

PASO DE LA LAV BARCELONA-FRANCIA SOBRE LA AP7 EN RIUDELLOTS DE LA SELVA (GERONA)

José ROMO MARTÍN

Ingeniero de Caminos, C.y P. y Lic. Historia
FHECOR Ingenieros Consultores
Vicepresidente y Director Técnico
jrm@fhecor.es

Ricardo LLAGO ACERO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
ACCIONA INFRAESTRUCTURAS
Director del Departamento P. Estructuras Metálicas
ricardo.llago.acero@acciona.es

Javier MILIAN MATEOS

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

Javier TORRICO LIZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
FHECOR Ingenieros Consultores
Jefe del Departamento de Puentes
jtl@fhecor.es

Juan José JORQUERA LUCERGA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

RESUMEN

La línea de Alta Velocidad entre Barcelona y la frontera francesa cruza la AP-7 en Riudellots de la Selva (Gerona). El paso se realiza con una estructura de dos vanos de 53,00 m de luz y un fuerte esviaje (34°). La fuerte visibilidad de la estructura desde la Autopista, la importancia de la luz a salvar y los condicionantes deformacionales impuestos por el ferrocarril, han conducido a una solución en celosía continua de canto variable. Este tipo estructural concilia las condiciones de rigidez con una sensación de ligereza, conseguida mediante el empleo de dos vigas longitudinales laterales en celosía, de canto parabólico. Se trata de un diseño que pretende conciliar la necesaria robustez de un puente de ferrocarril, con unas características formales acordes con la trascendencia del cruce sobre una autopista por la que circulan diariamente miles de personas.

PALABRAS CLAVE: Celosía, dinámica, esviaje, alta velocidad, sismo, amortiguador, estética.

1. Situación y características del paso

La línea de alta velocidad entre Barcelona y la frontera francesa circula por el mismo corredor que la autopista del Mediterráneo AP-7. Este hecho ha llevado a la construcción de varias estructuras con una luz importante a causa del esviaje con el que se producen los cruces entre ambas vías de comunicación. Una de estas obras es el paso de Riudellots de la Selva, situado en las inmediaciones del aeropuerto de Gerona (figura 1).



Figura 1. Vista del paso

El cruce se produce con un esviaje próximo a los 34° , siendo la longitud total a salvar de 106 m. La autopista tiene en la zona del cruce una mediana ancha que ha permitido disponer un apoyo intermedio, resultando así una estructura de dos vanos de 53 m de luz (figura 2).

