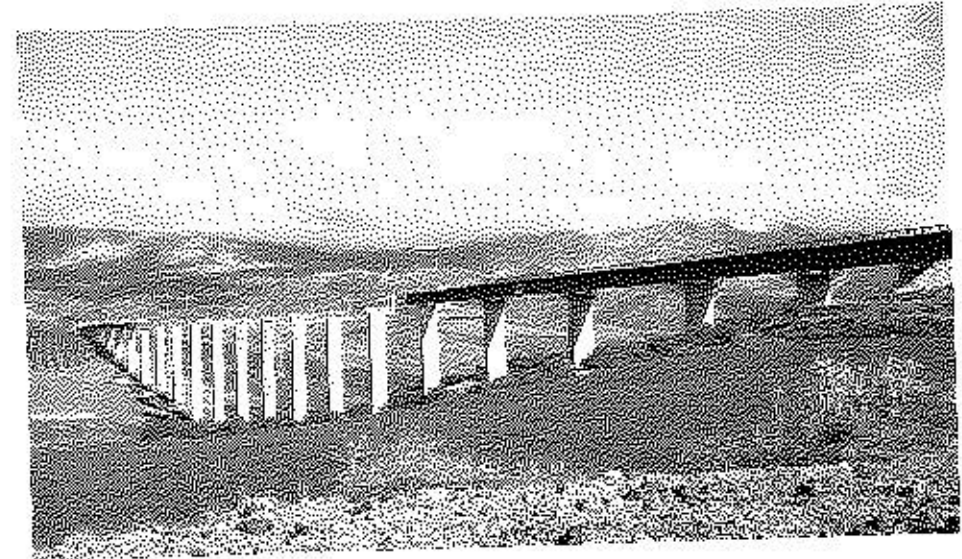


Realizaciones



VIADUCTO MIXTO SOBRE EL ARROYO DE LAS PIEDRAS EN LA L.A.V. CÓRDOBA-MÁLAGA. EL PRIMER VIADUCTO MIXTO DE LAS L.A.V. ESPAÑOLAS

Francisco **MILLANES MATO**¹, Javier **PASCUAL SANTOS**²

¹ Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, IDEAM S.A.

² Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos, IDEAM S.A.

RESUMEN

En el presente artículo se describe una solución innovadora en el proyecto de puentes mixtos para ferrocarril de alta velocidad, que se está construyendo en el Viaducto sobre el Arroyo de las Piedras, proyectado por IDEAM, primer viaducto mixto de las L.A.V. españolas. Dicha solución extiende al ámbito ferroviario las soluciones en cajón estricto que desde hace años vienen desarrollándose en nuestro país para los puentes de carretera. El diseño se centra en las clásicas soluciones bijnácena habituales en Europa, modificadas para, manteniendo las ventajas constructivas de las mismas, proporcionar una respuesta resistente más propia de las secciones cajón. Asimismo, la doble acción mixta frecuentemente utilizada en las áreas de flexión negativa se generaliza a toda la longitud del tablero para dar respuesta a la rigidez a torsión necesaria. También se describen en el artículo otros aspectos considerados de interés, como detalles específicos para mejorar la resistencia de las almas frente a las reacciones concentradas durante el empuje del tablero, y algunos aspectos ligados al diseño antisísmico.

PALABRAS CLAVE

Puente ferroviario para alta velocidad / doble acción mixta / patch loading / aislamiento sísmico.

1. DESCRIPCIÓN DEL PUENTE

El puente sobre el Arroyo de las Piedras es el primer puente mixto para las líneas de ferrocarril de alta velocidad españolas. Se ubica en la Línea de Alta Velocidad entre Córdoba y Málaga. La tipología estructural es una viga continua con luces $50.4 + 17 \times 63.5 + 44 + 35$ metros. Las luces principales son las mayores existentes en la actualidad para puentes rectos de ferrocarril de alta velocidad. La altura de las pilas es reseñable, pues varias de ellas superan los noventa metros. El puente se encuentra actualmente en construcción por empuje del tablero, que concluirá al final del verano de 2005. La empresa constructora adjudicataria de las obras es ALTEC, y el taller metálico contratado para la subestructura metálica es MEGUSA, siendo BBR la empresa

responsable del sistema de empuje. Un alzado del mismo se muestra en la figura 1.

