

INGENIERÍA DE CONSTRUCCIÓN DEL VIADUCTO PARA ALTA VELOCIDAD SOBRE LA CARRETERA C-66.

Tomás POLO ORODEA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Bridge Technologies S.L.
Ingeniero
tomas.polo@btechno.es

Caterina RAMOS MORENO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Bridge Technologies S.L.
Ingeniero
caterina.ramos@btechno.es

Ángel C. APARICIO BENGOCHEA

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
ETSECCPB (UPC)
Catedrático
angel.carlos.aparicio@upc.edu

Gonzalo RAMOS SCHNEIDER

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
ETSECCPB (UPC)
Catedrático
gonzalo.ramos@upc.edu

RESUMEN

En este artículo se describe la ingeniería de rediseño y construcción llevada a cabo para el viaducto sobre la carretera C-66, entre Sant Julià de Ramis i Banyoles (Girona), de la Línea de Alta Velocidad Madrid – Zaragoza – Barcelona - Frontera francesa, en el tramo Sant Julià de Ramis – Cornellà del Terri.

Este viaducto se encuentra en una zona con actividad sísmica moderada, según especifica la NCSP-07 [1]. El esquema estático frente a cargas horizontales es el clásico: tablero simplemente apoyado en pilas y estribos con aparatos de apoyo tipo POT y con el punto fijo en uno de los estribos.

Se ha respetado de forma estricta la implantación de la estructura, con luces muy variables entre vanos, y con un salto máximo de 65m sobre la carretera C-66. Ha sido necesario introducir adaptaciones en todos los elementos estructurales para adaptarlos al procedimiento nuevo constructivo, con las correspondientes repercusiones arquitectónicas.

PALABRAS CLAVE: Cimbra aporticada, canto variable, zona sísmica, vano a vano.

1. INTRODUCCIÓN.

El viaducto sobre la carretera C-66 forma parte de la L.A.V. Madrid – Zaragoza – Barcelona - Frontera francesa, y está situado entre los términos de Sant Julià de Ramis y Banyoles, en la provincia de Girona.

La empresa adjudicataria de las obras pide a Bridge Technologies S.L. una serie de adaptaciones para las estructuras de su tramo y, para el cruce sobre la C-66 en particular, pide estudiar y desarrollar los siguientes cambios:

- Cambios de la sección transversal tipo del tablero encaminadas a simplificar su ejecución y a aligerarlo lo máximo posible

- Cambio de la geometría de las pilas para evitar los encofrados interiores y las traviesas superiores.
- Cambio del procedimiento constructivo para iniciar la construcción vano a vano desde el vano de mayor luz, sobre la carretera C-66.

Por todo lo mencionado anteriormente, se realiza un rediseño completo de la subestructura y superestructura que, a petición de la empresa COPROSA S.L., adjudicataria de las obras, y con aprobación de ADIF, realiza Bridge Technologies S.L.

El viaducto es continuo y tiene una longitud total de 287m con luces de $31 + 2 \times 44 + 55 + 65 + 48$ m. La luz de 65 metros, para el cruce sobre la C-66, hace que sea uno de los puentes de ferrocarril de sección cajón pretensado con vanos de mayor luz en el tramo entre Madrid y la Frontera francesa.

La altura del viaducto sobre el terreno tiene es muy variable, con una media de unos 10m, y con gálibo de 8.0m sobre la carretera C-66. La reducida altura sobre la C-66 queda, sin embargo, bien resulta arquitectónicamente gracias al canto variable y al cruce esviado.

A continuación se describe el esquema estático, el procedimiento constructivo y el diseño frente a sismo de este viaducto sobre la carretera C-66.

2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.

2.1. IMPLANTACIÓN.

El viaducto de la L.A.V. sirve para cruzar la carretera C-66, la carretera C-150a, varios caminos vecinales y distintos servicios soterrados, entre los que se encuentra un colector de aguas pluviales que, en caso de lluvia extrema, puede incluso llegar a inundar una pequeña vaguada entre las pilas P3 y P4. Ver figuras 1,2 y 3:



Figuras 1 y 2: Vista general de la estructura con el cruce sobre los distintos viales.



