

APLICACIÓN DE DIVERSOS METODOS DE REHABILITACION Y REFUERZO DE ESTRUCTURAS (I): RESTAURACIÓN DEL “PONT VELL” DE BOCAIRENT

Juan José Clemente Tirado
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Pantecnia Consulting, S.L.
jjclemente@pantecnia.es

RESUMEN

La intervención en construcciones existentes presenta numerosas fórmulas de actuación en función de la gran variedad de estructuras, de desordenes y de objetivos. En la presente comunicación se indican dos ejemplos de intervenciones recientes sobre el patrimonio, de concepción muy diferente. Por un lado, una intervención sobre una estructura de marcado carácter histórico, como es el puente medieval de Bocairente, en la que se realiza una actuación mixta de consolidación estructural y de restauración. Por otro, la intervención singular sobre el abandonado patrimonio Industrial, la rehabilitación integral del Horno Alto nº2 de Sagunto, en la se une la actuación estrictamente estructural y una labor de recuperación y de puesta en valor de los elementos constitutivos, con fines patrimoniales y didácticos.

1. RESTAURACIÓN DEL “PONT VELL” DE BOCAIRENT.

1.1. Descripción.

Se trata de un puente resuelto con una bóveda en arco de directriz sensiblemente circular con una luz de 19,70 m y 9,17 m de flecha, es decir, prácticamente de $\frac{1}{2}$ punto. La anchura es variable, siendo en el tramo central de unos 3,70 m y superior en ambos accesos. La altura sobre el nivel del lecho del cauce es de unos 15 m en clave.



1. Panorámica general del puente antes de la Intervención

La bóveda tiene una primera rosca, en toda su anchura, formada por dovelas de sillarejos trasdosados de arenisca, de unos 36 cm de grosor, arrancando en el estribo del margen derecho directamente sobre roca y sobre dado de sillares el otro (seis hiladas). Presenta otras dos roscas de mampostería sin talla colocadas a sardinel en toda su anchura, de espesor variable, llegando a 1,20 m sobre clave y perdiéndolo hacia los arranques, alcanzando únicamente la primera de estas roscas de mampostería la base.

La unión con los dos márgenes del barranco se realiza mediante tímpanos de altura variable (hasta unos 12 m) adaptándose al terreno, que confinan un relleno. Los tímpanos están formados por fábrica de mampostería ordinaria, de espesor variable con la altura, con grandes paños de hiladas en disposición inclinada (*espigatum*). Adosados a los tímpanos, aparecen contrafuertes de mampostería ordinaria, de forma irregular, en número de tres A. arriba y dos A. abajo. Su construcción es posterior a efectos de contrarrestar deformaciones excesivas o incluso roturas en los tímpanos.

1.2 Estado de Conservación. Patologías.

Entre los desordenes mas importantes que presentaba el “Pont Vell” de Bocairent merecen ser citados:

1. Estado avanzado de degradación de las dovelas de arenisca de la bóveda por meteorización y sales, con pérdidas importantes de sección en las zonas de sálmeres y en las boquillas de la clave.
2. Fisuras sensiblemente longitudinales en el trasdós de la bóveda.
3. Degradación de los mampuestos de las dos roscas superiores a sardinel son pérdida abundante de material de las escopetas.
4. Pérdida de material de juntas en la fábrica de mampostería de los tímpanos, con desprendimientos locales. Abundancia de vegetación de dimensiones considerables.
5. Abombamiento de los tímpanos, lo que indujo probablemente a la ejecución de contrafuertes posteriores en distintas épocas, sin orden.
6. Mal funcionamiento del sistema de drenaje.



2. Detalle estado dovelas en arranques. 3. Estado general de los paramentos y contrafuertes.

En general, y salvo la presencia de algunas fisuras en el trasdós de la bóveda, las demás patologías están asociadas a la durabilidad de los materiales frente a agentes medioambientales (fundamentalmente el agua) y no a defectos en el comportamiento estructural de la bóveda, aunque es innegable la interacción a lo largo del tiempo de ambos aspectos.

