

Puente arco de Pardais. Línea de alta velocidad tramo Évora-Elvas (Portugal)

Pardais Arch Bridge. High-speed line Évora-Elvas section (Portugal)

Jose Fermín Serrano Miguel^a, Cristian Bernal Pérez^b, Antonio González Trelles^c,
Rui Lopes^d, Rafael Guillén Carmona^e, Miguel Tejada Matías^f

^a Máster en Ingeniería de Estructuras, cimentaciones y materiales. SACYR. Estructuras Obra Civil en Central. jfserrano@sacyr.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SACYR. Estructuras Obra Civil en Central. cbernalp@sacyr.com

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SACYR. Jefe de producción. atrelles@sacyr.com

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SACYR. Jefe de Oficina Técnica. rflopes@sacyr.com

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SACYR. Jefe de Estructuras Obra Civil en Central. rg Guillén@sacyr.com

^f Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. SACYR. Jefe de obra. mtejeda@sacyr.com

RESUMEN

Este artículo describe la construcción del viaducto de Pardais, un puente arco de hormigón in situ de 140 m de luz en la LAV Évora-Elvas (Portugal). Se sustituyó la cimbra cuajada del proyecto original por un sistema de torres y apertura en clave con gatos hidráulicos, lo que permitió un ajuste preciso en la fase final de hormigonado, optimizando la distribución de tensiones y la integración estructural. El uso de diversos instrumentos de monitorización, como extensiómetros, permitió controlar en tiempo real las deformaciones y cargas. Adicionalmente, debido a restricciones de plazo, el tablero se construyó en orden inverso al diseño original. El proceso involucró a Pondio (ingeniería), Construgomes (torres y cimbras) y VSL (gatos).

PALABRAS CLAVE: puente arco, construcción, monitorización estructural, hormigón pretensado.

ABSTRACT

This paper presents the construction of the Pardais Viaduct, a 140 m span cast-in-place concrete arch bridge on the Évora-Elvas High-Speed Railway Line (Portugal). The original full-shoring system was replaced with a tower-supported framework and a key segment closure technique using hydraulic jacks. This approach enabled precise alignment during the final concreting phase, optimizing stress distribution and structural integration. The use of various monitoring instruments, such as extensometers, enabled real-time control of deformations and loads. The project involved Pondio (engineering), Construgomes (shoring and formwork), and VSL (hydraulic jacks).

KEYWORDS: arch bridge, construction, structural monitoring, prestressed concrete.

1. Introducción

La Nueva Conexión Ferroviaria entre Évora Norte y Elvas/Caia (frontera con España) forma parte del Corredor Sur, establecido como uno de los ejes de desarrollo prioritarios dentro del Plan Estratégico de Transportes e Infraestructuras - horizonte 2014-2020 (PETI 3+) para el sector ferroviario. Sus principales objetivos son:

- Reforzar la conexión ferroviaria con el puerto de Sines como puerta de entrada a Europa, aumentando su atractivo, especialmente en la Península Ibérica, ampliando su área de influencia y coordinándose con otras conexiones a los puertos de Lisboa y Setúbal.
- Ofrecer una solución de transporte ferroviario de mercancías más eficiente, ya sea en trayectos directos o como parte de una cadena logística intermodal, impulsando así la competitividad de la economía nacional.
- Mejorar la movilidad de personas entre las regiones del Alentejo y Lisboa y el Valle del Tajo, además de fortalecer la conectividad internacional del territorio.



Figura 1. Localización geográfica de la nueva conexión ferroviaria

La Nueva Conexión Ferroviaria entre Évora Norte y Elvas/Caia está compuesta por tres líneas ferroviarias.

Sacyr fue adjudicatario de la Línea de Évora, la cual se extiende desde el PK 126+000 de la actual Línea de Évora (al norte de Évora) hasta el PK 204+134, conectando con la actual

Línea del Este en dirección a España, con una longitud total de aproximadamente 78.1 km.