Figura 3: Vista desde Pila 4 del colector de aguas pluviales situado entre pilas del viaducto sobre la C-66.

El viaducto está situado en una alineación curva en planta de 6000m de radio y, en alzado, los primeros 40 m en un acuerdo vertical cóncavo y el resto en un tramo de pendiente constante. Ver figura 4.



Figura 4: Vista general de la estructura en el cruce C-66.

2.2. ESQUEMA ESTÁTICO.

El puente es una viga continua en hormigón pretensado de 6 vanos, de canto constante de valor 3.14m en eje (3.0m en bordes) exceptuando en las zonas de apoyo en pilas P4 y P5 (pilas adyacentes al vano de 65m), donde el canto se recrece hasta los 5.14m. La sección transversal es un cajón, apta para una plataforma de 14.0m de

ancho. El tablero está simplemente apoyado en pilas y estribos, con doble aparato de apoyo en cada eje de apoyo.

Frente a acciones horizontales trasversales (fuerza centrífuga, viento y sismo transversal), los aparatos de apoyo de neopreno confinado tipo POT pasan las acciones del tablero a pilas o estribos. Para ello, en el caso de pilas uno de los dos neoprenos es guiado y, en el caso de estribos, hay aparatos de apoyo laterales que recogen la reacción transversal. Frente a acciones horizontales longitudinales el tablero se fija al estribo E1.

La situación accidental de sismo ha resultado determinante en el diseño de muchos de los elementos de la infraestructura, como es habitual en puentes de ferrocarril debido a la rigidez requerida en servicio y a las elevadas cargas permanentes. En este caso, además, las alturas de pilas son reducidas (en especial la pila 5, la que está más alejada del punto fijo), lo que amplifica la acción del sismo sobre la estructura.

El viaducto está cimentado sobre un sustrato rocoso margoso que aflora bajo una capa de rellenos antrópicos de 1.5m de espesor. Este hecho determina el tipo de cimentaciones a colocar en pilas y estribos que se detallan a continuación.

2.3. ESTRIBOS.

El estribo E1 (más cercano a Barcelona) tiene cimentación directa puesto que el terreno presente (sustrato rocoso margoso) permitía tensiones medias de hasta 0.5 MPa.

Este estribo E1 es el punto fijo del tablero frente a acciones horizontales longitudinales, por lo que soporta reacciones de servicio de hasta ± 17.000 kN (debidas a frenado + arranque, interacción vía-estructura y rozamiento en teflones) y reacciones en situación accidental de sismo de hasta ± 33.600 kN. Para poder garantizar la seguridad al deslizamiento frente a las fuerzas horizontales de servicio y sismo se realiza un lastrado con tierras del estribo y un rastrillo empotrado en las margas.

La conexión del tablero al estribo se hace mediante pretensado inspeccionable y sustituible, protegido por un galvanizado en caliente de los cordones, enfundado individual en vainas de PAD e inyección con grasa petrolera de elevado punto de fusión en una vaina común.

El estribo libre E2 es convencional, se debe cimentar en una zona donde el sustrato margoso está muy alterado, por lo que se recurre a cimentación profunda con 6 pilotes $\phi 1500$ de 22m de longitud.

2.4. PILAS.

Las pilas son, a petición de la empresa constructora COPROSA S.A., de sección transversal en doble "T" y macizas.

Entre las pilas P1 y P4, el sustrato margoso puede soportar tensiones medias de valor alto, por lo que sus cimentaciones son directas. En cambio en la zona de la pila 5 el

sustrato margoso está muy alterado, por lo que se debe recurrir a cimentación con pilotes.

Las pilas P4 y P5, correspondientes a los apoyos del tablero con canto variable, tienen dimensiones variables para ajustarse a la geometría de la tabla inferior del tablero. La pila 4 tiene una altura de aproximadamente 9.5m y su cimentación (esviada respecto al eje del tablero por limitaciones de geometría de la C-66) es directa sobre el terreno. La pila 5 tiene una altura sensiblemente menor, 4.8m, hecho que provoca su mayor rigidez (por lo que debe soportar mayores esfuerzos horizontales). Su cimentación es profunda mediante 9 pilotes $\phi 1500$ (cimentación que también está en posición esviada por los mismos motivos expuestos para la pila P4).