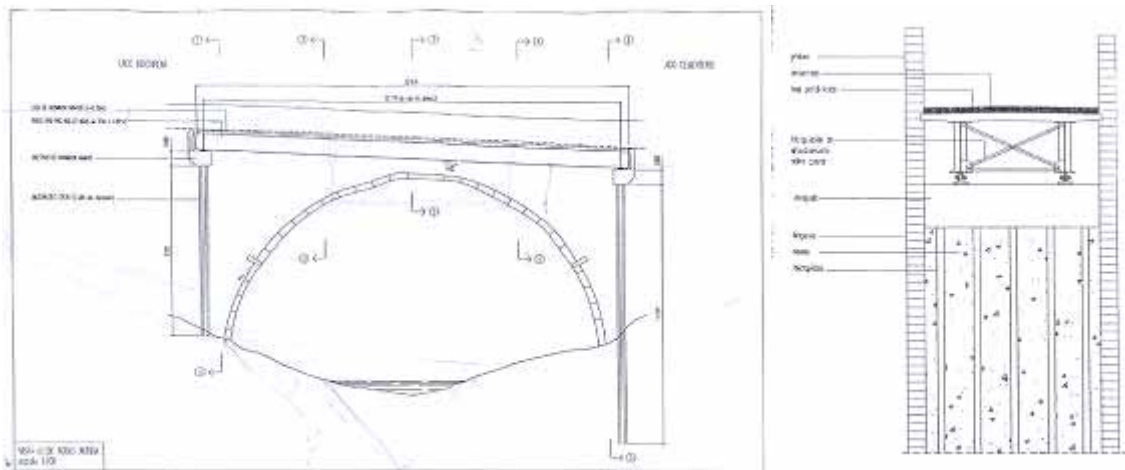
En cuanto al comportamiento de la fábrica de los tímpanos, el análisis visual de las deformaciones y la presencia de contrafuertes de distintas épocas, prueba la deficiencia de dicha parte de la estructura

frente a la absorción de los empujes del relleno. Dichos empujes se ven incrementados por las colmataciones temporales del relleno debidas al precario estado del sistema de recogida de aguas, la orografía (punto bajo), y la falta de impermeabilización. En resumen: el incremento de empujes y la pérdida del material conglomerante de la fábrica (y por tanto su capacidad resistente) conllevan un mal comportamiento del conjunto.

1.3 Antecedentes. La Propuesta Inicial.

El proyecto original de Rehabilitación del “Pont Vell” de Bocairent, de 1996 plantea una solución que pretende intervenir en la estructura partiendo de que la actual no se considera apta para el uso (Sc 400 kg/m²), proponiendo la sustitución funcional de la misma. Dicha solución consiste en la realización de un nuevo tablero mixto oculto, formado por dos vigas armadas de acero corten de 900 mm de canto y 22,0 m de luz, coronadas por una losa de HA conectada de 3,20 m de ancho. Dicho tablero se apoya en sendos durmientes sobre micropilotes, de forma que las reacciones se transmitan directamente al estrato rocoso.

De esta forma, la estructura original queda totalmente exenta, debiendo únicamente resistir su peso propio, mientras la nueva estructura se encarga de soportar las Sc de tráfico ligero y las cargas muertas. Para la inclusión de la nueva estructura oculta es necesario realizar un vaciado del relleno, de 1,35 m de espesor y unos 24 m de longitud. La intervención se completa con actuaciones de regeneración y restauración de la bóveda y rejuntado de la fábrica de los tímpanos.



