

Construcción del nuevo puente sobre el río Tajo en Alcántara

Construction of the new bridge over Tajo River in Alcántara

Óscar Ramón Ramos Gutiérrez^a, Jorge Quintana García^b, Ramón Sánchez de León^c,
Rubén Mateos Morillo^d, Salvador Tordera Baviera^e, Pedro Agustín Rodríguez Izquierdo^f

^aDr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ORRAMOS INGENIERÍA. CEO. Universidad de Cantabria.

oramos@orramoseng.com

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. ORRAMOS INGENIERÍA. Jefe de Proyecto. jquintana@orramoseng.com

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. ESTUDIO AIA. Director de Obra Civil. rsanchezdeleon@estudioaia.com

^dIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. ROVER. Jefe de Obra. rmateos@rovergrupo.com

^eIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. ROVER. Director Técnico. stordera@rovergrupo.com

^fIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Junta de Extremadura. Director de Obra. Pedro.rodriguez@juntaex.es

RESUMEN

El nuevo puente sobre el río Tajo (Cáceres) en Alcántara es un puente arco de tablero superior y sección transversal mixta (para el arco y el tablero). El elemento de mayor singularidad de la estructura es su arco principal de 180 m de luz, empotrado en las márgenes del río. La construcción del semiarco izquierdo se lleva a cabo mediante torres de apeo provisionales, mientras que la construcción del semiarco derecho se lleva a cabo con la ayuda de una torre de atirantamiento provisional y 5 parejas de tirantes (más la retenida). Una vez contruidos ambos semiarcos se procede a la maniobra de apertura en clave y al cierre final. Posteriormente se hormigona el arco en distintas fases y se colocan las pilas y el tablero.

ABSTRACT

The new bridge over Tajo River (Cáceres) in Alcántara is an arch bridge with a superior deck, both composite (steel and concrete). The most singular element in the bridge is the main arch with 180 m length and fixed on both sides of the river. The construction of the left semiarch is carried out with temporary supporting piers, whereas the right semiarch (over Tajo river) is carried out with a temporary stay tower with 5 pairs of cables (plus the backstay). Once both semiarchs are built the jacking apart of the crown operation and the final closure of the arch are done. Afterwards, the pour of the arch in several phases and the placement of the piers and the deck are carried out.

PALABRAS CLAVE: arco, sección mixta, construcción, torre de atirantamiento.

KEYWORDS: arch, composite section, construction, temporary stay tower

1. Descripción del puente

El proyecto del nuevo puente de Alcántara ya fue presentado en el VIII Congreso ACHE [1]. En esta ponencia se describen aspectos

particulares relativos a su construcción. El nuevo puente arco de Alcántara cruza el río Tajo a la altura del municipio de Alcántara (Cáceres). Se

trata de un puente tipo arco de tablero superior y sección mixta. La longitud total del puente entre estribos es de 267 m, con un arco de 180 m de luz. El tablero está formado por vanos de 18 m en cuyo lateral se adosa una pasarela metálica peatonal. El tablero se conecta al arco a través de 8 pilas metálicas y un tímpano sobre la clave del arco. La sección transversal del arco es un cajón mixto de 5 m de ancho por 2 m de canto, con 3 aligeramientos interiores de 1.2 m de diámetro. El tablero se resuelve mediante un cajón mixto convencional.

En este artículo se desarrolla la ingeniería de detalle y medios auxiliares para la construcción del viaducto. Dada la singularidad del emplazamiento, y la propia envergadura del arco, la construcción se acomete de manera diferenciada en cada una de las márgenes del río Tajo:

Semiarco izquierdo. Se lleva a cabo mediante el uso de 4 torres de apeo provisionales cimentadas mediante pilotes en el terreno. El arco se apoya en las torres mediante aparatos de apoyo de neopreno, lo que flexibiliza, y reduce la fuerza lateral transmitida a las torres.