En este tramo se encuentran un total de 13 viaductos de diferentes tipologías, entre los que se encuentra el **viaducto de Pardais**.

2. Descripción del viaducto

El viaducto se desarrolla entre los P.K. 170+545.343 y 171+330.343 del trazado, con una longitud total de 785 m y una altura máxima sobre el terreno de aproximadamente 35 m.

Debido a la altura sobre el terreno, se adoptó una configuración con 20 vanos interiores de 35 m, una zona central en arco con un vano de 140 m y vanos de extremo de 25 m, siendo la configuración final 25m + 11×35m + 140m + 6x35m + 25m. El arco está compuesto por una sección hueca de 2.4×3.0 m, con una geometría exterior en forma de sección rectangular achaflanada, macizada en las proximidades de los pilares que se apoyan en el arco y en las secciones críticas (inicio y cierre del arco).

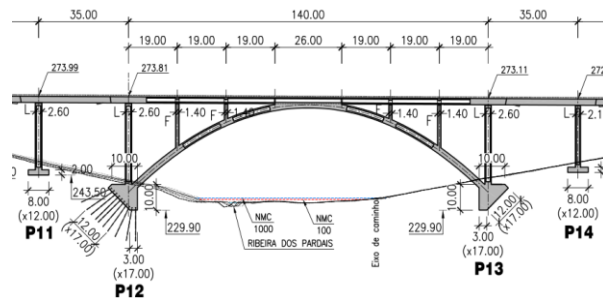


Figura 2. Alzado longitudinal del arco

El viaducto cuenta con un tablero de hormigón pretensado, compuesto por una sección de 2.4 m de altura, con una base inferior de 3.40 m de ancho, que se ensancha 0.30 m a cada lado en su parte superior. La anchura total del tablero es de 7.1 m, incluyendo dos voladizos laterales.

El tablero está fijado en la zona central del arco entre los pilares P12 y P13 y apoyado en el

resto de los pilares mediante aparatos guiados móviles en la dirección longitudinal.

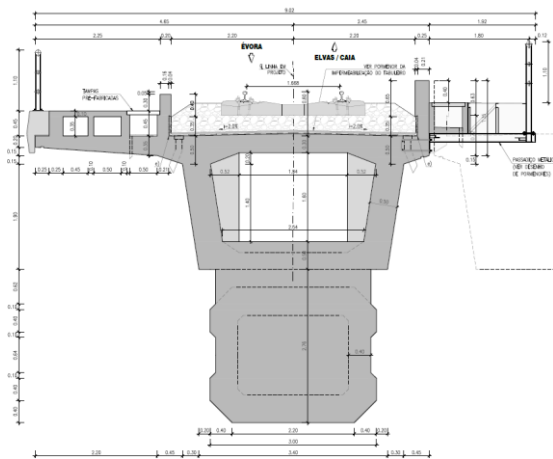


Figura 3. Sección de tablero y arco sobre apoyos

Los pilares presentan, en general, una sección rectangular hueca de $2.1 \times 3.0 \text{ m}^2$, excepto en los pilares P12 y P13, donde la sección es de $2.60 \times 3.0 \text{ m}^2$. Su geometría exterior corresponde a una sección rectangular modificada con configuración hidrodinámica. La conexión con el tablero se realiza, en la mayoría de los casos, mediante aparatos de apoyo guiados móviles en la dirección longitudinal, con la excepción del pilar P10, donde los aparatos de apoyo son libres en ambas direcciones. En la parte superior de los pilares con aparatos de apoyo, la sección varía en una altura de 2.0 m, con un ensanchamiento de 0.40 m a cada lado en la dirección transversal del tablero, permitiendo la instalación de los aparatos de apoyo sobre una base de $2.1 \times 3.8 \text{ m}^2$.

Los apoyos intermedios del arco están compuestos por pilares rectangulares de sección modificada, con dimensiones de $3.00 \times 1.40 \text{ m}^2$. La conexión de estos pilares con el tablero se realiza mediante aparatos de apoyo fijos en las direcciones transversal y longitudinal.