4. Alzado y sección transversal de la solución original

Dicha propuesta de Intervención, en el aspecto estructural, fue reconsiderada antes del inicio de las obras, lo que motivó la redacción de un nuevo proyecto Modificado. Las causas fueron básicamente las siguientes:

1. A pesar de estar bien resuelta estructuralmente, plantea sin embargo a nivel conceptual una contradicción de diseño frente a la solución original de bóveda, no existiendo fundamentos para el cambio radical del sistema estructural, máxime cuando la estructura original no presenta graves patologías estrictamente derivadas de su comportamiento mecánico, si no mas bien asociadas a la durabilidad y falta de conservación.
1. El vaciado del relleno (1,35 m) lleva asociada una alteración del sistema de cargas del puente original por disminución sustancial de la carga muerta, provocando redistribuciones de esfuerzos y la consiguiente adaptación a dichas sollicitaciones, y de efectos no previstos. Por otra parte, el obtener la cota suficiente de vaciado del relleno, supone la afección directa a la segunda y tercera rosca (y probablemente a la primera rosca de sillares, parcialmente), que

quedaría degollada en mas de 6 metros. Ello provoca un cambio muy fuerte en el sistema estructural, que, unido a la disminución de la carga muerta, podría tener consecuencias desagradables.

2. No se plantea la resolución del serio problema de mal funcionamiento de los tímpanos, limitándose a actuaciones restauratorias (limpieza, rejuntado, tratamiento). Ello conlleva a trasladar el mismo problema a un futuro, ya que aunque bien se regenere la fábrica, no se soluciona mas que parcialmente el problema de la entrada de agua al relleno y se sigue confiando en los antiestéticos contrafuertes para contrarrestar los excesos de empuje.

1.4. Análisis Estructural.

Partiendo de las consideraciones anteriores, se plantea una intervención basada en el mantenimiento de la configuración estructural original, a fin de que, tras una serie de actuaciones conceptualmente afines, permitan el uso previsto sin necesidad de introducir una nueva estructura y garanticen la estabilidad de los tímpanos sin necesidad de contrafuertes.

La viabilidad de dicho planteamiento se sustenta fundamentalmente en: la Sc de Uso de 400 kg/m^2 es pequeña en comparación con el peso del relleno existente (8,6% en clave y 1,5% en arranques) y la estructura no presenta patologías derivadas de un mal comportamiento mecánico de la bóveda.

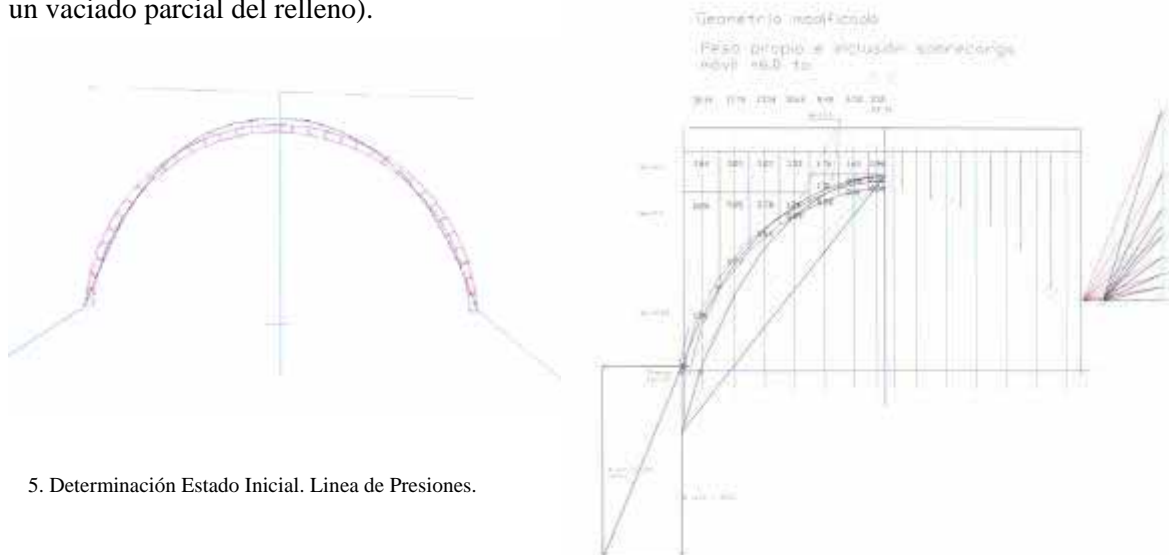
1.4.1. Estado Inicial.

