

Estructura integral postesada para puenteo de bóvedas de fábrica

Post-tensioned integral structure spanning over masonry arch bridges

Claudia Rodríguez Muñoz^a, Tomás Ripa Alonso^b e Ignacio Rueda Sastre^c

^c Ing. de Caminos, Canales y Puertos. LRA Infrastructures Consulting. Jefe de proyecto. claudiarodriguez@lraingenieria.es

^b Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos. LRA Infrastructures Consulting. Socio-Director. tomasripa@lraingenieria.es

^a Ing. de Caminos, Canales y Puertos. LRA Infrastructures Consulting. Director de Estructuras. nachorueda@lraingenieria.es

RESUMEN

La rehabilitación de las bóvedas de fábrica ha suscitado un profundo debate, dado que a menudo se trata de estructuras que poseen un gran valor patrimonial. Esto implica que han de ser conservadas en su esencia, y todas las operaciones de mantenimiento, reparación o refuerzo deben ser muy respetuosas y de carácter mínimo con el fin de preservar su autenticidad. Sin embargo, en ocasiones es complicado llevar a cabo las operaciones de rehabilitación de dichas estructuras sin comprometer su valor patrimonial y, al mismo tiempo, garantizando su capacidad estructural. Por esta razón se ha desarrollado una solución integral que alcanza ambos objetivos.

ABSTRACT

The rehabilitation of masonry arch bridges has generated an in-depth discussion, as they are often structures with a great heritage value. This implies that they must be preserved in their essence, and all maintenance, repair, or reinforcement operations should be very respectful and minimal in order to preserve their authenticity. Nevertheless, in some cases it is difficult to carry out the rehabilitation operations of these structures without compromising their heritage value and ensuring their structural capacity. For this reason, an integral solution has been developed that achieves both objectives.

PALABRAS CLAVE: bóveda de fábrica, valor patrimonial, postesada, monocordones

KEYWORDS: masonry arch bridge, heritage value, post-tensioned, monostrands

1. Daños y soluciones propuestas

A la hora de llevar a cabo la rehabilitación de las bóvedas de fábrica, es fundamental realizar primero un diagnóstico y una evaluación exhaustiva de los deterioros que puedan afectar tanto a la durabilidad como al comportamiento estructural de estas estructuras. Entre las deficiencias más comunes que se pueden identificar destacan las siguientes:

- Deformaciones y grietas.
- Humedades y eflorescencias debidas a las filtraciones que se producen a través de la estructura.
- Pérdidas y desplomes de las piezas de ladrillo.
- Asentamientos diferenciales de la cimentación.

Las soluciones de refuerzo de las bóvedas de fábrica se centran en mejorar la conexión de las piezas, mejorando su comportamiento estructural. Sin embargo, en caso de que la magnitud y extensión de los daños sea tal que imposibilite el planteamiento de una solución de refuerzo que nos permita recuperar, en plenas garantías, la capacidad estructural de la bóveda, la propuesta de rehabilitación consiste en la construcción de una nueva estructura.

La primera alternativa planteada, consiste en la demolición íntegra de la bóveda existente y su sustitución por marcos prefabricados. Dicha alternativa es una solución sencilla desde el punto de vista de la ejecución y permite minimizar los plazos de apertura al tráfico de la zona afectada, pero supone la demolición total de la bóveda original.

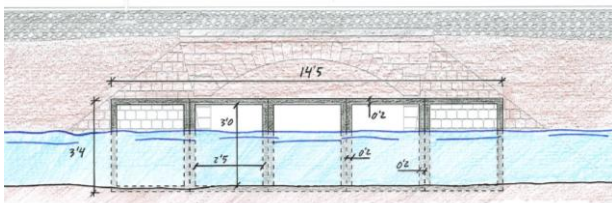


Figura 1. Alternativa 1. Sustitución de la bóveda por marcos prefabricados

Las bóvedas, en muchas ocasiones, poseen un gran valor patrimonial, por lo que la propuesta de reparación debe priorizar su conservación y evitar su demolición a toda costa, lo que descarta el uso de los marcos prefabricados. Como segunda alternativa, se plantea la ejecución de una nueva losa postesada *in situ* sobre la bóveda existente. Esta nueva estructura puentea la bóveda original y soporta las cargas procedentes de la plataforma evitando así, que la bóveda se encuentre sometida a algún tipo de carga que comprometa su seguridad estructural.