Las cimentaciones de los pilares son directas, mediante zapatas con dimensiones en planta de $7.0 \times 12.0 \text{ m}^2$ y $8.0 \times 12.0 \text{ m}^2$, con una altura de 2.0 m, excepto en el arco, donde la cimentación se compone de macizos de $12.0 \times 17.0 \text{ m}^2$ con una altura máxima de 10.0 m. Debido a las condiciones geotécnicas en la zona de cimentación del pilar P12, ha sido necesario

reforzar el macizo con un conjunto de micropilotes para garantizar la estabilidad del conjunto y mantener los valores de asentamiento dentro de límites aceptables.



Figura 4. Amortiguadores FVD

Para reducir los esfuerzos por frenado, arranque y sismo, se instalaron dos **FVD (Fluid Viscous Dampers)** en cada estribo. En la solución adoptada, estos dispositivos actúan únicamente como amortiguadores para cargas dinámicas rápidas, mientras que permiten el libre desplazamiento frente a las demás acciones.

3. Proceso constructivo

3.1 Proceso constructivo original

En el proyecto original se propone el uso de una cimbra completa apoyada en el terreno. Sin embargo, el principal desafío de este método radica en la fase de descimbrado.

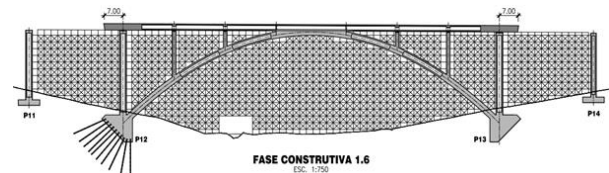


Figura 5. Cimbrado propuesto en el proyecto original

Al finalizar la construcción, el peso del arco recae completamente sobre la cimbra, sin

estar sometido a esfuerzos axiales de compresión. A medida que se retiran progresivamente los apoyos, el arco busca una nueva geometría, lo que puede generar desequilibrios y momentos flectores significativos que requieren un control riguroso.

Dado que esta fase no fue analizada en el diseño original, Pondio realizó a petición de SACYR un estudio detallado de todas las etapas constructivas para garantizar la capacidad resistente de la estructura durante el proceso de construcción.

Este sistema tiene una complejidad muy elevada y además presenta serios riesgos de que la geometría final del arco más tablero no sea la correcta.

Con este sistema de construcción es necesario ejecutar el arco con una geometría sensiblemente diferente a la directriz parabólica de proyecto, porque al retirar las torres el sistema arco + tablero descenderá.

Es necesario que durante el proceso de descimbrado (gateo de las torres) se alcance una precisión que está fuera de la tolerancia de la obra civil.

Además, sería absolutamente imprescindible realizar el gateo de las 6 torres de manera simultánea y tener en cuenta los posibles asentamientos verticales de las torres e incluso el acortamiento elástico por compresión de las torres metálicas.

Desde un punto de vista teórico, el sistema planteado es viable; sin embargo, su aplicación práctica genera incertidumbres significativas respecto a la geometría final del arco. Es fundamental destacar que cualquier desviación de la forma teórica prevista podría comprometer el comportamiento estructural y invalidar las hipótesis de diseño establecidas en la fase de proyecto.

Con el objetivo de garantizar una geometría óptima del arco durante su construcción sin modificar sustancialmente el diseño original, se decidió ajustar el proceso

constructivo según lo descrito en el apartado siguiente.

3.2 Proceso constructivo actualizado

El nuevo procedimiento constructivo del arco del Viaducto de Pardais propone el uso de una cimbra porticada, con torres ubicadas estratégicamente sobre las cimentaciones de las pilas P-12 y P-13, las cuatro pilas del arco y la zona de transición entre el arco y el tablero.