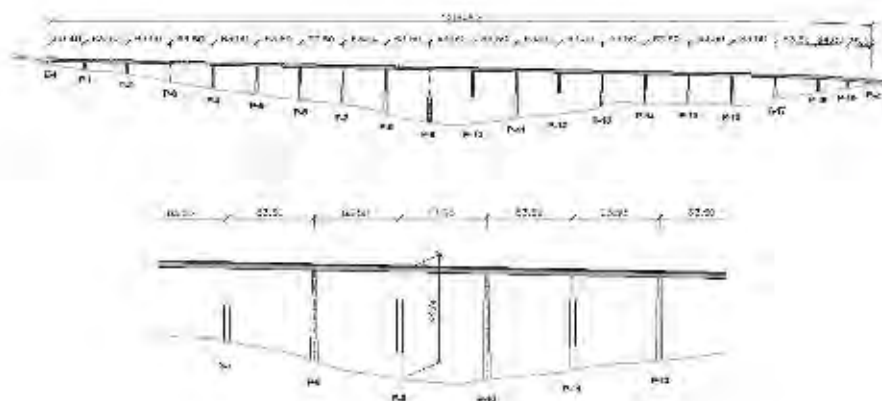


Figura 1. Alzado del puente

La sección transversal del tablero se constituye por dos vigas laterales de 3.85 metros de canto cada una, más una losa superior cuyo espesor varía desde 0.41m en el eje longitudinal del tablero hasta 0.22 m en el borde de los voladizos. El resultado es una sección transversal mixta hormigón-acero con canto total constante de 4.26 metros. La figura 2a muestra la sección transversal típica en las áreas de flexión positiva. En cierto modo es similar a las clásicas soluciones biárcena, aunque se han introducido algunas modificaciones:

- Se disponen diafragmas transversales en celosía en lugar de diafragmas de alma llena del mismo canto que las vigas principales. Los diafragmas en celosía facilitan el ensamblaje en obra, y disminuyen el peso de acero y volumen de soldadura necesaria. Se disponen a lo largo de todo el puente cada 8 metros aproximadamente. Las uniones se han proyectado con cordones de soldadura en ángulo en lugar de tornillos de alta resistencia al objeto de simplificar las labores de control en obra. La respuesta a fatiga fue cuidadosamente estudiada, con resultados satisfactorios.
- La celosía metálica inferior es sustituida por una losa inferior a base de placas prefabricadas con dos metros de longitud cada una y 14 cm de

espesor. Las placas no se conectan entre sí en toda su longitud, y sólo un metro a cada lado es necesario para transferir los flujos torsionales entre las vigas principales y las losas. De este modo se garantiza la rigidez torsional necesaria, incluso mejor que con la clásica celosía metálica inferior, pero no se introducen tensiones normales de tracción debidas a flexiones positivas debido a la discontinuidad entre las losas prefabricadas inferiores. Como resultado, no existe fisuración relevante en las losas. Los costeros laterales in situ de un metro a cada lado pueden extenderse fácilmente al ancho completo entre las vigas principales para obtener la doble acción mixta típica en las zonas de flexión negativa, tal y como se describe más adelante.

- Células triangulares de esquina exteriores sustituyen a la rigidización longitudinal de almas. Estas células mejoran la estabilidad de alas y almas comprimidas en montaje y estados de servicio. Además, la célula inferior exterior y el costero lateral de hormigón in situ antes descrito constituyen un sistema excelente para mejorar la resistencia del alma frente a cargas concentradas durante el empuje. La rigidización de almas se reduce a la colocación de rigidizadores verticales cada cuatro metros.
- Se disponen perfiles transversales IPN conectados a la losa superior cada dos metros aproximadamente. De este modo, un emparillado mixto hormigón-acero actúa como soporte de la plataforma, con la consiguiente reducción en peso total de losa.