Para la ejecución de las cimentaciones de estas dos pilas se tuvo que realizar contenciones provisionales de la plataforma de la carretera C-66 que permitieron alcanzar la cota de máxima excavación.

Las otras tres pilas (P1, P2 y P3) presentan dimensiones constantes en todo su alzado y sus alturas varían entre 9.5m y 12m. Estas tres pilas tienen cimentación directa sobre el terreno.

Para las acciones sísmicas, la curvatura última de las pilas permite considerar un coeficiente de comportamiento $q > 1.0$ para el sismo transversal.

2.5. TABLERO.

El tablero presenta una sección transversal tipo cajón de canto 3.14m (3.0m en los bordes) y 5m de ancho de tabla inferior. El canto se recrece hasta los 5.14m en las secciones de pila adyacentes al vano de 65m. Las zonas con canto variable abarcan únicamente los 10m a lado y lado de las 2 pilas (P4 y P5), lo que supone sólo un 15% de la luz.

La variación de canto se hace manteniendo la inclinación de las almas, por lo que el forjado inferior pasa a ser más estrecho que el de la sección tipo. Esta reducción en la anchura se compensa con un regresamiento del forjado inferior que, sin generar esfuerzos adicionales (por estar muy cerca de la sección de apoyo) y con un consumo adicional de hormigón casi despreciable, permite ductilizar mucho el fallo de la sección, con las ventajas en ELU que ello implica.

Los tramos de canto variable no se han podido extender más allá de los 10.0m contados desde el eje de apoyo en pila ya que, para su ejecución, la cimbra invadía el gálibo de la carretera, que se ha mantenido abierta al tráfico en todas las fases de obra: Ver figura 5.



Figura 5: Descimbrado vano sobre carretera C-66.

El pretensado del tablero consta de un total de 8 familias.

- La familia 1 consta de 12 tendones de 31 cordones (ASTM A416-85 grado 270) que pretensan el vano de 65m y los 10m adyacentes a lado y lado de este vano (zonas con canto variable). El tesado de esta familia se realiza desde ambos extremos, dónde hay acopladores fijos para continuar con la ejecución vano a vano.
- Las familias 2 a 5 son las que pretensan los vanos 6, 4, 3 y 2-1 (la familia 5 sirve para tesar dos vanos juntos dada su corta longitud). Estas familias constan de 12 tendones de 31 cordones (ASTM A416-85 grado 270) y se les da continuidad con acopladores fijos.
- Las familias 6, 7 y 8 son refuerzos a positivos de los vanos 5, 4 y 6 respectivamente, y constan de 12 tendones de 19 cordones, 4 tendones de 19 cordones y 2 tendones de 19 cordones (ASTM A416-85 grado 270). Estas familias tienen un trazado recto en planta y están ancladas en el interior de la sección transversal en traviesas recrecidas sobre la tabla inferior.

Los tendones de pretensado se tesan al 75% de la carga de rotura y, únicamente en la familia 5 debe limitarse la fuerza de tesado al 65% de la carga de rotura para evitar tirar de los acopladores fijos.

Dadas las dimensiones del tablero es necesario diseñar traviesas de apoyo en pilas que permitan alojar aparatos de apoyo aptos para recorridos elevados, por lo que sus dimensiones son generosas. Además, las traviesas son las encargadas de incorporar las fuerzas transversales del tablero a las pilas (no solo las de servicio de viento y fuerza centrífuga, sino también las elevadas fuerzas transversales de sismo). Ver figura 7.