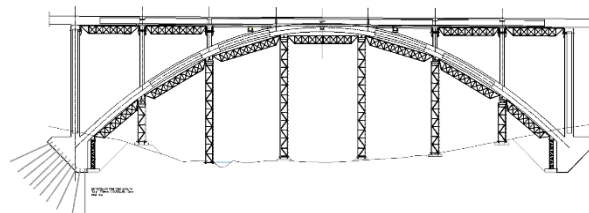


Figura 6. Cimbrado actualizado del arco

Para la ejecución del tablero, se ha considerado un sistema de celosías apoyadas en las pilas, aunque también podría construirse mediante una cimbra apoyada sobre el arco. No obstante, esta última opción tiene un impacto menor en la distribución de esfuerzos del arco durante la construcción. El análisis estructural ha adoptado la solución con cimbrado sobre las pilas, ya que concentra la transmisión de cargas en estos elementos, sometiendo el arco a esfuerzos más localizados y representando así un escenario más conservador. Adicionalmente, esta metodología ofrece ventajas constructivas, al ser una alternativa más sencilla y eficiente en términos de plazos de ejecución.



Figura 7. Torres para el cimbrado del arco y encofrado del arranque de un semiarco

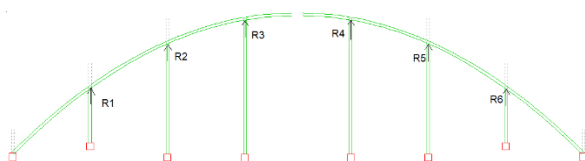
Una vez que el hormigón del arco haya adquirido una resistencia adecuada, se deben descender mediante gatos las torres de apeo.

Además del peso propio del hormigón, para el diseño de las torres se tuvieron en cuenta las siguientes acciones:

- Variación uniforme de temperatura que se pueda producir a lo largo del tiempo que estén en carga las torres. Se consideró una variación uniforme de temperatura de $\pm 15^{\circ}\text{C}$. Esta acción climática impone unas elevadas reacciones adicionales en las torres.
- Retracción y fluencia del hormigón. En este tiempo se debería tener en cuenta la retracción y fluencia del hormigón para determinar su afección a las reacciones de las torres.

Mediante este sistema constructivo se consigue minimizar al máximo la reacción en las torres. Ahora las torres tienen que resistir únicamente el peso del arco. La variación térmica apenas influye en las torres porque el arco no está cerrado, y lo mismo se puede decir de las reacciones provocadas por la retracción y fluencia del hormigón.

Tabla 1. Reacciones esperadas en las torres.



Punto	Reacción PP arco (kN)
R1	3280
R2	2000
R3	3300
R4	3320
R5	2000
R6	3250

Ahora la reacción máxima es del orden de 3.300 kN, mucho más pequeña que la reacción de 9.849 kN que se obtenía con el proceso anterior.

Este sistema es muy seguro desde el punto de vista estructural, por los siguientes motivos:

- El arco, cerrado en clave, es un magnífico elemento resistente para soportar el peso de las pilas y del tablero. Debido a que está cerrado en clave puede funcionar perfectamente como un arco sometido a un estado de compresión para el que ha sido diseñado.
- Las torres y sus cimentaciones sobre un relleno de mala calidad se limitan a una carga vertical muy moderada, y notablemente inferior a la correspondiente al proceso constructivo anterior.

A partir del esquema de cimbrado propuesto, se han definido las siguientes fases constructivas:

Fase 1: Excavación para las cimentaciones de las pilas P-12 y P-13, así como la preparación del terreno para la ejecución de las cimentaciones de las torres de cimbrado.

Fase 2: Construcción de las cimentaciones de las pilas P-12 y P-13, dejando en espera las armaduras necesarias para los fustes de las pilas y el arco.

Fase 3: Ejecución de las cimentaciones de las torres de cimbrado del arco.

Fase 4: Montaje de las torres del cimbrado.

Fase 5: Instalación de los tramos de cimbrado del arco.