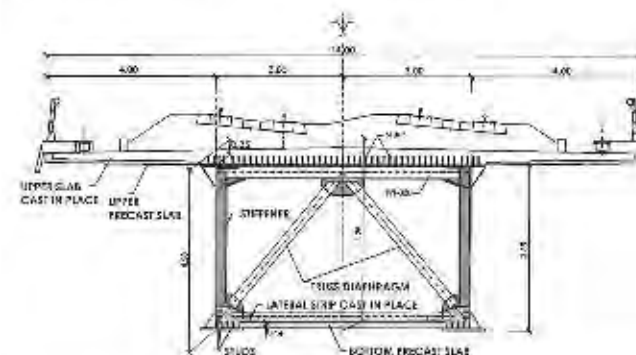


Figura 2a. Sección transversal en zonas centrales de vano

La figura 2b muestra la sección transversal típica en las zonas de flexión negativa. La sección es similar a la correspondiente a las zonas centrales de vano, pero la doble acción mixta se obtiene mediante un hormigonado in situ inferior sobre prelasas colaborantes. La losa inferior se extiende 13.90 metros hacia cada lado de pila en los vanos de 63.50 metros, algo menos en los vanos más cortos. Su espesor varía desde 25 cm en el extremo hasta un máximo de 50 cm en las secciones situadas sobre pilas. Esta losa se conecta con pernos y armadura pasiva a las vigas principales, y su presencia permite que el espesor máximo de chapa en el puente sea de tan solo 40 mm, mucho menos que en las clásicas soluciones bijácena.

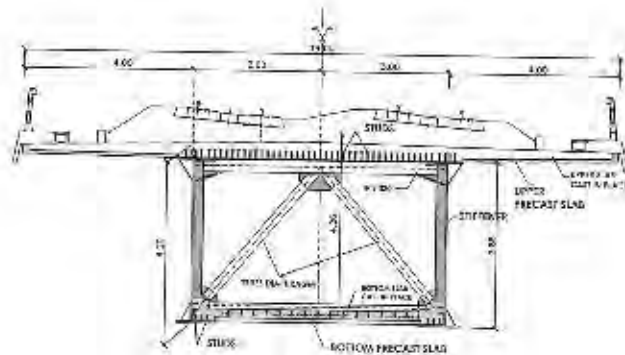


Figura 2b. Sección transversal sobre apoyos

2. LA DOBLE ACCIÓN MIXTA GENERALIZADA A TORSIÓN

La clásica solución bijácena en puentes de carretera debe mejorar su rigidez torsional para dar respuesta a los condicionantes de la alta velocidad ferroviaria, por lo que se recurre generalmente al empleo de diafragmas transversales y celosía metálica inferior. Sin embargo, en el viaducto sobre el Arroyo de Las Piedras se ha desarrollado una solución alternativa. La doble acción mixta se ha extendido a la totalidad del tablero para permitir el cierre del circuito de torsión. Como se ha descrito anteriormente, una sección en cajón estricto se obtiene en las zonas de vano con el empleo de prelasas discontinuas conectadas a las vigas. Cuando se aplican cargas excéntricas, los diafragmas transversales en celosía introducen los flujos torsionales, y el sistema de prelasas inferiores discontinuas actúa a modo Vierendel,