Semiarco derecho. Para la construcción de este semiarco se desarrolla el procedimiento de atirantamiento provisional mediante el empleo de 5 tirantes anclados en el propio arco y en una torre de atirantamiento proyectada a tal efecto.

Una vez contruidos los dos semiarcos, se lleva a cabo una maniobra de apertura en clave mediante gatos hidráulicos.

Además de la definición de la secuencia de montaje y tesado, se describen en este artículo las particularidades del diseño de los distintos elementos auxiliares necesarios para la construcción, como son: la pieza de anclaje de la retenida, torre de atirantamiento, sistema de apertura en clave, piezas de cogida tirante-arco, etc.

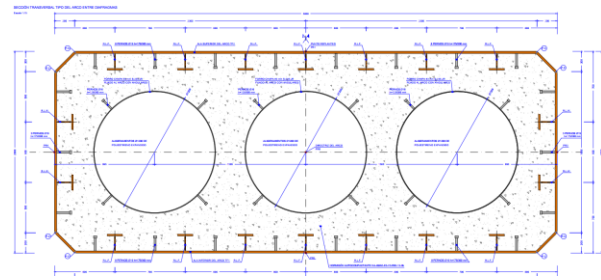


Figura 1. Sección transversal del arco

Una vez terminada la construcción del arco en su fase metálica se procede a su hormigonado (con hormigón autocompactante) por tramos de corta longitud, de esta manera las sucesivas secciones del arco hormigonadas en primer lugar pasan a trabajar como mixtas para soportar los esfuerzos de las siguientes etapas de hormigonado, optimizando el diseño final del arco.

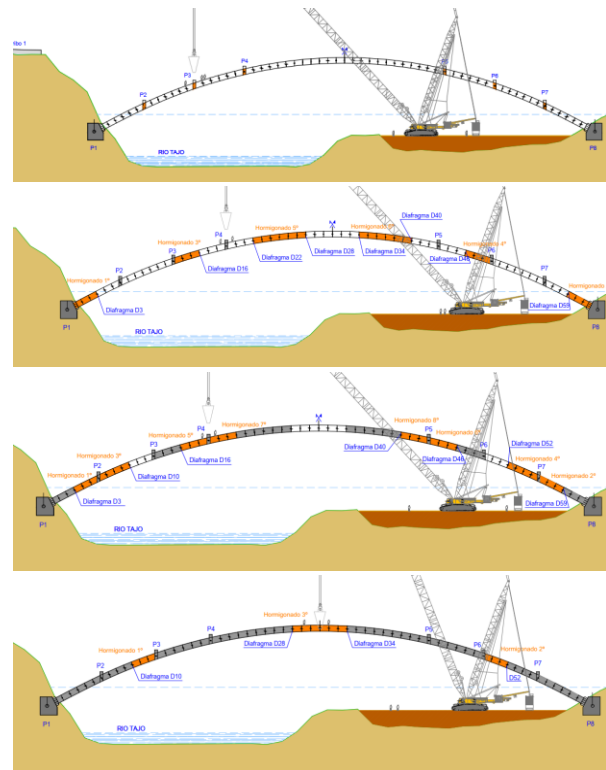


Figura 2. Etapas de hormigonado del arco

Por último, se procede a la colocación de las pilas y tablero y al hormigonado de la doble acción mixta y de la losa superior del tablero. Estas últimas fases de construcción se realizan de manera convencional sin ningún aspecto singular que señalar.



Figura 5. Estructura auxiliar para la colocación de barras de anclaje en semiarco derecho

Otra particularidad de estos plintos es la presencia de hormigones de distintas resistencias. Los metros superiores del plinto (contacto con el arco) son de hormigón HA-50, mientras que las zonas inferiores son de hormigón HA-35. Esto provoca la presencia de una junta fría horizontal que no es perpendicular al axil transmitido por el arco y que, por tanto, es necesario armar con detalle.