Fase 6: Construcción del arco por segmentos hasta la clave, que quedará sin hormigonar. Se han mantenido las fases de hormigonado establecidas en el proyecto vigente, con la única diferencia de dejar sin hormigonar la clave para la posterior colocación de los gatos hidráulicos.

Fase 7: Retirada progresiva de los tramos de cimbrado, excepto el tramo central para facilitar las maniobras en la clave, dejando el arco apoyado únicamente sobre las torres de apeo. En esta fase, se actúa sobre los gatos de las torres para corregir la posición del arco debido a las deformaciones estructurales del cimbrado.



Figura 8. Gatos sobre la torre de apeo

Fase 8: Colocación del encofrado y armaduras de la primera fase de la clave del arco, así como el posicionamiento de los gatos hidráulicos.

Fase 9: Apertura en clave mediante gatos. Los gatos hidráulicos reaccionan en ambos arcos y se produce un pequeño levantamiento (de algunos cm) vertical del arco que hace descargar las torres por completo. Incluso este levantamiento es muy adecuado porque compensa el descenso futuro del arco cuando se ejecute el tablero y se ponga la carga muerta de la vía. Se aplican un total de 10.500 kN en la clave del arco en 7 fases de carga:

Tabla 2. Escalones de carga de la apertura en clave.

Fase	Fuerza aplicada (kN)
1	2625
2	5250
3	7875
4	8531
5	9187
6	9843
7	10500



Figura 9. Gatos accionados en la clave del arco

Fase 10: Hormigonado de la primera fase de la clave del arco.

Fase 11: Retirada de los gatos en la clave del arco.

Fase 12: Hormigonado de la segunda fase de la clave del arco.

Fase 13: Construcción de las pilas del arco.

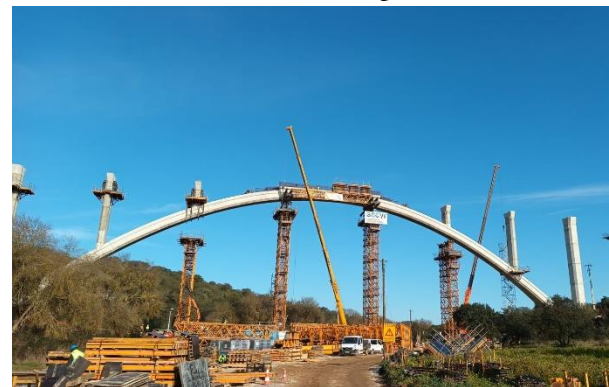


Figura 10. Arco y pilas ejecutadas

Fase 14: Colocación de los aparatos de apoyo sobre las pilas.

Fase 15: Instalación del cimbrado necesario para la ejecución del tablero.

Fase 16: Ejecución del tablero hasta los frentes de fase situados a 7.0 m de las pilas P-12 y P-13.

Fase 17: Ejecución del pretensado del tablero

Fase 18: Retirada de la cimbra del tablero y continuación del proceso constructivo de la estructura conforme a la metodología establecida en el proyecto de construcción.

4. Heavy Lifting y monitorización

Para la apertura en clave se emplearon 3 gatos con una capacidad máxima de cada uno de ellos de 10 000 kN. El motivo para emplear equipos con una capacidad tan superior a la requerida es que estos gatos han sido fabricados para trabajar verticalmente. El fabricante recomienda que, en caso de ser necesario trabajar de manera horizontal, se aplique como máximo el 50% de su capacidad de carga.

Se asegura que el centro de gravedad de los ejes de los gatos está en línea con el centro de gravedad con la sección en la clave del arco para no imponer un flector adicional accidentalmente.



Figura 11. Ensayo de los gatos en las instalaciones de VSL

Dado el elevado tonelaje movilizado y la necesidad de un control preciso del proceso, se han llevado a cabo ensayos preliminares en banco de pruebas. Cada cilindro ha sido sometido a un ensayo estático, manteniendo cada nivel de carga durante 10 minutos para verificar posibles pérdidas de presión. Posteriormente, se realizaron ensayos dinámicos, simulando la apertura en clave del arco.

