

Ampliación y rehabilitación del viaducto de ferrocarril sobre el río Gorgos, Alicante*

*Deck widening and rehabilitation of the railway viaduct over the river Gorgos, Alicante***

Pablo Tarín Benedito^{*,a}, Alberto Ordiñana Gil^a, Altea Cámara Aguilera^a,

Fernando Ibáñez Climent^b

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Degree of Freedom - Valencia. Ingeniero.

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Degree of Freedom - Valencia. Director.

RESUMEN

La rehabilitación y ampliación del tablero del viaducto de mampostería sobre el río Gorgos, construido en 1913, se incluye en la renovación de la línea de ferrocarril histórica de Alicante. El principal objetivo del proyecto fue reparar las deficiencias del puente causadas por el deterioro de la estructura, mejorar la capacidad del mismo para resistir las cargas incluidas en los códigos actuales y cumplir con los requerimientos de seguridad ferroviaria del propietario. Un modelo bidimensional de EF fue realizado para asegurar el comportamiento estructural del viaducto, confirmando que ningún fallo global ocurría bajo las cargas de diseño actuales.

ABSTRACT

The rehabilitation and deck widening of the masonry viaduct over the river Gorgos, built on 1913, is included in the renewal of the historical Alicante railway net. The primary aim of the rehabilitation work was to repair the bridge's deficiencies caused by the deterioration of the structure, upgrade its capacity to resist the loads included in modern codes and fulfill the railway safety requirements defined by the owner. A bidimensional FE model was carried out in order to assess the structural behavior of the viaduct, confirming that no global failure occur under the current design loads.

PALABRAS CLAVE: viaducto, arco, mampostería, ferrocarril, rehabilitación, ampliación, FEM

KEYWORDS: viaduct, arch, masonry, railway, rehabilitation, widening, FEM

1. Introducción

Durante los últimos cinco años, distintos proyectos han sido desarrollados para la renovación de la vía de ferrocarril histórica de la provincia de Alicante. Esta línea, que fue construida a principios del siglo XX, es ahora gestionada por Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana (FGV).

La mayoría de los proyectos de renovación han sido ya completados o están en fase de ejecución, ya que se espera que la totalidad de la línea abra al tráfico en los primeros años de la próxima década. Uno de los últimos tramos en ser renovado se encuentra entre las localidades de Teulada y Gata de Gorgos, siendo en esta última localidad donde se encuentra el viaducto sobre el río Gorgos.

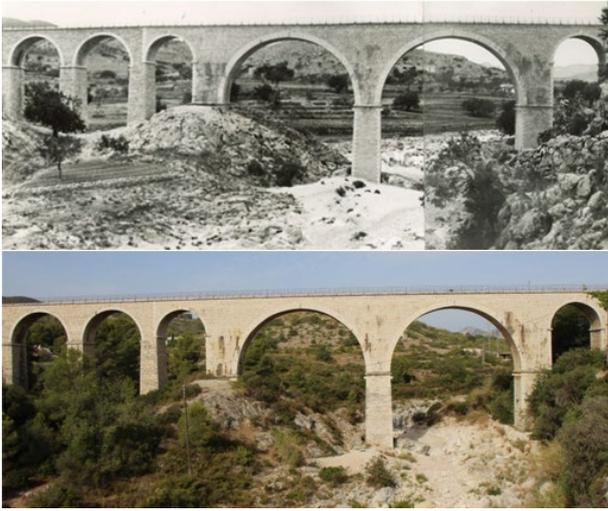


Figura 1. Alzado del viaducto sobre el río Gorgos a mediados del siglo XX (arriba) y en la actualidad (abajo)

Este viaducto de mampostería, obra del ingeniero de minas José Carbonell y finalizado en 1913, se divide en un viaducto de acceso, formado por cuatro arcos de medio punto de 10m de diámetro, y el propio viaducto sobre el río, formado también por cuatro arcos de medio punto, dos laterales de 8m de diámetro y dos centrales de 20m de diámetro, con una longitud total de 165m. Los principales objetivos del proyecto fueron reparar las deficiencias del puente causadas por el deterioro de la estructura, mejorar la capacidad estructural para resistir las cargas incluidas en la normativa de acciones vigente y cumplir los requerimientos de seguridad ferroviaria definidos por FGV, ampliando el ancho del tablero.

2. Ampliación del viaducto

La ampliación del viaducto se lleva a cabo mediante la disposición de dovelas prefabricadas de 7,50m de ancho que se colocan sobre el tablero actual ($b=4,35\text{m}$), previamente rebajado. Las dovelas prefabricadas cuentan con sendos voladizos laterales que permiten materializar paseos de mantenimiento de 0,85m de ancho. Estos paseos también sirven como líneas de evacuación en caso de que un tren se detenga sobre el viaducto.

