrado para el paso de las barras de atado en todas las situaciones. Cada uno de los taladros incor-



Figura 10. Detalle de posición de los carros en desfase debido a la interferencia entre los dos carros.

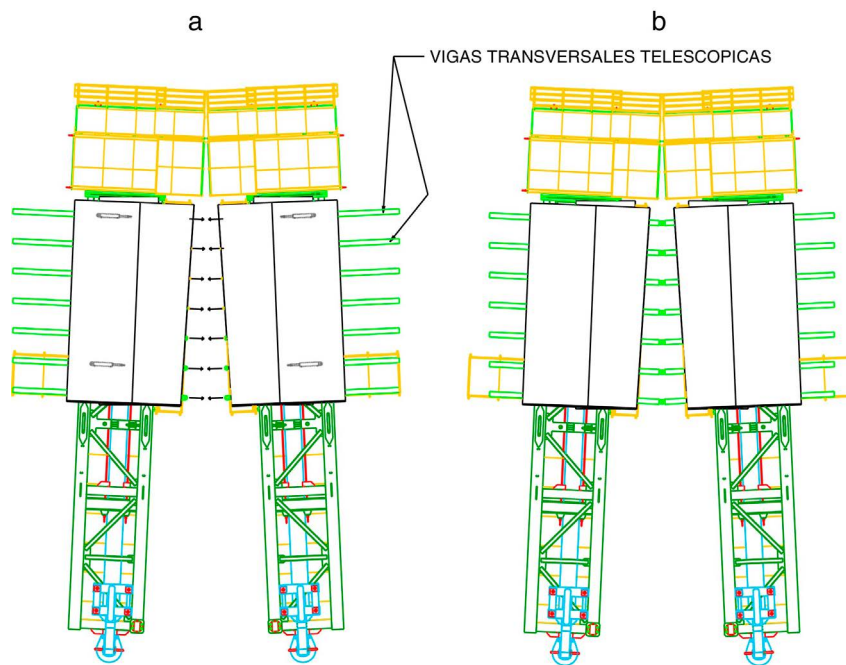


Figura 11. Detalle de la unión de carros.



Figura 12. Vista trasera desde el estribo de los carros una vez realizada la maniobra de unión de carros.



Figura 13. Detalle de carro norte en el segmento de cierre del arco visto desde el lado sur.



Figura 14. Descenso del carro lado norte.



Figura 15. Detalle de paneles de encofrado interior.

poraba un tapón mecanizado para garantizar un buen acabado del hormigón.

3. AGRADECIMIENTOS

Para la empresa Rubrica Ingeniería y Arquitectura y todo su equipo técnico, el proyecto del puente sobre el río Almonte fue uno de los retos más importantes en su historia y ha sido un honor poder participar en el proyecto aportando sus soluciones.

Primero nos gustaría agradecer a la UTE Alcántara-Garrovilas, compuesta por FCC Construcción y Conduril, la confianza depositada en nuestra empresa para el desarrollo del diseño y suministro de los equipos para ejecución del arco.

Durante la fase de desarrollo del diseño el equipo SSTT de FCC ha participado activamente aportando ideas y soluciones para numerosos problemas que se presentaban durante el proceso. Desde la empresa IDEAM hemos recibido gran apoyo en la fase de verificaciones del diseño y aportes en la definición de detalles estructurales.

Por último, a todo el equipo de obra, empezando por el jefe de obra, jefe de maquinaria, jefes de producción, los encargados y operarios que han trabajado con nuestros equipos.

Referencias

- [1] ACHE. Hormigón autocompactante: Diseño y Aplicación. Monografía M-13. 2008.
- [2] Sánchez de Muniáin J.M. Meeting point. Bridge design & Engineering. 2015, n° 79, 2.º Q.
- [3] Ministerio de Fomento, Instrucción de acero estructural (EAE), Ministerio de Fomento, Madrid, 2011.
- [4] CTN 76. Apoyos estructurales. Parte 1: Reglas generales de diseño. UNE-EN 1337-1:2001. Madrid. AENOR. 2001.
- [5] CEN. Cimbras. Requisitos para el comportamiento y diseño general. UNE-EN 12812:2008. Madrid. AENOR. 2008.
- [6] ACHE. Recomendaciones para el movimiento de grandes pesos. Monografía M-25. 2015.



Figura 16. Detalle de paneles de encofrado interior.