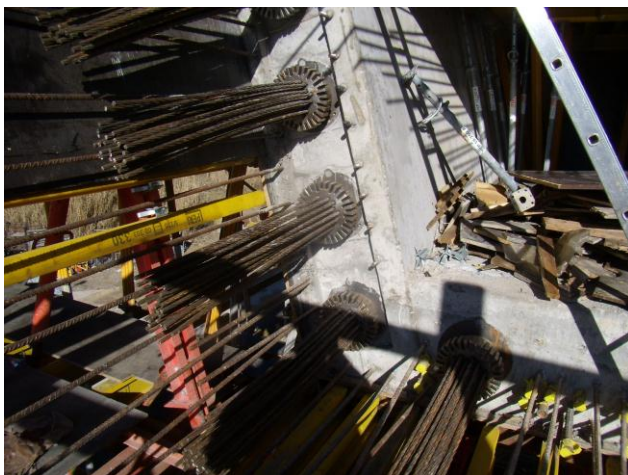


Figura 6: Vista de los acopladores para tendones de la siguiente fase constructiva.

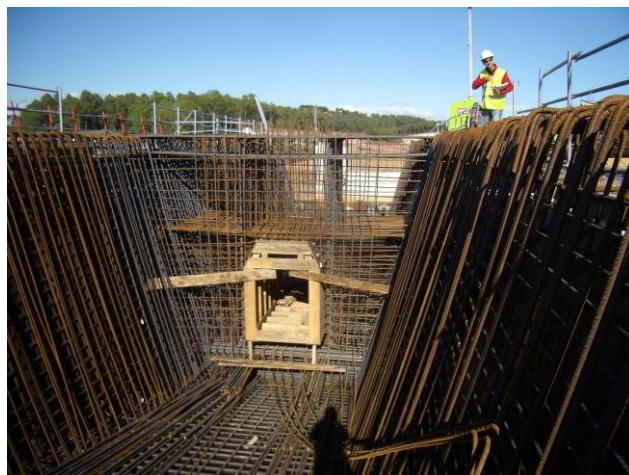


Figura 7: Vista del armado de una traviesa de canto variable.

3. PROCEDIMIENTO CONSTRUCTIVO.

3.1. PILAS Y ESTRIBOS.

El procedimiento constructivo de estribos es convencional y no presenta singularidades dignas de mención.

El procedimiento constructivo de las cimentaciones de las pilas P4 y P5 requirió la construcción de unos muros de micropilotes para llegar hasta la cota de máxima excavación. Estos muros de micropilotes impidieron que se desdcalzara la calzada de la C-66. El resto de cimentaciones se ejecutó sin ningún tipo de condicionante por lo que fueron convencionales.

Todos los alzados se hormigonaron con encofrados convencionales, puesto que las alturas de pilas no requerían soluciones más técnicas.

3.2. TABLERO

El procedimiento constructivo del tablero previsto en el proyecto adjudicado contemplaba fases de ejecución similares a las finalmente realizadas pero anclando en todas las fases a la pila más cercana al estribo fijo.

Este proceso se optimizó, utilizando un único anclaje provisional en todas las fases constructivas, entre la primera fase de ejecución del tablero y la pila P5. Ver figura 8. La fijación se hizo con armaduras pasivas. Se destaca la necesidad de evaluar con precisión las deformaciones reológicas de construcción ya que, al cambiar el esquema estático para la situación de servicio, los movimientos en apoyos y juntas son distintos que en el caso de construcción convencional.

En cuanto a método de cimbrado cabe diferenciar el método usado para el vano 5 (de 65m) y para el resto de vanos. En el vano 5 se usó una cimbra aporticada y en el resto de vanos cimbra convencional. Ver figuras 9, 10 y 11.



Figura 8: Vista del punto fijo provisional.



Figura 9: Vista de las torres de la cimbra porticada.



Figura 10: Vista del montaje de la cimbra aporticada.



Figura 11: Vista de la cimbra cuajada del vano 6.

Las principales características del procedimiento constructivo del tablero son:

- La primera fase consistió en la ejecución del vano más largo (65m) más los 10m adyacentes en cada lado de dicho vano (zonas con canto variable). La ejecución de dicha fase se realizó con cimbra pórtico situando torres cerca de las dos pilas adyacentes a este vano y torres en el centro del mismo (estas torres quedaron situadas entre los carriles de los dos sentidos de la C-66.