Figura 6. Hormigonado de la segunda fase del semiarco derecho

Dada la singularidad de la geometría de los plintos, que se adaptan al contacto con el macizo rocoso, se elaboraron sendos modelos de elementos finitos tipo sólido para determinar de manera más precisa los esfuerzos que solicitan la junta fría de hormigonado, y obtener la adecuada armadura de cosido.

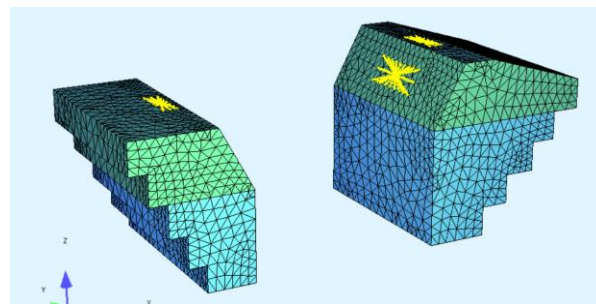


Figura 7. Modelo de cálculo para el estudio de la junta en plintos

3. Semiarco izquierdo

La construcción del semiarco izquierdo se lleva a cabo con la ayuda de torres de apeo provisionales. Se han dispuesto 4 torres de apeo provisional cimentadas con pilotes y colocadas al nivel de los diafragmas de unión pila arco. En el Proyecto original se definían 5 torres de apeo estando la última situada justo debajo de la clave del arco. Sin embargo, debido a lo escarpado del terreno en esta ubicación se decidió retrasar la posición de esta torre y definir una nueva configuración con 4 elementos (en el que la última torre ya no está situada bajo la clave del arco, sino desplazada 6.0 m).

La conexión entre las torres de apeo provisionales y el arco se realiza mediante aparatos de apoyo de neopreno (2 por apoyo). Frente a otros tipos de conexiones, los neoprenos permitieron reducir los esfuerzos de demanda sobre las torres, sobre todo aquellos derivados de las deformaciones impuestas por la acción térmica. Para el correcto contacto entre el arco y las torres se definieron unas cuñas metálicas de canto variable soldadas a la chapa inferior del arco (adaptadas a la pendiente del arco en cada punto).

Finalmente se llevaron a cabo modelos de cálculo con láminas de las secciones de apoyo del arco sobre las torres y se definieron los refuerzos locales necesarios en el arco para transmitir las reacciones.

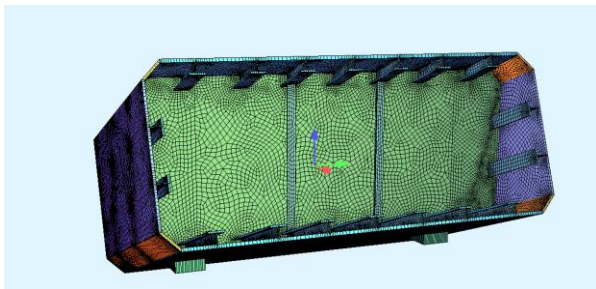


Figura 8. Modelo de cálculo de apoyo sobre torres



Figura 9. Torres de apeo en semiarco izquierdo

4. Semiarco derecho

Como se ha mencionado anteriormente el semiarco derecho se construye con la ayuda de una torre de atirantamiento ubicada al nivel de la carretera actual, detrás de la posición del estribo. De la cabeza de esta torre nacen las 5 parejas de tirantes que sostienen el arco, formadas por parejas de cables de 7 cordones de 165 mm^2 (salvo el T3 que tiene 12 cordones) y la pareja de cables de retenida, formados por 29 cordones de 165 mm^2 .

4.1 Torre de atirantamiento

La torre tiene 24.5 m de altura, y está formada esencialmente por un pórtico con 2 soportes HEM-700 arriostrados transversalmente mediante montantes y un plano de diagonales HEB-200. La torre se cimenta de manera directa sobre la roca y se conecta a la cimentación mediante un sistema de orejetas con bulones. Esta unión bulonada se estudió mediante un modelo de elementos finitos.