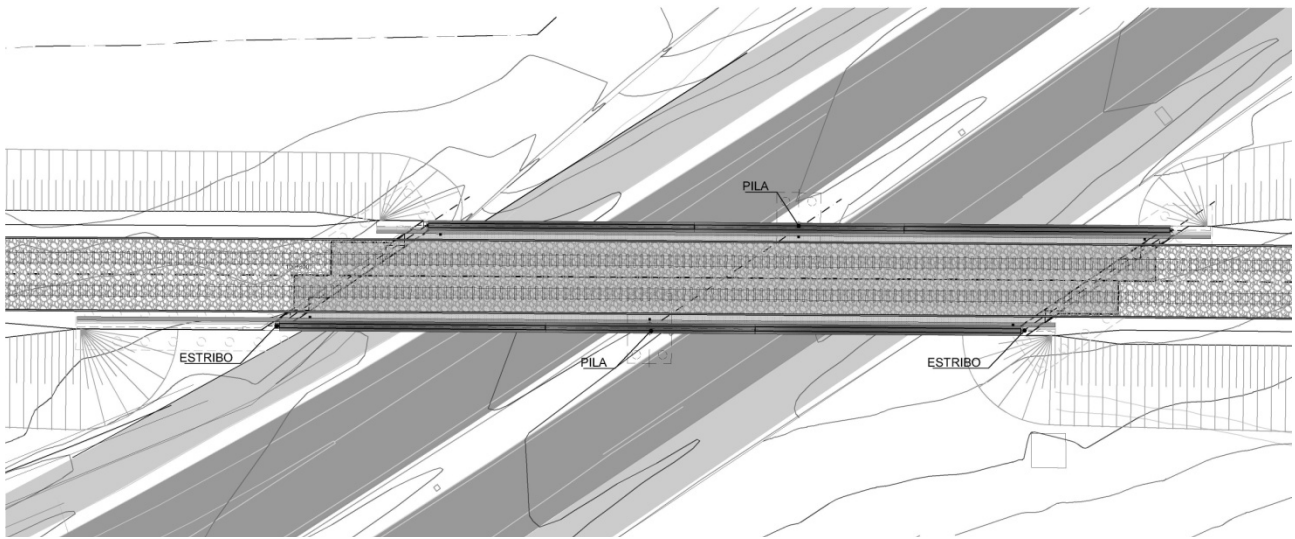


Figura 2. Planta del paso

2. La elección del tipo estructural: Génesis del diseño.

La gran visibilidad de la obra, la longitud de los vanos a salvar y las fuertes limitaciones deformacionales impuestas por el ferrocarril de alta velocidad, han llevado a plantear una solución tipo celosía de canto variable, que intenta conciliar la rigidez requerida para garantizar la seguridad y confort del tráfico ferroviario, con un pretendido aligeramiento de la masa visual de la estructura. Las celosías metálicas están íntimamente vinculadas al ferrocarril. Este tipo estructural ha sido empleada en los puentes ferroviarios desde el siglo XIX por su eficacia estructural [1], [2]. En la actualidad las celosías siguen siendo una solución económica para resolver estructuras ferroviarias de luces medias y altas. Los modernos procesos de corte y soldeo de estructuras metálicas permiten abordar el diseño de los distintos elementos estructurales y su ensamblaje con una gran libertad de expresión formal, al liberarse el proyectista de las restricciones propias de los sistemas formados con perfiles laminados convencionales (figura 3).

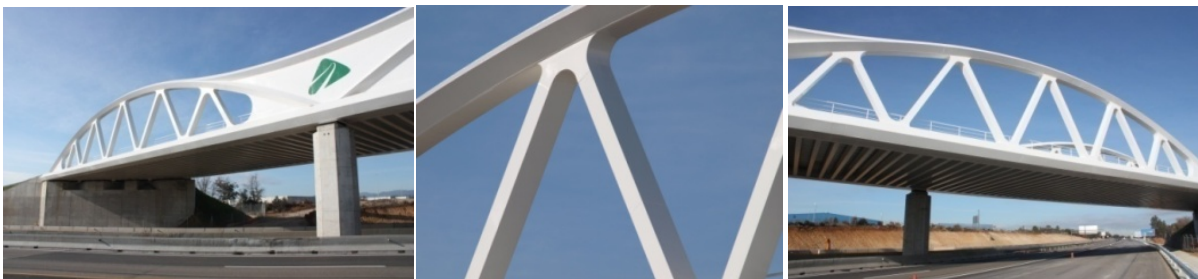


Figura 3. Vistas del puente

El paso de Riudellots es un ejemplo de aplicación no canónica de la celosía tipo Warren. En esta obra no se ha empleado una distribución tradicional de cantos: ley de canto constante o ley de cantos variables con máximo en el apoyo central. El trazado elegido para las celosías presenta una distribución de cantos de tipo parabólico con valor máximo en las secciones de centros de vano y mínimo en la sección de apoyo intermedio dando lugar a un alzado que se consideró más atractivo (figura 4) [3].

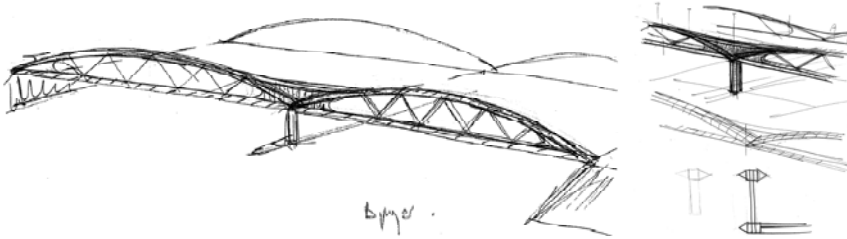


Figura 4. Esquemas iniciales

3. Esquema estático

Las celosías presentan por tanto dos vanos de 53,00 m de luz, con un cordón superior de directriz parabólica, con una flecha máxima de 7,60 m en el centro de vano, lo que supone una relación canto/luz = 1/7,00, y una flecha mínima en la sección de apoyo intermedio de valor 4,30 m, siendo por tanto la relación canto/luz en apoyos de 1/12,30. Las celosías se completan con un sistema de diagonales metálicas de sección rectangular (figura 5).