En cualquier intervención sobre una estructura existente es muy importante conocer el estado inicial de la misma. A fin de realizar una estimación del estado inicial de tensiones y deformaciones de la estructura, que sirva para estimar de forma cualitativa el comportamiento de la misma en las distintas fases de intervención, se realizan una serie de estudios preliminares mediante dos metodologías distintas (cálculos clásicos de línea de presiones y modelizaciones elastoplásticas) que arrojan resultados sensiblemente similares.

1.4.1.1. Línea de Presiones.

Para la determinación de la línea de presiones se divide el arco en una serie de partes y se determina la misma por tres puntos, como polígono funicular de sus pesos. En función de cómo quede ajustada a la geometría del arco existente se puede estimar el nivel de seguridad de la estructura.

En este caso se aprecia que no logra encajarse, lo que implica la existencia de un determinado nivel de tracciones en clave para el estado inicial, que se agravaría en el caso de proceder a una disminución de la carga muerta (realizando un vaciado parcial del relleno).



5. Determinación Estado Inicial. Línea de Presiones.

En el caso de geometría modificada (ya en la propuesta de solución, recrecido de bóveda con hormigón y ampliación del espesor de los sálmeres) se observa que es posible encajar la línea de presiones permitiendo un punto próximo al exterior del arco.

1.4.1.2. Modelos elastoplásticos.

Se aborda un análisis preliminar de la estructura mediante la simulación de la estructura con modelos elastoplásticos. Los parámetros y particularidades del modelo son similares a los definidos en el apartado siguiente de análisis de la solución. Aunque los modelos adoptan simplificaciones y la definición de los parámetros asociados al comportamiento de los materiales reales presenta ciertas incertidumbres, permite realizar una estimación del estado inicial y conocer al menos cualitativamente el comportamiento futuro del mismo.

Los resultados obtenidos con estos métodos son sensiblemente parecidos a los del anterior, y de ambos se pueden obtener una serie de conclusiones que nos permiten caracterizar razonablemente el comportamiento de la estructura:

La configuración actual de la bóveda es estable, teniendo en cuenta que la zona más ajustada (clave), presenta presumiblemente dos roscas más (se verificó durante la obra). No obstante cualquier actuación liberatoria de carga dejaría la bóveda en situación precaria.

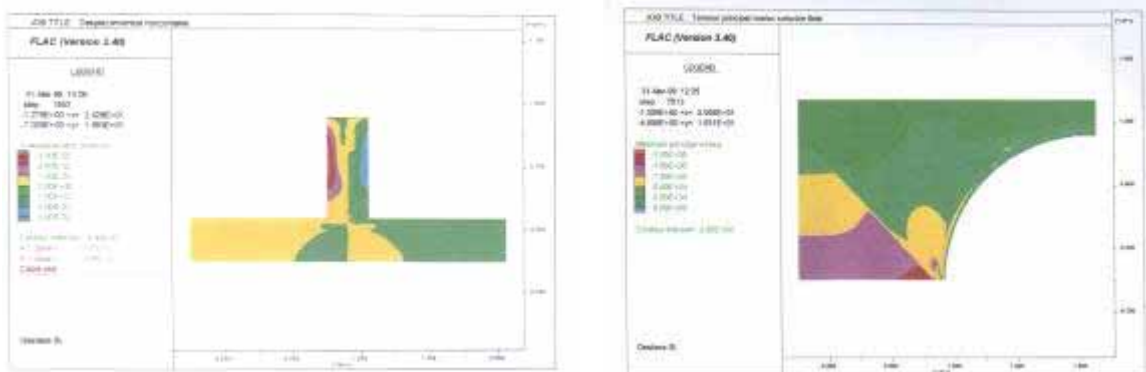
En estribos existe una concentración de tensiones debido a la excentricidad que presenta la resultante de fuerzas (En función de la rigidez que se asigne al relleno, las σ máximas en sálmeres varían entre 25 y 40 kg/cm²).

Realizando una serie de intervenciones razonables, la estructura se adaptaría bien a un aumento de cargas actuante sobre él.