A efectos de proponer una solución sólida bajo todos los puntos de vista, para la ampliación del tablero del viaducto de Gata, destacan los siguientes aspectos:

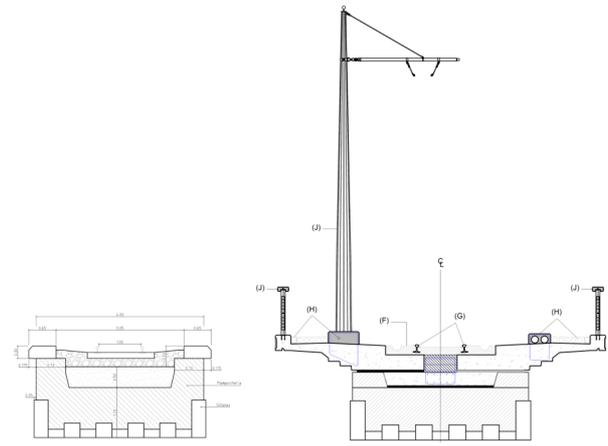


Figura 2. Sección transversal del viaducto antes (izquierda) y después (derecha) de la ampliación

- Los condicionantes técnicos, considerando los plazos y costes de construcción, pero también la durabilidad y calidad formal de la propuesta.
- Los condicionantes formales, donde resalta la arquitectura de detalle del viaducto, con todos los factores culturales y en particular artísticos que se dieron a principios del siglo pasado. En este sentido, resulta apropiado llamar la atención sobre el trazado del alzado del viaducto y en particular sobre el remate de la imposta y la geometría de la barandilla.

En relación con el primer ítem, una solución prefabricada mediante dovelas de hormigón armado, unidas in situ por juntas húmedas transversales, satisface plenamente los requisitos de durabilidad y calidad de los paramentos vistos, por las mayores garantías que sobre la calidad del hormigón y el control de ejecución ofrece la prefabricación, y por supuesto reduce los plazos. En cuanto a economía, se estima que la prefabricación de piezas de hormigón armado de gran tamaño resulta rentable para producciones superiores a las 50 unidades. En este caso, planteando dovelas de $2,50 \times 7,50\text{m}$, con un espesor medio de $0,375\text{m}$, se deberán mover 60 elementos de menos de 18 toneladas y con una envergadura de 7,50m, lo cual parece apropiado bajo todos los puntos de vista comentados con anterioridad. La siguiente describe la geometría global de las piezas y algunos detalles del encuentro entre elementos, en particular de la

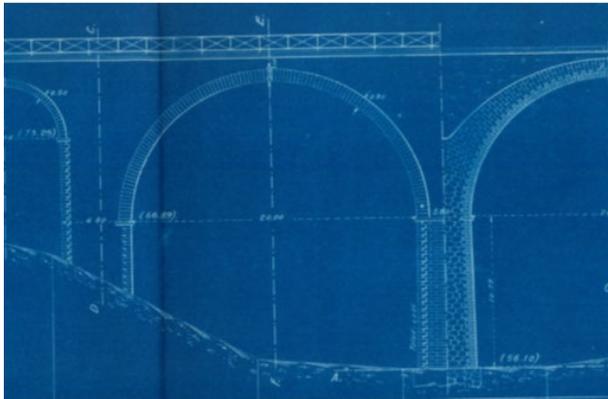
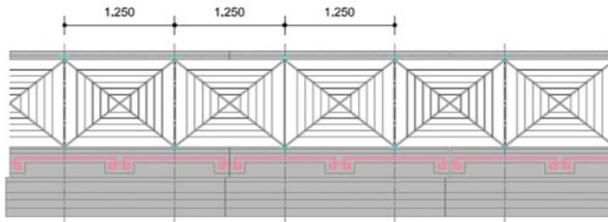


Figura 3. Balastrada y alzado de la dovela propuesta (arriba) y aspecto de la barandilla original (abajo)

forma de los bordes de contacto entre piezas (picos de flauta y llaves de alineación).

Respecto al segundo punto, se ha buscado recuperar el aspecto del alzado original, en particular de la arista y la barandilla. Para ello, se ha dotado a la dovela de un escalonado en tres pisos en sus caras laterales, con el fin de obtener un efecto similar al del proyecto original. Además, se ha reforzado la calidad estética de la arista disponiendo una greca formada por teselas cerámicas “brillo metálico” - detalle propio del art déco - en el frente de la imposta, que está moldeada con la dovela, para darle mayor solidez y durabilidad.