Para situar estas torres, y debido a las cargas excesivas transmitidas al terreno, se tuvo que realizar zapatas provisionales donde apoyarlas.

La incidencia sobre la circulación en la C-66 fue mínima, siendo afectada únicamente en el momento de colocar las torres entre los sentidos de la misma.

Después del hormigonado y adquisición de resistencia suficiente del hormigón, se realizó el tesado de las dos familias de tendones que se hallan en este vano

- El resto de fases consistió en la ejecución del tablero vano a vano con cimbra cuajada. Después del vano 5 se construyó el 6 (apoyado en estribo E2) y, después de éste, se pasó al vano 4 y así sucesivamente hasta llegar al vano 1.

Una vez alcanzado el estribo E1, punto fijo definitivo de la estructura, se puso en tensión el pretensado de cosido tablero-estribo y se eliminó el punto fijo provisional.

4. CÁLCULO.

Dado que se trata de una estructura evolutiva en cuanto al esquema estático, ha sido necesario llevar a cabo un análisis detallado de la redistribución estructural por fluencia de los esfuerzos de peso propio y pretensado. Este análisis se ha podido llevar a cabo con un programa comercial en el que se han incorporado las curvas que definen la evolución de retracción y fluencia según la vigente instrucción de hormigón estructural EHE-08 [2].

Como resultados principales de este análisis se destaca:

- Se puede estudiar en detalle el estado tensional y los esfuerzos de las secciones críticas para las combinaciones cuasipermanente, frecuente y característica, según la vigente instrucción de acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril IAPF-08 [3], lo que permite un cálculo bastante ajustado de los recorridos de tensiones bajo cargas de servicio para la verificación estructural de la fatiga.
- Se puede evaluar con precisión la evolución por fluencia de los esfuerzos de peso propio y pretensado, lo que permite ajustar al máximo la verificación en ELU y el dimensionamiento del pretensado.

Para el diseño frente a la acción accidental de sismo se ha realizado un análisis espectral por superposición modal. Para garantizar que la masa movilizada en el cálculo era igual, o superior, al 90% de la masa ensamblada, ha sido necesario calcular los 200 primeros modos de vibración. Las combinaciones direccionales se han tomado según se establece en la vigente Norma de Construcción Sismoresistente: Puentes NCSP-07 [1].

5. CONCLUSIONES.

Se desarrolla la ingeniería de construcción del viaducto de la L.A.V. Madrid-Barcelona-Frontera francesa sobre la carretera C-66, con el esquema estático y el procedimiento constructivo adaptados a las necesidades de la propiedad y la empresa constructora. Al tratarse cambios de entidad, deben rediseñarse todos los elementos de subestructura y el tablero.

El procedimiento constructivo es vano a vano, pero con comienzo en un vano intermedio, lo que obliga a una fijación provisional del tablero en la pila P5 y supone un cambio de esquema estático en sentido longitudinal, que obliga a calcular con precisión los movimientos reológicos del tablero para el diseño de los aparatos de apoyo.

La afectación a la circulación en la C-66 durante todas las fases de obra fue mínima.

6. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] MINISTERIO DE FOMENTO: Norma de construcción sismoresistente: Puentes (NCSP-07), 2008
- [2] MINISTERIO DE FOMENTO: Instrucción de hormigón estructural (EHE-08), 2008
- [3] MINISTERIO DE FOMENTO: Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de ferrocarril. (IAPF), 2008

7. RELACIÓN DE PARTICIPANTES.

Propiedad: ADIF

Ingeniería estructural y asistencia técnica a obra: Tomás Polo Orodea y Caterina Ramos Moreno. Bridges Technologies S.L.

Asesoría estructural: Ángel C. Aparicio Bengoechea y Gonzalo Ramos Schneider. ETSECCPB (UPC)

Empresa constructora: COPROSA.

Jefe infraestructura: Ignacio Castro Pastor.

Director de Obra: Raúl Nestares García.

Jefe de Obra: Patricio Díaz Vega.

Jefe producción estructuras: Guillermo Borda.