1.4.2. Análisis de la bóveda (dirección longitudinal).

Se realiza una simulación de la estructura con diferentes modelos elastoplásticos teniendo en cuenta la estructura existente y el terreno, desde el estado inicial hasta el final con tráfico, pasando por las diferentes fases de construcción, analizando la respuesta de la estructura y su capacidad de adaptación a las diferentes sollicitaciones.

Los parámetros en rango elástico y plástico de los diferentes materiales que conforman la estructura y su entorno son de difícil estimación con exactitud. En base a la experiencia del proyectista y la bibliografía existente, se ha adoptado el siguiente modelo de comportamiento para cada uno de ellos:



6. Modelo EF comportamiento elastoplástico.

Estrato rocoso: capacidad para absorber cierto grado de tracciones y elevados valores de sus parámetros de rotura (c ; ϕ).

Relleno: material elastoplástico, incapacidad de absorción de tracciones (podría aparecer descarga ficticia de tracciones en el arco) y valores de rotura propios de este material. En función de la rigidez que se asigne al relleno, las σ máximas en sálmeres varían entre 25 y 40 kg/cm².

Fábricas: material elastoplástico, capacidad para absorber tracciones muy limitada (2 kg/cm²) por las propiedades del mortero de juntas, rigidez propia de este tipo de fábricas, y elevados valores de los parámetros de rotura.

Hormigón del recrecido de la bóveda: material elastoplástico, los parámetros se obtienen de los valores de máxima compresión y tracción simple y sus correspondientes Círculos de Mohr.

1.4.3. Consolidación de Tímpanos.

Se realiza un análisis de los micropilotes para la máxima altura de relleno. En la dirección transversal se simula la acción de un metro del terreno sobre la pantalla, simulando los micropilotes como elementos viga y el tirante de cabeza como elemento-cable.

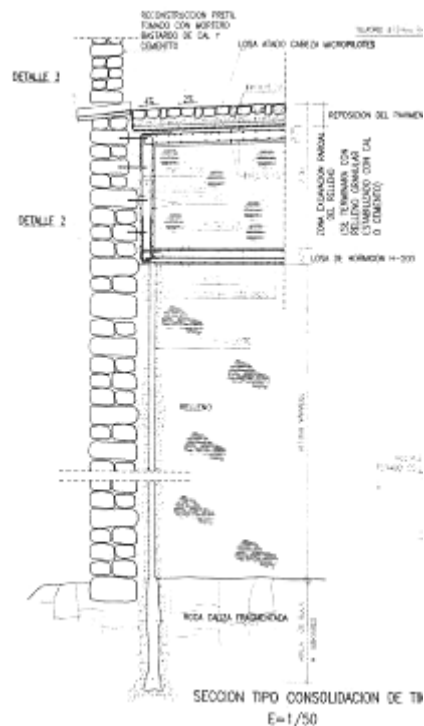
La altura máxima entre el relleno (con la excavación parcial) y la roca es de unos 8 m, y la pantalla de micropilotes con separación de 0,50 m funciona correctamente hasta unos 6 m. Para ello, y a fin de garantizar la estabilidad estructural de la pantalla, en las zonas con más de 6 m se supone un relleno con cierta cohesión (ello se consigue en la realidad mediante la disposición de una serie de micropilotes de inyección adicionales).

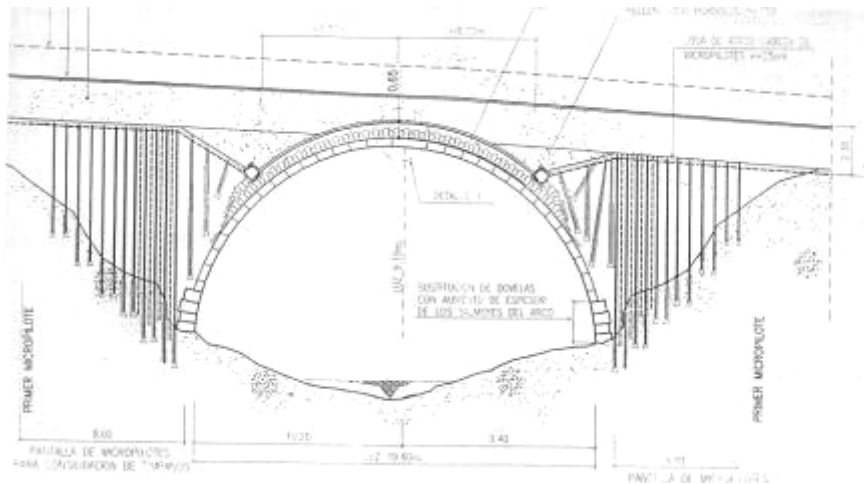
1.5 La Intervención.