Por último, respecto a la barandilla, se ha optado por un sistema que combina lo pétreo (el pasamanos es una encimera de hormigón armado) con un cerramiento metálico a base de cruces de San Andrés, presente en el proyecto original, complementado por un conjunto de marcos rectangulares que garantizan adecuadamente la seguridad de los usuarios de las aceras.

3. Rehabilitación del viaducto

3.1. Datos previos e inspección visual

La visita de campo a la obra realizada por el equipo de proyecto permitió realizar una valoración visual del conjunto de la obra, así como del estado de conservación de la fábrica de piedra.

En el viaducto se distinguen dos partes por el tipo de labra de la piedra: la formada por el estribo del lado Teulada y cuatro arcos de 10 m de luz (Tramo 1) con un acabado más basto y juntas más anchas (unos 2 cm), y la formada por cuatro vanos de luces 8 m + 20 m + 20 m + 8 m y los muros de acompañamiento en el lado Gata (Tramo 2) con un acabado más trabajado y juntas más estrechas (1 cm o menos).

El aspecto general de la sillería es bueno en ambas partes. Las piezas de sillería están tomadas mediante mortero hidráulico de cal, y en algunas partes de la obra (Tramo 1) podría haberse llevado a cabo un rejuntado por el aspecto que presentan las juntas. La labra de la piedra está bien o muy bien conservada. No se observan grietas ni patologías que puedan ser debidas a asentamientos de las pilas o a movimientos de la fábrica, aunque hay diversos problemas que es necesario reparar. En concreto:

1. En los alzados de los muros de acompañamiento en el tramo más cercano a Gata se aprecia la existencia de cobertura vegetal.
2. También en alzados hay algunas zonas localizadas en la que se observan manchas negras debidas probablemente a filtración de agua desde el interior de la estructura, así como algunas pintadas localizadas en base de pila.
3. Un problema importante en la Parte 2 es la pérdida de mortero de cal entre sillares, tanto en alzados como en las bóvedas. En algún caso se ha observado que la pérdida de mortero se produce en una profundidad del orden de 10 cm.
4. La pérdida de mortero en las bóvedas está acompañada, y probablemente es causada por la existencia de filtraciones de agua, que atraviesa la estructura. Las filtraciones en las bóvedas han producido manchas generalizadas.

3.2. Actuación de rehabilitación propuesta

El criterio seguido en la actuación de ampliación y conservación es la de respetar al máximo el funcionamiento y el aspecto actual de la obra, eliminando aquellos problemas que puedan producir deterioros futuros.

Para ello se plantea:

1. Eliminar la cobertura vegetal de los alzados de los muros de acompañamiento del viaducto
2. Limpieza de la superficie de los alzados y del intradós de las bóvedas mediante métodos no agresivos para la piedra.
3. Reposición mediante inyección del mortero entre piezas de sillería con mortero de cal.
4. Retirada del paquete de vía existente hasta la cota indicada en planos, y consolidación del relleno mediante inyección de lechada por gravedad.
5. Impermeabilización del relleno justo por debajo de la actuación estructural prevista.
6. Cosido transversal de la franja superior de los muros mediante barras de fibra de vidrio para garantizar su estabilidad frente al peso del tablero ampliado y las nuevas cargas de uso.

Se requiere que los trabajos descritos sean realizados por una empresa con experiencia probada en la restauración y conservación de edificaciones históricas.

4. Proceso constructivo

El proceso constructivo previsto cuenta con las siguientes fases de ejecución:

1. Preparación de la infraestructura

En esta primera fase se desmonta la vía, se retira el balasto y se vacía el relleno granular hasta la cota de clave de las bóvedas. A continuación, se retira la imposta existente y se rebaja el tímpano hasta dejar una altura nominal sobre clave de bóveda de 0,35m. Esta última operación puede realizarse al finalizar esta fase o bien mantener estos elementos como elementos de protección hasta que sea necesaria su retirada.

2. Tratamiento de la zona excavada e instalación de tubos de desagüe

En esta fase se prevé la disposición de una lámina de polietileno sobre el fondo de excavación a lo largo de todo el viaducto, el vertido de una capa de mortero de regularización y nivelación y la ejecución de una capa de estanqueidad en la cara superior, resultando un espesor total de tratamiento de 50mm. Posteriormente, en las secciones de clave de bóveda se ejecutan unas perforaciones en el relleno y la mampostería para la instalación de los tubos de desagüe.