Figura 10. Torre de atirantamiento

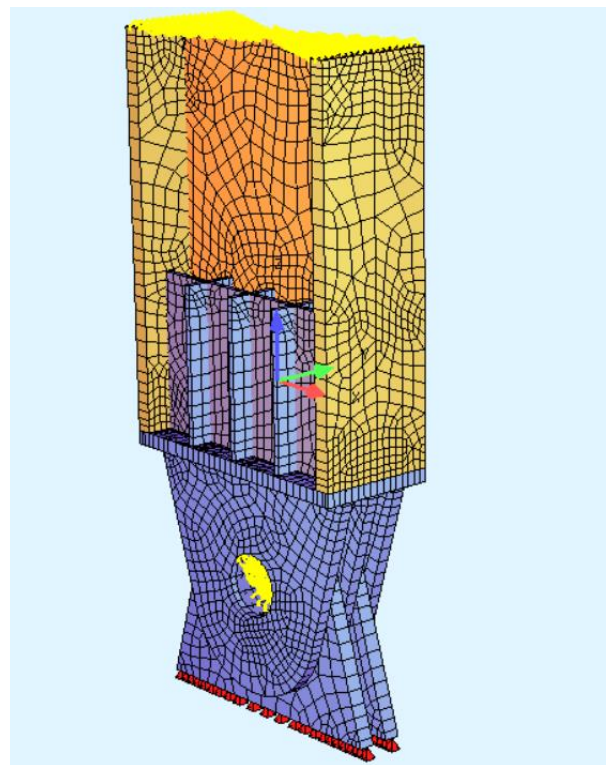


Figura 11. Modelo de cálculo de unión con bulones

Para el montaje de la torre fue necesario el dimensionamiento de un sistema de estabilización temporal para sujetarla hasta que la retenida y el primero de los tirantes delanteros entrasen en carga. Esta estabilización se llevó a cabo mediante unos perfiles IPE soldados a los soportes principales, que, una vez estabilizada la

torre con los tirantes, se cortan con soplete para no afectar a los tesados.



Figura 12. Unión bulonada con estabilizadores

4.2 Anclaje de la retenida

Uno de los elementos más críticos del sistema de atirantamiento es el anclaje de la retenida al terreno, ya que de él depende la estabilidad de todo el sistema. Cada cable de retenida de la torre de atirantamiento se ancla en una zapata de hormigón armado de 3.50 x 3.25 x 1.00 m a través de una chapa de acero de 50 mm encastrada en la zapata. La unión entre la zapata y la chapa de acero se lleva a cabo mediante pernos conectadores y mediante 14 barras roscadas $\phi 32$ tesadas al 70% de su carga de rotura. El atado de la zapata contra el terreno se realizó mediante 3 anclajes activos (10 cordones de 140 mm² cada uno) que se anclan en la chapa de acero y contra el macizo rocoso.



Figura 13. Anclaje de la retenida de la torre

Dada la responsabilidad de este elemento se estableció un doble mecanismo resistente: por un lado, la chapa de acero rigidizada es capaz de soportar los esfuerzos de demanda mediante su propia capacidad a flexión y, por otro lado, se dimensionaron las barras verticales de conexión chapa – zapata para colgar toda la reacción vertical y hacer trabajar al conjunto del elemento.



Figura 14. Anclaje de la retenida de la torre

El proceso de tesado de los anclajes al terreno (que resulta crítico para el propio funcionamiento de la zapata – pues se realizó en su totalidad antes de iniciar el proceso de atirantamiento de la retenida de la torre –) fue monitorizado en términos de deformaciones e integridad de la estructura de anclaje y de estabilidad en la tensión del anclaje.