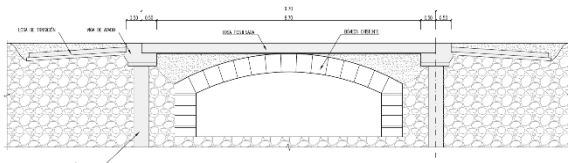


Figura 2. Alternativa 2. Losa postesada

El diseño de una estructura integral nos permite reducir al máximo el canto de la sección, al materializar un cierto nivel de empotramiento de la losa en los estribos; además este tipo de estructuras presentan importantes ventajas desde el punto de vista de la conservación, al no disponer de apoyos ni juntas en los estribos.

También, cabe destacar que, por el reducido canto de losa, se recurre a un sistema de monocordones con anclaje plano, una solución más comúnmente asociada a la edificación que a la obra civil.

2. Planteamiento sobre una solución concreta

A continuación, se estudia la solución aplicada por LRA Infraestructures Consulting en el marco de las operaciones ejecutadas en la obra de emergencia de rehabilitación de una bóveda de fábrica, la estructura 0N-0430-0141+520, situada en el P.K. 141+520 de la carretera N-430 en Ruidera (Ciudad Real).



Figura 3. Localización de la estructura.

2.1 Descripción de la estructura

El ejemplo que nos ocupa se trata de un pontón de planta recta, de un único vano de 6,1 m de luz, formado por una bóveda rebajada de fábrica de ladrillo y una ampliación derecha constituida por vigas prefabricadas.



Figura 4. Alzado de la estructura.

La estructura tiene un ancho total de 23,5 m, de los cuales 6,1 m se corresponden a la estructura original y 17,4 m a la ampliación.

La bóveda original es de fábrica de ladrillo, aunque, la boquilla está formada por sillares de piedra, los hastiales y los tímpanos también son de sillería.

La bóveda presenta un aparejo de fábrica de ladrillo a tizón, y está formada por una rosca con un canto total de unos 60 cm, coincidente con el del emboquille de sillares.



Figura 5. Vista inferior de la bóveda original.

El rebajamiento de la bóveda, flecha/luz es de 1/8,7, siendo la flecha de 0,7 m y la luz de 6,1 m, como se ha indicado anteriormente. El gálibo vertical en clave es de 2,15 m y, por tanto, los hastiales tienen una altura de 1,43 m.

La parte superior del relleno de tierras presenta una imposta de coronación formada por piezas de sillería.

La ampliación, por su parte, está formada por vigas doble T de hormigón armado, prefabricadas y dispuestas a tope.



Figura 6. Vista inferior de la ampliación.

La sección funcional está compuesta por una calzada de dos carriles de circulación y otros dos de cada el paso de 3,5 metros de anchura y arcenes de 1 metro. Junto a los arcenes se localizaban aceras de 1 metro de anchura constante en la margen izquierda y acera de ancho variable en la margen derecha de 7,50 metros de máxima anchura. En los extremos de la estructura se ubica el sistema de contención, formado por una barrera metálica simple tipo bionda junto a un murete de piedra en la margen izquierda y una barandilla metálica en la margen derecha.

2.2 Diagnóstico y evaluación de los daños

En el caso objeto analizado por LRA, la principal patología identificada en la estructura fue la deformación significativa de la bóveda de fábrica de ladrillo original. Esta deformación se debe a la combinación de factores erosivos y a los esfuerzos que actúan sobre la bóveda, especialmente aquellos provocados por la sobrecarga de tráfico.

Igualmente, se trata de una bóveda rebajada con un reducido espesor de tierras. En este tipo de estructuras la transmisión de las sobrecargas de tráfico no se realiza de igual forma que en bóvedas con mayores flechas y espesores de relleno. En estos casos las cargas se transmiten de forma más directa a las piezas, en especial a las situadas en la clave de la bóveda.