3. Ejecución de la solera de hormigón armado y colocación de las dovelas

En primer lugar, se ejecutarán los taladros y se colocarán los tirantes y barras de cosido en aquellas zonas del viaducto donde sea necesario reforzar los tímpanos. De manera general, en esta fase se colocan las armaduras de las llaves de conexión entre la solera y las dovelas prefabricadas. Posteriormente, se hormigona la solera, la cual tiene un espesor mínimo de 0,35m incluyendo el espesor de las capas de regularización y estanqueidad. A continuación, se ejecuta la capa de mortero para asiento y nivelación de las dovelas. Por último, se colocan las dovelas y se rellenan las llaves de conexión y las juntas transversales entre dovelas.

4. Colocación de la vía y ejecución de los equipamientos

En esta última fase se hormigona el cajeadado de la vía, incluyendo la formación de pendientes y canaletas de desagüe. Tras esto, se disponen los carriles embebidos para, a continuación, colocar las rigolas y conductos y ejecutar los plintos longitudinales y aceras. Por último, se colocan la balaustrada y los postes de catenaria y se ejecuta el paso y conexión de servicios.

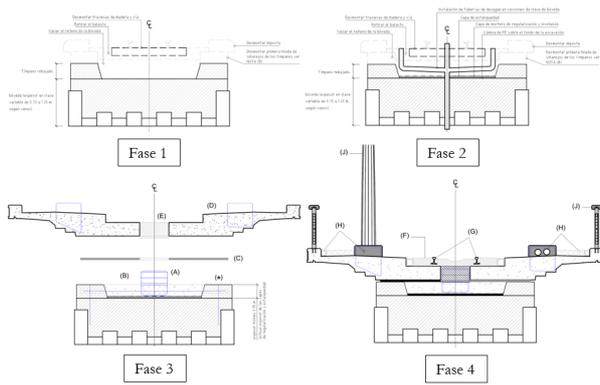


Figura 4. Esquema de las fases de ejecución

5. Modelos de cálculo

Abordar la evaluación estructural de un puente arco de fábrica tiene la complejidad de enfrentarse a una tipología constructiva ya abandonada hace tiempo, que, además, en el momento de su abandono no contaba con métodos de análisis satisfactorios por falta de desarrollo científico. En los últimos años, dada la existencia de muchas de estas estructuras en las redes viarias y ferroviarias, se ha planteado el problema de su evaluación estructural para garantizar su seguridad ante las nuevas condiciones del tráfico, ampliaciones de plataforma, etc. Ello se ha reflejado en el desarrollo de nuevas herramientas y metodologías a partir de los actuales conocimientos estructurales.

En cualquier caso, implementar un modelo que englobe la respuesta conjunta de la estructura exige un esfuerzo que muchas veces no se justifica, ni por su coste ni por la calidad de los resultados obtenibles. Además, un modelo de ese tipo requeriría una enorme cantidad de datos, algunos de los cuales sería muy difícil, por no decir imposible, de conseguir, como puede ser la caracterización tenso-deformacional del material.

En general, se considera suficientemente aproximada la comprobación, por separado, de la seguridad de los distintos subsistemas estructurales, como son: bóvedas, pilas y estribos; tímpanos; y muros de acompañamiento. De los anteriores, el subsistema formado por bóvedas, pilas y estribos es el primario, por lo que su análisis es el que determinará la carga de colapso, siempre que los restantes elementos cumplan con las comprobaciones debidas.

5.1. Modelo global

Para el análisis del subsistema estructural primario formado por bóvedas, pilas y estribos existen dos niveles de análisis aplicables: procedimientos de primer nivel y de segundo nivel.

Según [1], ambos procedimientos no son excluyentes, sino que son sucesivas aproximaciones al problema. Se trata de realizar, en los casos donde sea factible, un primer análisis más sencillo (primer nivel) que, en ocasiones, puede ser suficiente para poder decidir si la estructura es suficientemente segura. En ese caso, no es necesario realizar un análisis de segundo nivel a menos que se quiera estudiar el comportamiento en servicio.

Los procedimientos de primer nivel son los basados en el análisis plástico o de bloques rígidos. Con ellos sólo es posible estudiar el comportamiento de estas estructuras en agotamiento y, dentro de éste, el fallo mediante la formación de mecanismos (algunos también permiten considerar la resistencia a compresión de la fábrica).