desarrollando cortante y flexión en su plano, y permitiendo el cierre del circuito torsional. El espesor de las losas es de 14 cm y su longitud de 2 metros. Se extienden entre las dos vigas principales del puente, pero sólo se conectan entre sí en sendos costeros laterales de un metro de anchura cada uno, necesarios y suficientes para la transferencia del flujo torsor entre las vigas y las losas. El cortante en las losas resultante del trabajo Vierendel genera flexión variable en las mismas, nula en el eje longitudinal del puente y máxima en el empotramiento a los costeros laterales. Como resultado, el área comprimida en una losa resultante de la flexión en su plano se equilibra con el área traccionada de la losa contigua. El cortante en cada losa se equilibra con el rasante introducido por los pernos. Todas estas fuerzas tienen valores constantes entre diafragmas sucesivos, ya que el torsor se introduce localmente en los diafragmas. Sin embargo, es claro que las resultantes de todas las fuerzas no convergen en el mismo punto, por lo que es precisa una cierta flexión horizontal en los costeros laterales para el equilibrio. La figura 3 muestra la respuesta estructural del sistema de losas discontinuas entre diafragmas sucesivos sometido al flujo torsional.

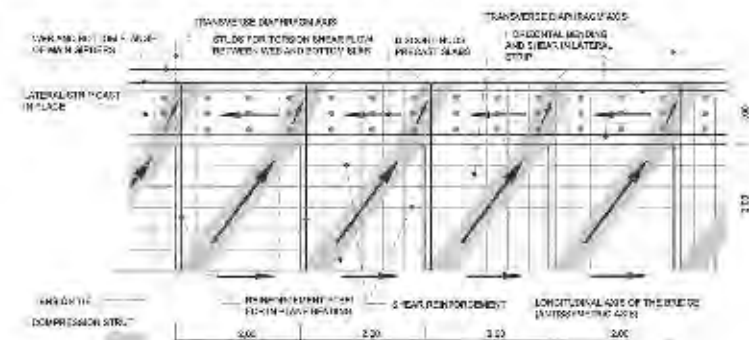


Figura 3. Respuesta torsional del sistema inferior de prelasas discontinuas y costeros laterales

La incidencia de las prelasas discontinuas en la rigidez torsional del puente fue cuidadosamente estudiada en proyecto mediante una modelización con elementos finitos. Finalmente, se obtuvo una reducción al 66% de la que proporcionaría una losa continua. Sin embargo, la rigidez eficazmente proporcionada por las losas resulta drásticamente condicionada por la posible fisuración de las mismas, por lo que el diseño del puente se realizó en la

hipótesis conservadora de fisuración total de las bandas traccionadas por el rasante, y obtención de la rigidez equivalente por medio de la que correspondería a un modelo biela-tirante en estas condiciones. En este caso la rigidez torsional obtenida es aproximadamente el 18 % de la correspondiente al estado no fisurado, que corresponde al 12 % de la rigidez correspondiente a la losa continua no fisurada. El control estático y dinámico del puente con estos valores garantizó la adecuada respuesta real del tablero. Incluso en esta hipótesis extrema de fisuración el espesor equivalente obtenido para la losa inferior es de alrededor de 1.4 milímetros, similar al que se obtiene con las clásicas celosías inferiores, que se sitúan habitualmente entre 0.8 y 2 milímetros.

Las losas inferiores tienen también una buena respuesta en las zonas de flexión positiva. La ausencia de conexión transversal entre ellas más allá de la que proporcionan los costeros laterales impide el desarrollo de un ancho eficaz colaborante a tracción relevante. Las tensiones de tracción en el ala inferior son inferiores a 1300 kp/cm² bajo cargas permanentes y 3000 kp/cm² bajo sobrecargas pésimas, y la conexión entre las alas inferiores y los costeros laterales, y el armado longitudinal inferior ubicado en éstos, son suficientes para el control de fisuración en estas zonas.

Como hemos indicado al principio, los costeros laterales se extienden a toda la anchura de la sección en las zonas a flexión negativa para proporcionar la doble acción mixta. Las tensiones de compresión procedentes de la flexión mantienen la losa inferior sin fisuras, por lo que las rigideces a flexión y torsión en estas zonas son sensiblemente superiores a las obtenidas clásicamente con secciones de acero. La doble acción mixta mejora drásticamente la respuesta deformacional y dinámica tanto a flexión como a torsión.