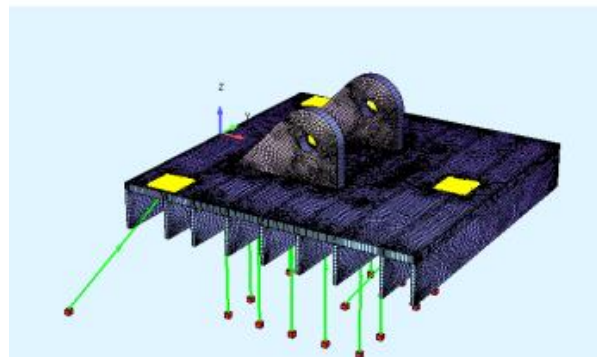


Figura 15. Modelo de retenida con chapa de acero

4.3 Sistema de atirantamiento

El sistema de atirantamiento está formado por 5 parejas de tirantes, cuya ubicación se adapta a la tramificación de fabricación e izado de las dovelas del arco. Los puntos de anclaje de los tirantes en el arco se corresponden con la posición de los diafragmas de pila del arco, salvo en el caso del tirante provisional 'T3' (que se ancla unos 3 m por detrás del final de la dovela 5, coincidiendo con uno de los diafragmas abiertos del puente).

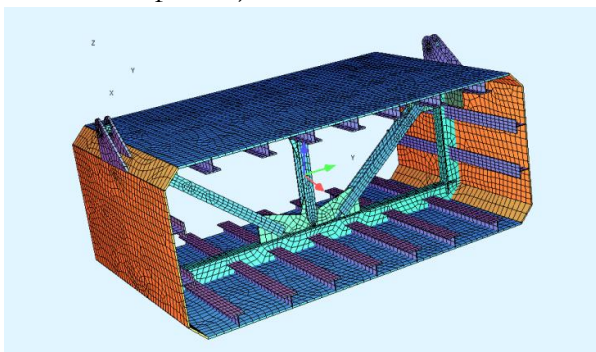


Figura 16. Modelo de cálculo de los anclajes del arco



Figura 17. Orejeta de anclaje en el arco

Para realizar el anclaje de los cables en la torre se reforzó y se ensanchó convenientemente la cabeza de la torre, tal como se muestra en las imágenes.

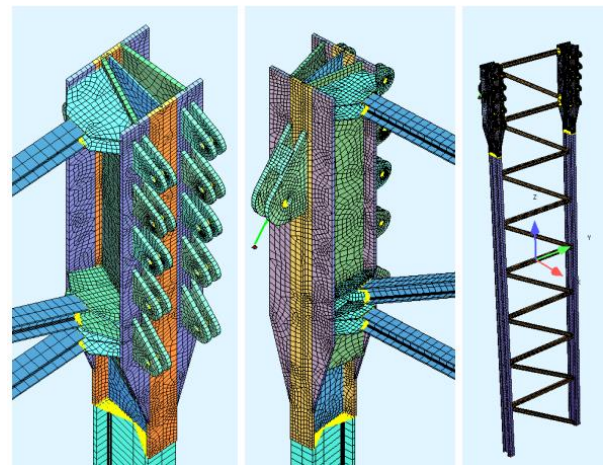


Figura 18. Modelo de cálculo de la cabeza de la torre

4.4 Tirante aeroelástico

A partir de la colocación de la sexta dovela el arco tiene cierto riesgo de inestabilidad aeroelástica por desprendimiento de torbellinos. Por ello se definió un tirante aeroelástico por delante del arco para aportar rigidez vertical a la estructura. Este tirante se ancla a unas orejetas por debajo del arco y al lateral de la cimentación de la torre de apeo provisional 4.

Este tirante se destesa para cada operación de tesado de los tirantes principales ya que, si no, afectaría a la distribución de cargas entre tirantes. Hay que señalar que no se ha observado ningún comportamiento anómalo del semiarco en relación con la acción del viento durante la etapa constructiva.