Dentro de los procedimientos de primer nivel, los métodos de bloques rígidos son los más generales, pues permiten considerar de forma correcta la cinemática del problema e introducir de manera más aproximada tanto las cargas como la resistencia del relleno, dando valores de la carga

Los procedimientos de segundo nivel están especialmente orientados al estudio del comportamiento en servicio de la estructura, aunque también se pueden utilizar para aproximar el comportamiento de la estructura en situaciones cercanas al colapso. En el caso de los modelos bidimensionales lo más aconsejable es recurrir al empleo del método de elementos finitos (MEF), dada su versatilidad y potencia que permiten su aplicación a análisis lineales o no lineales, estáticos o dinámicos.

En este proyecto se ha optado por seguir un procedimiento de segundo nivel, desarrollando un modelo bidimensional de elementos finitos con el programa SAP2000 que sirva tanto para el análisis global de la estructura en Estado Límite Último y en Estado Límite de Servicio.

Se ha implementado un modelo bidimensional de elementos finitos para el análisis estructural del viaducto, considerando la totalidad de este.

En general, el modelo bidimensional está formado por elementos lámina y por elementos tipo link con las siguientes características:

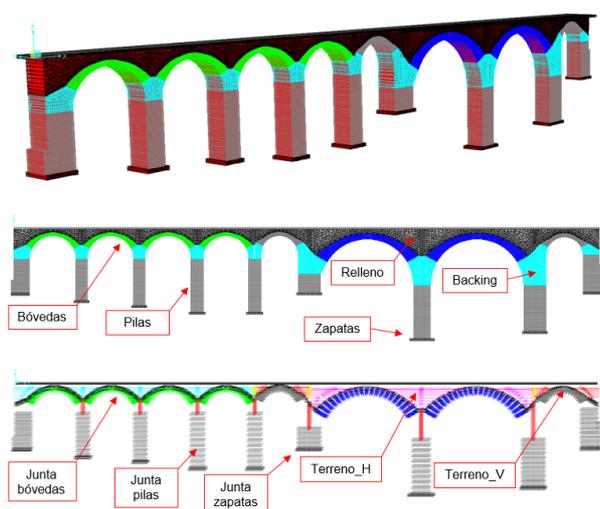


Figura 5. Componentes del modelo global bidimensional realizado en SAP2000

- Elementos lámina - Bóvedas

Las bóvedas se han simulado de acuerdo con la geometría recogida en el proyecto original, considerando por tanto su variación de canto a lo largo de la directriz. Se ha considerado que la sección de arranque de la bóveda se sitúa en la sección de riñones, coincidente también con la denominada junta de rotura. De este modo, la bóveda efectiva es la comprendida entre riñones, considerándose el resto de bóveda por debajo de estas secciones como una prolongación de la pila o estribo, denominada backing o relleno rígido.

Cada bóveda se ha dividido en sectores circulares, simulando dovelas. Cada dovela se ha dividido circunferencialmente (longitud) y también radialmente (espesor).

Para simular las juntas entre dovelas, cada sector circular se encuentra separado del siguiente una distancia igual a $0,20^\circ$.

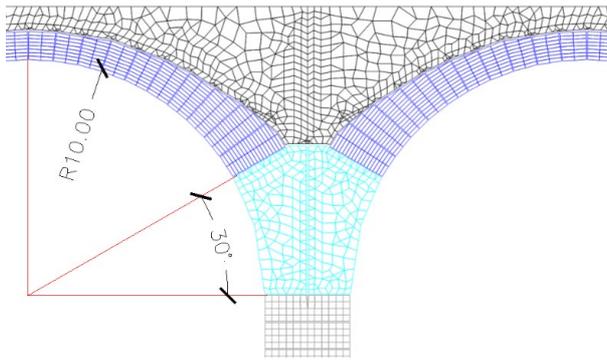
- Elementos lámina - Pilas / Estribos

Las pilas y estribos se han simulado de acuerdo con la geometría recogida en planos, si bien se ha considerado un espesor medio a lo largo de la directriz.

Cada pila y estribo se ha dividido en bloques de 1,00m de canto aproximadamente, simulando bloques de sillares horizontales.

Cada bloque de sillares se ha dividido en 4 partes a lo largo de la directriz, resultando en divisiones de 0,25m de canto aproximadamente, mientras que, en el sentido transversal, las divisiones se han hecho cada 0,35m de ancho aproximadamente.