Pero indudablemente la principal ventaja de la doble acción mixta afecta a la respuesta del puente en estado límite último. Las secciones transversales a lo largo de todo el puente son de clase 1 (positivos) ó 2 (negativos). La figura 4 muestra la posición de la fibra neutra plástica a lo largo de un vano de 63.50 metros, en comparación con los valores límite que determina la clase 2. Se muestra que todas las secciones del puente son al menos de clase 2. En esta situación se evita todo problema de inestabilidad en estado límite último, no

sólo en las alas inferiores debido a su conexión al hormigón, sino también en las almas, debido la baja posición de la fibra neutra en estado límite último.

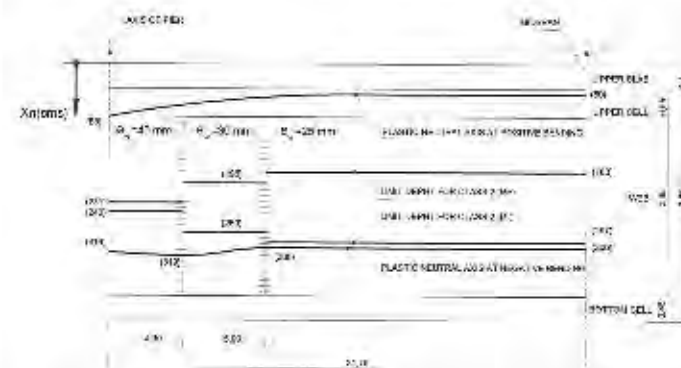


Figura 4. Posición de la fibra neutra plástica a lo largo del puente

La figura 5 muestra el diagrama momento-curvatura en una sección a flexión negativa ubicada sobre pilas. En situación de momento último se alcanza una deformación alrededor del 0,28% en la fibra más comprimida del ala inferior, y del 0,7 % en la más traccionada del ala superior. La curvatura última resulta ser 3,40 veces la elástica, por lo que se obtiene una ductilidad muy favorable y significativa en la respuesta en estado límite último.

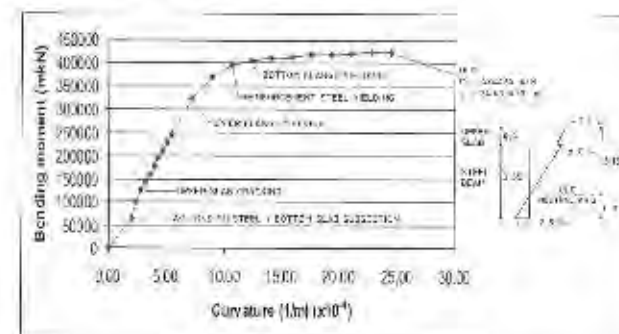


Figura 5. Diagrama momento-curvatura en sección a flexión negativa sobre pilas

Como resultado, un diseño seguro y económico es posible con un análisis global elástico a nivel de esfuerzos y elasto-plástico a nivel de secciones, tanto a flexión positiva como negativa. Hay incluso capacidad suficiente para alcanzar situaciones próximas al análisis global plástico en estado límite último

por medio de un adecuado control de las rotaciones elastoplásticas, y sin riesgo de inestabilidades frágiles en el proceso. Sin duda esta condición constituye una ventaja estructural irrefutable de la solución con cajón estrecho y doble acción mixta frente a las alternativas bñácena más clásicas.

3. EL EMPUJE DEL TABLERO

Como hemos indicado anteriormente, el puente se encuentra actualmente en construcción por empuje. La sección transversal durante el empuje (figura 6) incluye la totalidad del acero estructural y la losa inferior, así como las prelasas superiores, sin conexión todavía al tablero, sobre las que posteriormente se hormigonará la losa superior. Como excepción, el primer vano incluye sólo el acero estructural sin hormigón superior e inferior, al objeto de evitar esfuerzos excesivos durante el lanzamiento en las fases en voladizo.