Figura 7. Deformación de la bóveda original.

La deformación existente en la bóveda se vio reflejada incluso en la propia plataforma, donde se apreció un blandón en la carretera. Este deterioro se localizó en la zona situada entre la ampliación y la estructura original, que es dónde se ha producido esta deformación.



Figura 8. Blandón existente en la plataforma.

En el intradós de la bóveda se observaron, de forma generalizada, humedades y eflorescencias debido a las filtraciones que se han producido a través de la estructura.

La persistencia de estos deterioros ha favorecido el deterioro de las piezas de ladrillo en las que se apreció una erosión generalizada, lavado de llagas y restos de mortero cementoso.

Por lo general, este tipo de intervenciones no son muy adecuadas, ya que este tipo de

morteros no permite la transpirabilidad de las piezas y puede acabar produciendo una erosión más acentuada de las piezas por la acumulación de humedad en estas zonas.



Figura 9. Erosión generalizada, eflorescencias y restos de mortero cementoso.

Uno de los puntos donde se pudo apreciar de forma más clara la deformación existente es en la zona de unión bóveda-boquilla, donde se detectó un desplome significativo de las piezas de ladrillo respecto a las de sillería de la boquilla. Además, en esta zona se apreció también una separación entre la bóveda y la boquilla debido a la diferencia de rigidez existente entre estos elementos, lo que favoreció la aparición de grietas longitudinales.



Figura 10. Grieta bóveda-boquilla en el lado de la ampliación.

En la boquilla del lado derecho, que corresponde a la ampliación, se observó una mayor separación entre la bóveda y boquilla. Además, se detectaron áreas específicas donde el relleno de tierras era visible debido a la pérdida de piezas.

Cabe destacar que la existencia de deterioros de mayor intensidad en este lado de la estructura se debe principalmente a la acción del tráfico, pero también se ve favorecida por el reducido espesor de las tierras. De este modo, la acción directa del tráfico sobre la zona bóveda-boquilla, favorece la separación de esta unión por el empuje de las dovelas de la boquilla hacia el exterior, y el reducido espesor de tierras, produce una carga de tráfico más directa a las piezas, especialmente en la zona de clave, favoreciendo la pérdida de piezas de fábrica. Todo ello se ve potenciado por la acción erosiva.

En fases iniciales, dicha erosión afectaría a la durabilidad, sin embargo, se ha convertido en un deterioro de afección estructural, ya que implica una pérdida de sección resistente en zonas localizadas. Además, en estructuras de fábrica el proceso de pérdida de piezas aumenta de forma exponencial a medida que se pierden piezas de la sección, puesto que el reparto de los esfuerzos se ve mermado y las piezas que aún se mantienen en la sección sufren una sobrecarga cada vez mayor.



Figura 11. Pérdida de piezas

2.3 Solución adoptada

A raíz de la gravedad de los deterioros detectados en la estructura se advirtió la necesidad de actuar con el fin de restituir las condiciones de seguridad estructural y vial.

La significativa pérdida de forma que presentaba la bóveda impedía poder llevar a cabo una reparación de la estructura con suficientes garantías como para restablecer su seguridad estructural. En estas condiciones, la solución de reparación más eficiente pasaría por demoler la bóveda existente y ejecutar una nueva estructura mediante marcos prefabricados.

No obstante, la bóveda (denominada como “Puente de los Caños”) pertenecía al conjunto de edificaciones protegidas que recogen las Normas Subsidiarias de Planeamiento Municipal de Ruidera (Ciudad Real). Este grado de protección impidió efectuar la demolición de la bóveda.

Teniendo en cuenta ambos aspectos, el grado de deterioro y el de protección, se propuso como solución la ejecución de una losa de hormigón postesada sobre la bóveda original con cimentación pilotada tras los hastiales de esta. Esta nueva estructura sustituye a la existente, puenteándola y dejándola sometida exclusivamente a su propio peso.