Para simular las juntas entre bloques de sillares, cada bloque se encuentra separado del siguiente una distancia igual a 5 cm



- Elementos link – Juntas entre secciones de mampostería

Las juntas entre dovelas o entre secciones de pila/estribo se modelizan con elementos tipo muelle multilínea sin resistencia a tracción. De esta forma, el muelle sólo transmite compresiones, permitiendo la separación de los elementos en caso de aparición de tracciones. Por tanto, las tracciones en los contactos entre secciones darán lugar a la apertura de una fisura que, junto con el modelo constitutivo del muelle, permite reproducir en el límite el comportamiento de una rótula plástica, dando lugar a la formación de mecanismos de colapso perfectamente identificables.

Para poder reproducir correctamente el comportamiento de las juntas entre secciones de fábrica, de forma que sea posible estimar desplazamientos y aberturas de fisuras en servicio, se ha optado por concentrar toda la deformación en dichas juntas. La rigidez a compresión de los muelles viene dada, en una primera rama que llega hasta el 75% de la resistencia de cálculo de la fábrica, con el módulo de elasticidad secante propuesto en el informe geotécnico; posteriormente, se adopta una segunda rama de reblandecimiento desde ese punto hasta el definido por la resistencia de cálculo y la deformación que produce la plastificación de la fábrica, que se supone igual al 2 por mil en flexocompresión. A partir de ahí, el muelle se deforma sin incrementos de fuerza, hasta alcanzar la deformación última de la piedra que se toma igual al 3,5 por mil, desde donde se supone que cae a fuerza nula para una deformación del 4 por mil.

- Elementos link – Conexión vertical entre relleno y bóvedas

Tal y como se ha comentado cuando se han descrito, los elementos lámina que modelan el terreno pretenden transferir las cargas permanentes correspondientes al peso propio del mismo y de la superestructura, así como las cargas variables correspondientes al vehículo ferroviario, las cuales se dispersan a través de éste.

Figura 6. Detalle de arranque de bóveda en FEM

- Elementos lámina - Relleno

El peso propio del material de relleno pre-comprime la mampostería de un arco incrementando por tanto su capacidad de carga (siempre que la mampostería tenga la suficiente resistencia a compresión). Además, el relleno tiene dos efectos beneficiosos adicionales en el comportamiento del arco: dispersa las cargas verticales variables y restringe el movimiento del arco contra el terreno, movilizándolo el empuje pasivo del mismo.

Los elementos lámina con los que se modela el relleno pretenden reproducir los dos primeros efectos citados, mediante la introducción del peso del material asociado y mediante un mallado que permita una dispersión de las cargas similar a la de Boussinesq, con ángulos de dispersión alrededor de 30°.

- Elementos lámina – Backing (relleno rígido)

El relleno rígido es aquel que se encuentra generalmente en la zona cerca a los arranques de la bóveda, definiendo una zona de transición entre bóveda y pila o bóveda y estribo.

La presencia de una zona de mayor rigidez en los arranques modifica sustancialmente el comportamiento del puente arco. Esta zona más cementada y rígida tiene unas propiedades mecánicas semejantes a la bóveda, pila o estribo.

Por ello, a efectos de valorar su contribución estructural se considerará como un elemento portante rígido del mismo material que los elementos citados.

El contacto entre los elementos lámina del relleno y los elementos lámina de la bóveda se lleva a cabo mediante elementos verticales uniaxiales tipo muelle sin resistencia a tracción. De esta forma, el muelle sólo transmite compresiones, permitiendo la separación entre la bóveda y el relleno en caso de aparición de tracciones.

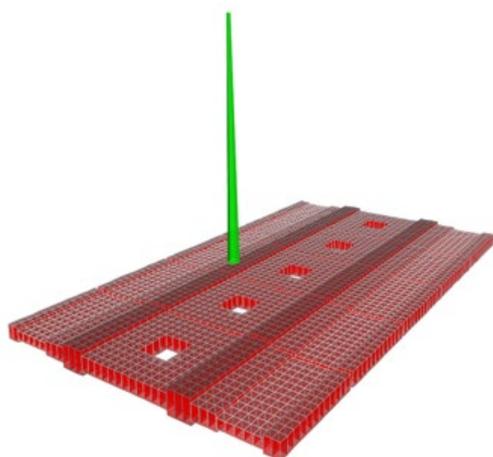
- Elementos link – Conexión horizontal entre relleno y bóvedas

Para modelizar la contención pasiva experimentada por las secciones de bóveda que se desplazan contra el terreno, se han utilizado elementos horizontales uniaxiales tipo muelle multilíneal sin resistencia a tracción.

De este modo, estos elementos únicamente aplican una fuerza en la parte no cargada del arco. El empuje activo aplicado en el lado cargado del arco ha sido despreciado, al igual que en otros paquetes de software especializados, dado que habitualmente su valor es relativamente pequeño.