Figura 19. Tirante aeroelástico

4.5 Secuencia de izado de dovelas

El anclaje activo de los tirantes se situó en la torre y el pasivo en el arco. Esto hace más cómoda la maniobra, teniendo acceso a todos los

anclajes a la vez y causa una menor afección al arco, ya que los anclajes pasivos son de menor entidad. El proceso de tesado seguido para cada ciclo de tesado sigue la siguiente secuencia:

- Colocación de la nueva dovela.
- Ejecución de soldadura mínima para el suelte de la grúa.
- Tesado inicial del nuevo tirante para recuperar la flecha.
- Ajuste de los tirantes previamente instalados en las fases anteriores.
- Retesado del nuevo tirante para fijar la posición final de la dovela.

Cabe destacar que la maniobra de tesado se llevaba siempre a cabo a primera hora de la

mañana para limitar la influencia del gradiente térmico, que en una estructura de estas características tiene un efecto relevante. Debido a este gradiente el arco estaba en su cota teórica a primeras horas de la mañana y descendía conforme el arco iba cogiendo temperatura.

El tesado se realizaba siempre por escalones de carga tomando la topografía del arco en cada escalón y comparando con los valores teóricos esperados. Se ha mantenido durante todo el proceso una diferencia de unos 10 – 20 mm entre las cotas teóricas y las finalmente conseguidas.



Figura 20. Izado de dovela 8 tramo atirantado

Particularmente singular fue el proceso de izado de la última dovela del tramo atirantado (dovela 8). Puesto que, tal como se ha explicado anteriormente, no fue posible ubicar la torre de apeo 4 bajo la clave del arco, ha sido necesario proyectar una estructura auxiliar colgada de la última dovela del semiarco izquierdo para poder apoyar en ella la última dovela del semiarco atirantado.



Figura 21. Estructura auxiliar inferior

5. Maniobra de apertura en clave

Una vez finalizada la construcción de los dos semiarcos se procede al proceso de destesado de los tirantes y al desapeo de las torres del semiarco izquierdo, proceso que, junto con la apertura en clave del arco, permite transferir el adecuado esfuerzo axil al arco.

Durante este proceso ambos semiarcos están vinculados frente a esfuerzos axiales por el bloque de los gatos de apertura en clave, pero necesitan también compatibilizar sus desplazamientos verticales (habida cuenta de que la rigidez del semiarco sobre torres difiere notablemente de la rigidez del semiarco sobre tirantes). Para ello, aprovechando la estructura auxiliar de apoyo del semiarco atirantado en el otro frente, se completó dicha estructura auxiliar con otra de similares características por la parte superior del arco, a modo de “mordaza”. El apoyo del semiarco derecho sobre la estructura auxiliar se materializó mediante aparatos de neopreno con un teflón, que permite su libre movimiento en longitudinal. En dirección transversal se topan los apoyos de tal forma que ambos semiarcos actúan solidariamente ante acciones de viento y gradiente transversal.



Figura 22. Neoprenos en estructura auxiliar

Para el estudio de la estructura auxiliar y de la transmisión de esfuerzos de esta estructura al arco se modeló toda la zona mediante un modelo de elementos finitos tipo lámina. Con ello se

definieron los refuerzos pertinentes en el interior del arco.

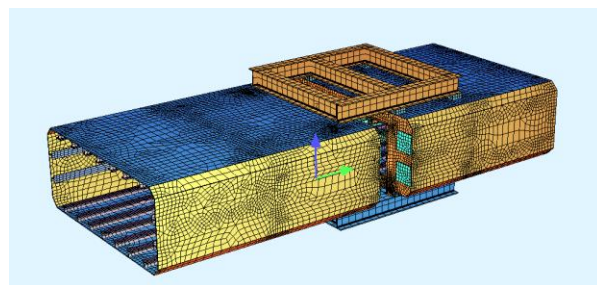


Figura 23. Modelo de cálculo de la zona de clave

Así pues, la maniobra de destesado, desapeo y apertura en clave se definió con las siguientes fases:

- Tras el izado y atirantamiento de la última dovela del semiarco atirantado, instalación de la estructura auxiliar superior tipo “mordaza”.
- Colocación y bloqueo de los gatos de apertura en clave.
- Desapeo de las torres y destesado de tirantes (de manera secuencial).
- Ajuste de fuerza en gatos y apertura de los arcos hasta su posición teórica.
- Bloqueo de gatos para la realización de la soldadura de dovela de cierre.