Asimismo, teniendo en cuenta que la pérdida de forma es una situación irreversible y con objeto de preservar en las mejores condiciones la estructura, se procedió a reparar las zonas del intradós que presentaban pérdida de piezas o lavado de llagas. Para ello, se ejecutó un chorreado con abrasivo a baja presión generalizado y un saneo de aquellas piezas sueltas o rotas.

Posteriormente, se repusieron las piezas perdidas o saneadas y se ejecutó un rejuntado de las zonas que presenten lavado de llagas. Además, se propuso extender sobre el trasdós de la bóveda un sistema de redistribución de esfuerzos con objeto de mejorar en la medida de lo posible el estado original de la bóveda. Este

sistema estaba formado por una malla de fibra de vidrio embebida en dos capas de mortero de cal. Finalmente, se contempló el corte de tráfico en el carril de la carretera N-430 situado sobre la bóveda original. No obstante, dada la anchura de la plataforma en esta zona, donde existe un carril adicional para el giro existente en la intersección próxima a la estructura, se mantuvo el tráfico de los dos sentidos de circulación eliminando el citado carril de giro.

2.4 Descripción de las obras

2.4.1 Trabajos previos

En primer lugar, se procedió al corte del canal en el entorno de la estructura con objeto de llevar a cabo los trabajos de reparación de la bóveda, contemplando la posibilidad de ejecutar una ataguía en el caso de no poder interrumpir el servicio del canal.

Además, con el fin de garantizar la estabilidad estructural durante las actuaciones a realizar sobre la estructura, se colocó en toda su superficie una cimbra.

2.4.2 Trabajos de reparación de la bóveda existente

Para llevar a cabo los trabajos previstos en el trasdós de la bóveda, en primer lugar, se retiró el murete de piedra existente garantizando su futura reposición. Seguidamente, se llevó a cabo la demolición del paquete de firme y la excavación de tierras. Las excavaciones se llevaron a cabo de manera progresiva y uniforme, con el fin de garantizar una descompresión controlada de la bóveda.

Una vez que el trasdós quedó al descubierto se realizaron inyecciones de lechada de mortero de cal, ejecutando perforaciones de 20-40 mm de diámetro en las zonas de llagas, siguiendo una distribución de 4-5 perforaciones por metro cuadrado de superficie. En estas perforaciones se colocaron tubos e inyectores para proceder a la inyección. Dichos tubos e inyectores se emplearon para realizar una saturación con agua el día previo a la inyección, asegurándose de que toda el agua inyectada haya

sido absorbida antes de proceder a la inyección de la lechada.

Además, antes de la ejecución de los taladros, para evitar posibles fugas durante el proceso de inyección se rellenó y selló todas las fisuras y discontinuidades presentes en el trasdós mediante un mortero de cal.

Una vez finalizados los trabajos de inyección, se retiraron los inyectores y se rellenaron los agujeros realizados por los taladros con mortero de cal.

Posteriormente, se procedió a la colocación de la malla de fibra de vidrio para la redistribución de esfuerzos. Dicha malla quedó debidamente anclada en los hastiales de la bóveda mediante un anclaje vertical de cuerdas de fibra de vidrio.

Para la colocación de la malla, en primer lugar, se realizaron taladros de 12 mm de diámetro, con profundidad de 450 mm y separación de 30 cm y se introdujeron unas cánulas de protección de taladros para evitar la posterior entrada del tratamiento.

Seguidamente se ejecutó una capa de regularización de la superficie, mediante la proyección generalizada de mortero de cal con un espesor de 20 mm. Posteriormente, se extendió la primera capa de mortero de cal bicomponente de elevada ductilidad y 5 mm de espesor.

A continuación, se colocó la malla estructural de fibra de vidrio de 21x21 mm de mallado, sobre la primera capa de mortero fresco, y se extendió la segunda capa de 5 mm de espesor del mismo mortero de cal empleado en la primera capa. No obstante, esta segunda capa no se aplicó en las zonas de anclaje de la malla para asegurar su correcta instalación.



Figura 12. Colocación de la malla de fibra y extensión de la segunda capa de mortero

Finalmente se colocó el sistema de anclaje de la malla formado por cuerdas en fibra de vidrio unidireccionales de alta resistencia. Dicho sistema se recortó a una longitud igual a la profundidad de la perforación más los extremos a deshilar.