La fuerza de compresión transmitida por cada link tiene un valor constante igual a la presión horizontal existente en la cota a la que se sitúa el link, multiplicada por su área vertical tributaria.

La teoría clásica de presiones laterales del terreno, desarrollada originalmente para muros de contención verticales, es usada habitualmente en el análisis de arcos de mampostería para estimar la cantidad de empuje pasivo que puede movilizar el terreno.



5.2. Modelo local

Para el dimensionamiento de las dovelas se realizó un modelo local de éstas, incluyendo elementos más específicos como los postes de catenaria o las juntas entre dovelas y acciones de gran importancia local como el frenado y la fuerza centrífuga.

Las juntas entre las dovelas y el tablero se modelizan con elementos tipo muelle Gap sin resistencia a tracción. De esta forma, el muelle sólo transmite compresiones, permitiendo la separación de los elementos en caso de aparición de tracciones. Por tanto, las tracciones en los contactos entre una determinada zapata y el terreno darán lugar a un despegue de ésta.

Debe indicarse que, en el caso de los elementos que rodean a la llave de cortante, los muelles también pueden transmitir acciones horizontales en la dirección perpendicular a la cara en la que se disponen.

La rigidez de los muelles viene determinada por el coeficiente de balasto considerado y por el área tributaria de cada uno de ellos

Dado que las dovelas pueden apoyar en zonas de distinta rigidez a lo largo del puente (p.e. sobre la clave de una bóveda o sobre una pila), se han adoptado dos hipótesis en los cálculos, siendo la primera 20 veces más rígida que la segunda.

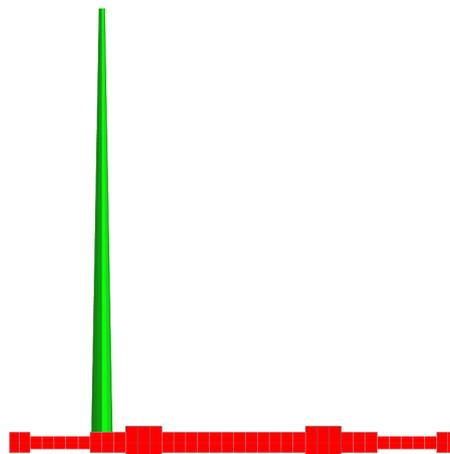


Figura 7. Detalle del modelo local realizado para la dovela

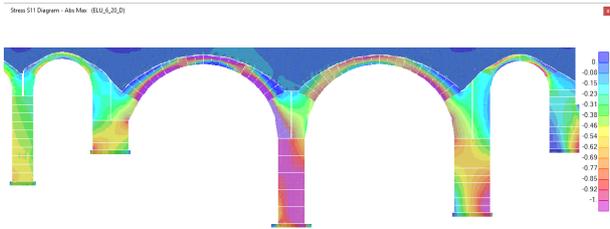


Figura 8. Tensiones longitudinales en el viaducto bajo un determinado caso de carga

5.2. Resultados

Durante el análisis longitudinal del subsistema estructural primario en Estado Límite Último no se ha observado ningún fallo ni por Estados Límite de pérdida de equilibrio estático ni por Estados Límite de agotamiento del material.

Ambas verificaciones se encuentran implícitas en el modelo, ya que los muelles multilíneales que modelizan las juntas entre dovelas poseen curvas fuerza-desplazamiento que por un lado permiten la formación de fisuras y por otro impiden sobrepasar la resistencia de cálculo de la fábrica.

En caso de convergencia de todos los casos analizados, se procede igualmente a revisar la formación de rótulas a lo largo del viaducto. En base al modelo desarrollado, se considera que se ha formado una rótula en una determinada junta cuando únicamente queda comprimido uno de los links extremos.

Nuevamente, aunque se aprecia la formación de fisuras bajo las cargas últimas, no llega a apreciarse la formación de rótulas plásticas, por lo que el comportamiento longitudinal de la estructura primaria queda verificado en Estado Límite Último.

También se realiza la verificación del Estado Límite de Servicio en lo que se refiere al nivel de tensiones normales en servicio en combinación con la limitación de empujes y tensiones transmitidas al terreno. Esta comprobación evita los posibles problemas de fatiga y cansancio del material en el futuro.