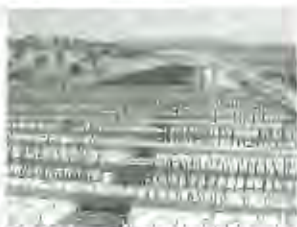


Figura 6. Sección transversal en empuje



Figura 7. Sistema bñácena primario

Durante el empuje la reacción concentrada sobre cada alma alcanza 4250 kN por apoyo, lo que exigió un exhaustivo control de la aptitud de las mismas, y, en particular, el desarrollo de diseños específicos para la mejora de la respuesta de las almas durante el empuje, en particular el empleo de la célula inferior y los costeros laterales como elemento de reparto entre rigidizadores transversales. En este mismo congreso presentamos una ponencia específica sobre la respuesta de las almas del puente durante el empuje, titulada "Diseño para mejora de la resistencia de almas esbeltas durante el empuje de grandes viaductos mixtos", por lo que remitimos al lector a la misma, sin incluir aquí un mayor desarrollo. Del mismo modo, presentamos también en esta asamblea otra comunicación centrada en los aspectos específicos relativos al empuje de viaductos mixtos, con las enseñanzas adquiridas en este proyecto.

4. DISEÑO SÍSMICO

La adopción de las vinculaciones longitudinales del tablero constituyó un problema fundamental en el diseño del puente. Las condiciones eran realmente muy restrictivas:

- La aceleración sísmica del emplazamiento es alta para los niveles usuales en España (0.10 g).
- La longitud total del puente es demasiado grande para disponer un único punto fijo en un estribo, por causa del movimiento total acumulado en el estribo opuesto.
- La altura de las pilas y las condiciones de cimentación no permiten disponer puntos fijos intermedios.

Para dar respuesta a estos condicionantes se dispusieron transmisores de impacto en ambos estribos que incorporaban además dispositivos amortiguadores frente a la acción sísmica. De este modo, los movimientos lentos debidos a acciones térmicas y reológicas pueden desarrollarse sin apenas resistencia, y a la vez las acciones horizontales del tablero debidas al frenado de los vehículos ferroviarios se transmiten a ambos estribos sin apenas desplazamientos. Además, la fuerza transmitida a la subestructura durante la acción sísmica es acotada a valores controlados. El sistema de aislamiento sísmico también incluye apoyos deslizantes guiados en las pilas P1-P7, P12-P19 y estribos, que actúan como aisladores sísmicos en dirección longitudinal, y apoyos fijos en dos direcciones en las pilas P8 a P11, las más altas, para introducir las fuerzas de recentrado necesarias. No se disponen aisladores en sentido transversal, en el que la flexibilidad necesaria se confía a la deformación elástica de las pilas.

Bajo acciones de servicio ferroviario los amortiguadores de estribos actúan como transmisores de impacto frente a las acciones longitudinales, y constituyen la vinculación principal del puente en esta dirección, de modo que las fuerzas de diseño de los mismos corresponden a la acción longitudinal mayorada debida al frenado y viento longitudinal. Se disponen en cada estribo cuatro amortiguadores con 2200 kN de fuerza máxima cada uno. La ley constitutiva del aparato para movimientos a gran velocidad, como los

ocasionados por el frenado, es del tipo $F = C \times V^2$. Al objeto de mantener la fuerza desarrollada por el aparato en un valor casi constante para un rango de velocidades amplio durante el ataque sísmico α debe ser inferior a 0,015. De este modo puede asumirse $F = C = 2200$ kN, y la fuerza es a efectos prácticos independiente de la velocidad durante el sismo.