Para la colocación del sistema de anclaje, primeramente, se impregnó una resina epoxídica fluida y se espolvoreó el área impregnada con arena seca. Seguidamente, se retiraron las cánulas de protección de los orificios ejecutados anteriormente y se inyectó con la fijación química epoxídica de resina de viniléster. Después, se insertó el sistema de anclaje, se abrió en abanico la parte exterior del sistema, fijándola con resina epoxídica, y se espolvoreó de arena hasta la saturación.



Figura 13. Sistema de anclaje de cuerdas de fibra de vidrio

Finalmente, tras un tiempo de espera, se retiró el exceso de árido y se aplicó la segunda capa de mortero de cal en las zonas de anclaje, consiguiendo un acabado homogéneo y uniforme.

En cuanto a los trabajos previstos en el intradós de la bóveda, en primer lugar, se preparó la superficie retirando los restos de mortero cementoso mediante un picado manual y se realizó una limpieza generalizada de toda la superficie de la bóveda mediante un chorreado con abrasivo. Cabe destacar, que el chorreado se realizó asegurando la retirada de todos los restos de materiales para obtener una correcta adherencia en los tratamientos posteriores.

Tras los trabajos de chorreado con abrasivo, se procedió a un chorreado generalizado en toda la superficie de la bóveda con agua a baja presión, entre 34 y 70 MPa, para eliminar eflorescencias y sales solubles, y

también se realizó un picado y saneado manual de aquellas piezas que se encontraban sueltas, fracturadas o que presentaban un grado de meteorización muy avanzado.

Posteriormente, se repusieron las piezas desprendidas o saneadas mediante piezas de ladrillo de características y geometría similares a las existentes.

En aquellas zonas en las que existía lavado de llagas o dónde se hayan repuesto piezas desprendidas o previamente saneadas se procedió al rejuntado de llagas con un mortero de cal hidráulica natural.

Una vez finalizadas las actuaciones de reparación se aplicó de forma generalizada en toda la superficie de la bóveda un producto hidrofugante y olefugante.

2.4.3 Ejecución de la nueva estructura

A continuación, se extendió sobre el trasdós de la bóveda el mismo material de relleno de manera uniforme hasta alcanzar la cota de la clave del trasdós.

Posteriormente, se extendió una cama de arena de 5 cm de espesor que actúa como capa de regularización del terreno sobre el que se apoyará la nueva losa. Por último, para independizar la bóveda existente y la nueva losa, se colocó una capa de 5 cm de espesor de poliestireno expandido. Asimismo, se redujo considerablemente la transmisión de cargas a la bóveda que proceden de la plataforma, al dotar de flexibilidad al contacto entre la nueva losa y el relleno de la bóveda.

Dado que la nueva estructura presentaba una mayor longitud que la existente, en aquellas zonas situadas tras la bóveda y sobre las que se iba a ejecutar la losa, se extendió una capa de hormigón de limpieza C12/15 de 10 cm de espesor.

En cuanto a la cimentación, una vez alcanzada la cota deseada se procedió a la ejecución de dos filas de pilotes de 650 mm de diámetro, con una separación entre ejes de 1,4 m y una profundidad de 10,25 m. En coronación

los pilotes estaban arriostrados por la losa, la cual contaba en su extremo, con un recrecio a modo de zuncho de atado de 1 m de ancho y 75 cm de canto.

Una vez ejecutada la cimentación, se procedió al armado y hormigonado de la losa pretensada de 32 cm de canto. La losa contaba con 13 grupos de 6 y 4 monocordones, los cuales se enfilaron en las vainas dispuestas previamente al hormigonado, procediendo su tesado una vez que la losa adquirió la resistencia exigida.

Finalmente, se ejecutaron las losas de transición a ambos lados de la estructura, con el objetivo de permitir una transición gradual de rigideces entre la estructura y el relleno de tierras en el trasdós.