Del estudio de las patologías y los análisis estructurales realizados, se deduce la propuesta de intervención que puede resumirse en los siguientes puntos:

1. Refuerzo de bóveda en zona de clave hasta los riñones, mediante la creación de un refuerzo interior de hormigón H200 ligeramente armado, de espesor máximo en clave 0,65 m, solidarizado (a fin de garantizar compatibilidad de deformaciones) a la bóveda actual mediante conectores anclados, previo saneado de la superficie. Se consigue así que la teórica línea de presiones pase por el núcleo central de todas las secciones transversales de la bóveda o que en caso extremo no se presenten tensiones de compresión excesivas para la arenisca.
2. Aumento de la sección de la bóveda en sálmeres mediante la sustitución de las dovelas existentes (en gran porcentaje muy dañadas) por otras de mayor dimensión y mejora de la calidad de los morteros. Con ello se reduce el nivel de tensiones en los mismos.

7. Semi-Sección Solución definitiva.





9. Sección longitudinal solución definitiva. 10. Trabajos Micropilotes e inyecciones.

3. Consolidación de Tímpanos y rellenos mediante excavación parcial del relleno, ejecución de pantallas interiores de micropilotes $\varnothing 150$ en los paramentos del relleno empotradas en la roca y atadas en cabeza con losa de H-200 armado de espesor 0,25 m. Dichas pantallas recogen el empuje de los niveles inferiores del relleno y permite transmitir a los micropilotes gran parte del peso propio del relleno superior confinado, lo que evita en gran medida que aumente el empuje en los tramos inferiores.
4. Inyecciones de lechada de cemento en el relleno, que permiten colmatar las oquedades existentes por lavados y en general aumentar la cohesión del mismo (y por tanto disminuir los empujes).
5. Terminación de alzados de tímpanos mediante muretes de H-200 armado, solidarizados mediante conectores anclados a la fábrica original, y losa de cobertura que confinan en nuevo relleno de material granular estabilizado con cal. Con ello se obtiene un arriostramiento de los tramos superiores y se evita el empuje sobre los mismos.
6. Eliminación de los contrafuertes y actuaciones restauratorias de la fábrica (limpieza, reposición, rejuntado y tratamiento).
7. Mejora de la impermeabilización del relleno con la creación de drenes transversales, impermeabilización de la losa superior del cajón, reposición y restauración de gárgolas.



11. Atado cabezas de Micropilotes. 12. Ejecución refuerzo de bóveda conectada.

8. Restauración de la bóveda, con sustitución completa de dovelas muy dañadas y reposiciones locales con tacos de arenisca anclados con varillas o morteros de regeneración. Sustitución de las dovelas de arranque por otras de mayor sección. Saneado y mejora del mortero de rejuntado. Limpieza mecánica con sistema de arenado húmedo, consolidación (geles de sílice), hidrofugación (Polisiloxanos) y Biocidas.



13. Cimbrado de la bóveda. 14. Limpieza de paramentos en tímpanos. 15. Prueba de Carga. Croquis y Modelo.

9. Reconstrucción de pretilas y reposición del pavimento original con material recuperado.
10. Prueba de carga. Una vez finalizada la consolidación estructural y retirada la Cimbra se realiza una prueba de carga con furgonetas de 2 tons. Se realizan medidas de desplazamientos (invar) y de presiones (gatos planos). Los resultados son satisfactorios.