La capacidad de desplazamiento de los dispositivos debe ser considerada en el diseño, incluyendo los movimientos de origen reológico, térmico y sísmico. En nuestro caso, se dispusieron dispositivos capaces de absorber un desplazamiento máximo de ± 350 mm. Una vez conocido el movimiento total, es esencial controlar también el movimiento previsible en el tablero bajo las acciones de frenado del tren, ya que éste puede afectar seriamente a la resistencia y estabilidad de la vía. En nuestro caso, se obtuvo un desplazamiento máximo inferior a 8 mm, claramente admisibles cuando se disponen aparatos de dilatación de vía en ambos estribos. Este desplazamiento está drásticamente afectado por la capacidad total de desplazamiento que se prevea en los aparatos. Un incremento de ésta obviamente mejora la seguridad de los dispositivos durante el sismo, en especial bajo eventuales sacudidas sísmicas más potentes que la considerada en el diseño, pero empeora la respuesta frente a acciones horizontales de servicio. Por tanto, no es conveniente sobredimensionar la capacidad de desplazamiento de los dispositivos en aras de una pretendida seguridad adicional frente al sismo.

En dirección transversal la fuerza sísmica máxima transmitida a la cabeza de las pilas es de 4500 kN, que es un valor excesivo para los clásicos anclajes con pernos de los aparatos de apoyo. Por ello se diseñaron topes antisísmicos como los que se muestran en la figura 8.

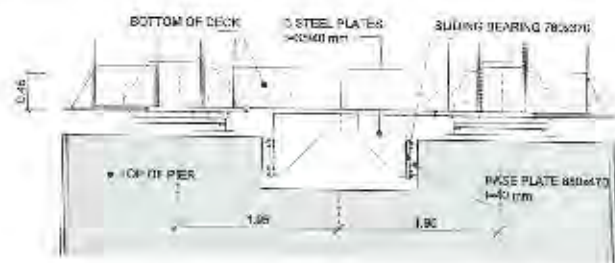


Figura 8. Topes antisísmicos en cabeza de pilas

Los anclajes convencionales de los apoyos se diseñaron para un ataque sísmico equivalente a un tercio del sismo de diseño especificado, considerando así éste a modo de sismo de servicio, cuya existencia no pusiera en ningún modo al tablero fuera de su capacidad de servicio tras el ataque sísmico.

5. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un diseño innovador para puentes ferroviarios de alta velocidad que, a partir de las clásicas soluciones bijácena, incorpora capacidad de respuesta propia de las secciones cajón. La doble acción mixta se generaliza a todo el tablero para dar respuesta a las exigencias deformacionales y dinámicas frente a cargas excéntricas propias de la alta velocidad ferroviaria. Las modificaciones introducidas respecto a las clásicas soluciones bijácena afectan a los diafragmas transversales, configuración de la losa superior, sistemas de rigidización y cierre inferior del circuito torsional. El diseño final es en nuestra opinión más simple que las soluciones clásicas existentes en la actualidad, y mantiene una excelente respuesta estructural y funcional del tablero.

Se han desarrollado detalles específicos para mejora de la resistencia a acciones localizadas de las almas durante el empuje. Las células metálicas exteriores y los costeros laterales de hormigón interiores que configuran la recepción de la carga localizada durante el empuje mejoran drásticamente la capacidad de las almas frente a disposiciones más convencionales. Sin embargo, estas disposiciones no están cubiertas en los códigos normativos actuales, y se ha requerido un análisis con elementos finitos lineales y no lineales, según se describe en detalle en otra ponencia de este congreso.

El diseño sísmico ha resultado también condicionante. Se han dispuesto en ambos estribos transmisores de impacto en dirección longitudinal con función de amortiguamiento durante el ataque sísmico, que constituyen una herramienta excelente para resolver la dualidad movimiento longitudinal/punto fijo derivada de los condicionantes del puente. La longitud del puente, la altura de las pilas y las condiciones de cimentación, y el emplazamiento en zona sísmica han hecho de esta solución no sólo la mejor, sino tal vez la única para resolver los condicionantes existentes.