Durante toda la maniobra de desapeo se continuaron controlando las presiones en los gatos, y la geometría del arco, con especial atención a los efectos del gradiente térmico en las primeras etapas de mayor hiperestaticidad en el conjunto del arco.



Figura 24. Estructura de bloqueo y gatos

Señalamos, como ya es conocido [2], que, dada la relación entre el axil del arco en su fase metálica y el axil final en su fase mixta, en este tipo de estructuras no es tan relevante llevar a cabo la operación de apertura en clave.

6. Cierre en clave

Finalmente, con el arco ya desapeado y en la posición final deseada, se procede a la soldadura de la dovela de clave. En primer lugar se sueldan las almas y los chaflanes del arco y, posteriormente, las alas, dejando un hueco en ellas para poder retirar los gatos una vez que se ha realizado la transferencia de carga al arco.

Destacamos la necesidad de llevar a cabo durante este proceso un control de los propios esfuerzos internos que se originan durante el proceso de soldadura, debido a la aportación de calor y al posterior enfriamiento.



Figura 25. Soldadura de la clave

Modificando las presiones de los gatos es posible conseguir un estado tensional prácticamente neutro en la dovela de cierre, como es deseado.

7. Hormigonado del arco

Como se ha comentado anteriormente el hormigonado del arco se lleva a cabo mediante hormigón autocompactante, del que se han realizado varios ensayos para su puesta en obra.

En el arco se dejaron ventanas para el hormigonado en las dovelas que posteriormente

se sellarán. Para un correcto hormigonado se han dispuesto unas chimeneas por las que se controla la salida de aire del interior del arco. Se hormigona el arco hasta que las chimeneas rebosan, de tal forma que se asegura que el hormigón llena completamente el arco.



Figura 26. Hormigón en el interior del arco

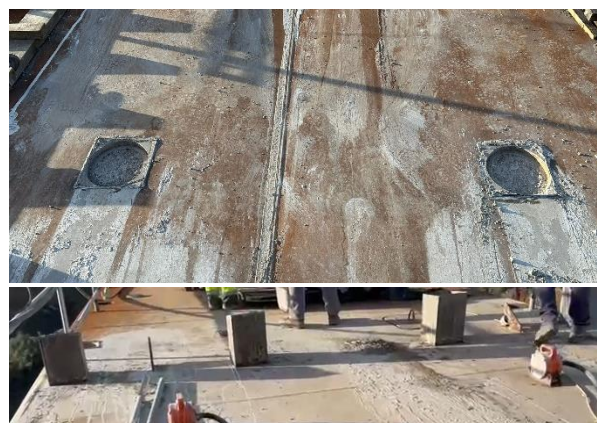


Figura 27. Ventanas y chimeneas de hormigonado

Una vez concluido el hormigonado se procederá a un chorro de la superficie del arco para su limpieza y correcto acabado.

Referencias

- [1] R. Sánchez de León, A. Herrera Gómez, F. Sánchez de León, *Proyecto del nuevo puente arco de Alcántara en la EX117 (Cáceres)*, VIII Congreso de ACHE, Santander, Abril de 2020.
- [2] S. Pérez-Fadón, J.E. Herreo Benítez, *Proyecto y construcción del Arco Ricobayo*. Hormigón y Acero, vol 50, nº 212, ene 1999.