Figura 14. Enfilado de las vainas de los monocordones

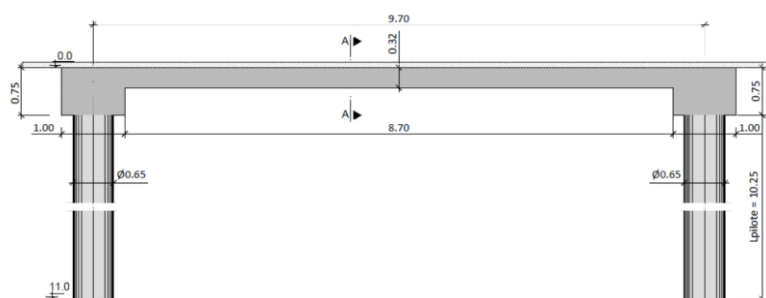


Figura 15. Nueva losa postesada pilotada

2.4.4 Equipamiento

La armadura requerida por el pretil se colocó, dejándola en espera, durante la ejecución de la losa postesada, y posteriormente, se hormigonó en una segunda fase el zócalo donde se implantó el nuevo sistema de contención.

Cabe destacar que, dado el valor patrimonial de la estructura, se mantuvo el murete de guarda existente y se repuso una vez finalizados los trabajos de ejecución. De este modo, el pretil se dispuso a continuación de dicho murete a una distancia igual a su anchura de trabajo y se conectó con las barreras metálicas existentes en la carretera.

En cuanto a los trabajos de impermeabilización, la nueva estructura se impermeabilizó mediante la colocación de una

lámina de betún modificado SBS con autoprotección mineral en superficie, previa aplicación de una imprimación asfáltica. Se optó por un perfil de impermeabilización bicapa, ya que aporta al sistema de impermeabilización estabilidad dimensional.

Por otro lado, se aplicó un sellado con masilla de poliuretano en la junta existente entre la nueva estructura y la ampliación.

Como elemento de sellado se dispuso un cordón de espuma polietilénica extruida de célula cerrada. Dicho cordón tenía un diámetro superior a la junta a sellar y se colocó mediante una ligera presión hasta la profundidad prevista. El diámetro del fondo de junta debía ser

aproximadamente 1,25 veces el ancho de la junta.

Posteriormente se aplicó una imprimación para mejorar la adherencia del material de sellado a los labios de la junta y seguidamente, se aplicó una masilla de sellado elástico.

Resulta importante señalar, la necesidad de que el sellado se materialice con una masilla de poliuretano, ya que a largo plazo presenta mejores características durables y de resistencias mecánicas y químicas.

Una vez finalizados los trabajos de impermeabilización, se procedió a la repavimentación del tablero y de las zonas de acceso al mismo. Dado que la rasante de la nueva estructura se ha situado sensiblemente por encima de la actual, se ha realizado un fresado de las zonas de acceso a la estructura con objeto de adaptar la carretera a la nueva rasante existente. Además, para evitar aumentar la carga muerta de la zona de ampliación y dado que la estructura se ubicaba en torno a una intersección se ejecutó una isleta entre los carriles de circulación.

Por tanto, teniendo en cuenta estos aspectos y la necesidad de ampliar la anchura de la acera existente, se realizó una reconfiguración de la sección funcional de la carretera y de la intersección existente en las inmediaciones mediante el borrado y pintado de las nuevas marcas viales.

3. Conclusiones

En la presente ponencia se ha planteado un debate muy recurrente en la rehabilitación de estructuras: las bóvedas de fábrica.

Estas estructuras son verdaderamente muy singulares, ya que suelen poseer un gran valor patrimonial, lo que dificulta considerablemente las labores de rehabilitación.

A lo largo de la presentación, se han ofrecido distintas soluciones acordes al nivel de deterioro detectado en dichas estructuras. Para ello, se ha subrayado la importancia de realizar un diagnóstico y evaluación exhaustiva de los

daños con el fin de minimizar el impacto en la estructura original.

Entre las distintas soluciones aportadas, se ha hecho hincapié en la solución integral ofrecida para las bóvedas, que, debido a su importancia histórica, requieren la construcción de una nueva estructura para asegurar su tan valiosa autenticidad.