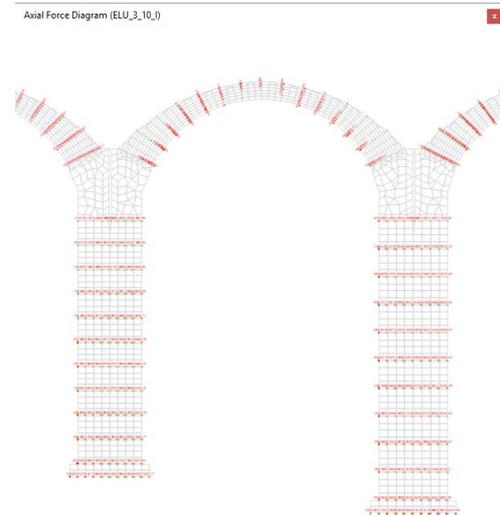


Figura 9. Fisuras producidas en un arco bajo un determinado caso de carga

Por último, se ha evaluado la máxima abertura de fisura en el trasdós de las secciones de riñones y en el trasdós de la sección de clave, ya que las máximas fisuras tienden a producirse en las mismas posiciones en las que, al aumentar la carga, se forman las rótulas plásticas que conducen al colapso.

Por otro lado, aunque queda fuera del objeto de este artículo, también se ha analizado el comportamiento transversal del viaducto, frente a acciones laterales como el efecto lazo, la fuerza centrífuga el viento o el sismo, no observándose ningún fallo.

Por tanto, puede concluirse que el comportamiento general del viaducto es adecuado y puede hacer frente a las acciones prescritas en las normativas actuales.

Únicamente al realizar verificaciones en elementos locales, como los tímpanos o los muros de acompañamiento, se han observado fallos bajo el nuevo tren de cargas. Por este motivo, se propone el cosido de tímpanos y muros de acompañamiento mediante barras de fibra de vidrio alojadas en rellenos de mortero de cal, siendo esta la única actividad a considerar puramente como un refuerzo estructural.

6. Conclusiones

En los últimos años se ha llevado a cabo una importante labor por parte de FGV en la renovación de una de las líneas ferroviarias históricas de nuestro país.

En el caso del viaducto de Gata, las actuaciones se han centrado en poner al día al puente, tanto desde el punto de vista funcional como estructural.

Con las operaciones planteadas se ha asegurado que el viaducto es capaz de resistir las acciones recogidas en la normativa actual, se han corregido aquellas deficiencias que ponían en riesgo la durabilidad de la estructura a medio plazo y se ha realizado una ampliación de tablero que permite mejorar tanto la seguridad como la explotación de la plataforma ferroviaria.

Desde el punto de vista del análisis estructural, este proyecto ha permitido ahondar en el cálculo de viaductos de mampostería con un software de elementos finitos comercial como puede ser SAP2000, habiendo obtenido resultados muy satisfactorios y contrastados.

Quizás la mayor incertidumbre a día de hoy radica en como calibrar los modelos MEF realizados de modo que no se deba recurrir a modelos de contraste en otro software específico, como puede ser RING.

Por último, destacar que al tratarse de un viaducto urbano, enclavado en el cauce del río Gorgos a su paso por Gata de Gorgos, se ha tenido un especial cuidado en el aspecto formal de la ampliación del tablero, tanto en la propia geometría de las dovelas y las barandillas como en la iluminación ornamental de la estructura.

Agradecimientos

Nos gustaría expresar nuestro agradecimiento a los profesores de la Universidad Politécnica de Valencia, Salvador Monleón y Carlos Lázaro, por su aportación al desarrollo del proyecto, aportando su experiencia en este tipo de actuaciones. También nos gustaría destacar el trabajo llevado a cabo por A-Ingenia, consultora junto a la que Degree of Freedom constituyó la UTE para el desarrollo del proyecto.

Referencias

- [1] M. Caro, Análisis estructural de puentes arco-Criterios de comprobación, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2001.
- [2] J.J. Clemente, Evaluación de puentes arco de fábrica: introducción al análisis con MEF, Universidad Politécnica de Valencia, España, 2005.
- [3] T.E. Ford, Modelling masonry arch bridges using commercial finite element software, School of Engineering, University of Durham United Kingdom, 2003.
- [4] C. Costa, Detailed FE and DE modelling of stone masonry arch bridges for the assessment of load-carrying capacity, 1st International Conference on Structural Integrity, 2015.
- [5] M.A. Crisfield, A mechanism program for computing the strength of masonry arch bridges, Transport and Road Laboratory of Berkshire, United Kingdom, 1987
- [6] S. Huerta, Arcos, bóvedas y cúpulas, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, España, 2004.
- [7] J. Garabito, Métodos para la limpieza física, química y biológica de las fábricas de piedra de monumentos históricos, Informes de la Construcción Vol. 65, p 367-380, 2013.