Durante estos ensayos, un cilindro se extendió a su recorrido máximo de 170 mm a una presión de 150 bar, mientras que el otro se

recogía a una presión ligeramente inferior, generando resistencia al movimiento. Además, los gatos hidráulicos están equipados con tuercas de seguridad para prevenir el colapso en caso de fallo hidráulico y cabezas que permiten una rotación de hasta 2.5°, proporcionando una mayor tolerancia a desalineaciones.



Figura 12. Distanciómetro en pilas (ver cadena a la derecha)



Figura 13. Pantalla del distanciómetro

El control de cargas durante la apertura en clave se realiza mediante la monitorización continua de la presión en los gatos hidráulicos situados en las torres y en la clave del arco. Los sistemas de medición incluyen:

- **Manómetros calibrados** con un error absoluto de 0.3 bar, lo que permite una

precisión suficiente para registrar variaciones en la presión aplicada.

- **Distanciómetros de hilo retráctil**, instalados en los gatos hidráulicos de las torres y en la clave, para registrar desplazamientos relativos entre superficies estructurales.
- **Galgas extensiométricas**, colocadas verticalmente en los apoyos de las torres de cimbrado junto a los gatos, permitiendo evaluar deformaciones en tiempo real.
- **Monitorización topográfica**, mediante dianas colocadas a lo largo del arco, para registrar con precisión cualquier variación en la geometría durante el proceso de apertura.

Para minimizar errores de medición, se han considerado tres fuentes de incertidumbre: los gatos hidráulicos, los manómetros y la lectura visual del operario. Los gatos han sido calibrados en laboratorio, con un error absoluto de 0.3 bar, mientras que los manómetros utilizados presentan un error similar de 0.3 bar. El único margen de incertidumbre proviene del error de lectura del operario, estimado en ± 2.5 bar, lo que

representa una desviación del 1.8% para la presión más baja aplicada (140 bar).

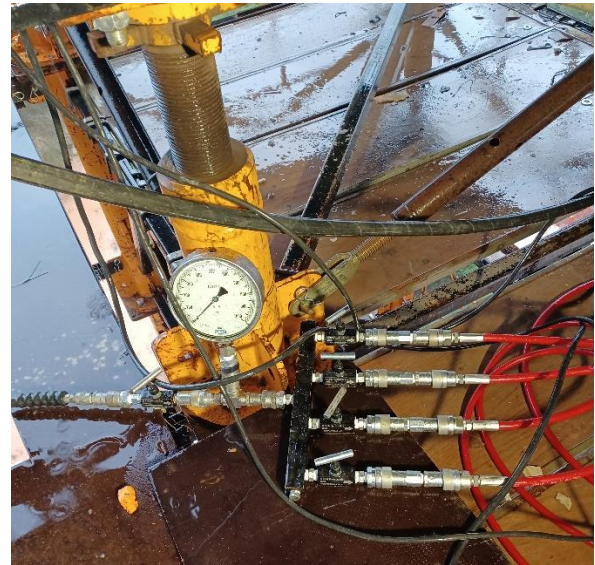


Figura 14. Manómetro conectado a 4 gatos

Durante la operación, se mantuvo un manómetro de control conectado a los gatos de cada torre, permitiendo el monitoreo continuo de la presión incluso mientras se realizan ajustes en otras torres o en la propia apertura en clave. Este sistema asegura que cualquier variación de presión sea detectada y corregida de inmediato, optimizando la precisión del proceso y reduciendo riesgos estructurales.



Figura 15. Puente de Pardais durante su última fase de ejecución



Figura 16. Puente de Pardais finalizado.

Agradecimientos

SACYR agradece a Infraestructuras de Portugal la confianza en la adjudicación de la obra, a Pondio la ingeniería y a VSL y Construgomes su diligencia en los procedimientos de ejecución del heavy lifting.