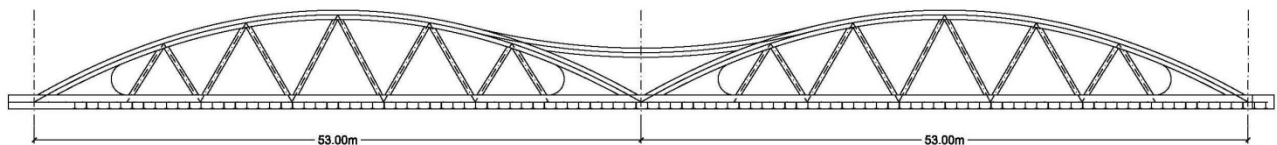


Figura 5. Alzado de las celosías

Con el fin de mantener una relación no excesivamente desproporcionada entre el momento solicitante en las secciones de centro de vano y en la sección de apoyo intermedio, el sistema de diagonales típico del sistema Warren se maciza en esta última zona. Se crea así una sección de alma llena de inercia importante, que permite compensar la pérdida de rigidez que se produce como consecuencia del menor canto de la celosía en este punto. Además en esta zona de apoyo, los cordones superiores se bifurcan en dos elementos; uno de ellos constituye el cordón superior traccionado de la celosía, que en esta zona presenta una curvatura inversa a la existente en la zona de centro de vano, mientras que el segundo elemento presenta un trazado descendente. Este elemento conecta el cordón superior con el punto de intersección entre el cordón inferior y el eje de apoyo en la pila intermedia, contribuyendo a la inyección directa de las compresiones hacia el apoyo central.

A pesar del macizado de las celosías en la zona de apoyo central, el momento equivalente en esa zona es sólo el 30% del correspondiente a un puente continuo de inercia constante.

Entre las dos celosías, situadas en los extremos laterales de la sección del paso, se sitúa la plataforma ferroviaria. El sistema resistente transversal que transmite las cargas a las dos celosías laterales está formado por un sistema de vigas metálicas HEB-600 separadas 1,00 m entre sí y una losa de 0,60 m de espesor situada sobre ellas (figura 6).

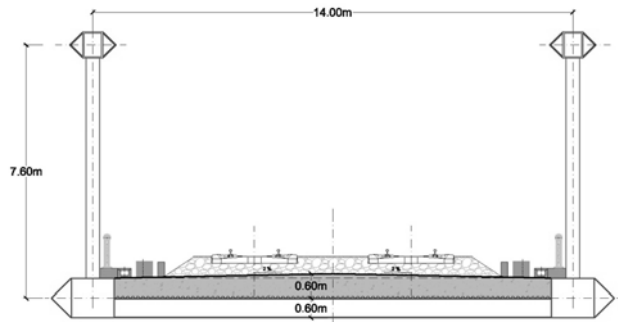


Figura 6. Sección transversal del paso

Las vigas metálicas se han trazado perpendiculares a los planos de las celosías, formando un sistema continuo de estribo a estribo, que proporciona una vista inferior muy limpia (figura 7), y que es similar al empleado en el puente atirantado sobre el By-pass de Valencia [4].



Figura 7. Vista inferior del paso

Uno de los puntos críticos en el diseño de un puente para una línea de ferrocarril de alta velocidad es el comportamiento dinámico al paso de las sobrecargas. En general es bien conocida la respuesta de los tableros con una configuración longitudinal unidimensional dinámica, como pueden ser las secciones tipo cajón o losa. Sin embargo, resulta mucho más compleja la respuesta dinámica de estructuras en las que existe una combinación de elementos resistentes longitudinales y transversales. En estos casos, puede ocurrir que la flexibilidad transversal sea más limitativa que la longitudinal desde el punto de vista dinámico [5].

En el presente caso, este efecto se ve además modificado por el esviaje existente que supone un cierto desfase entre la respuesta de las dos celosías longitudinales y la existencia del apoyo en las vigas transversales de estribos que alteran el comportamiento de la estructura.

Para estudiar este problema se ha empleado un modelo de elementos finitos tridimensional para representar la estructura en el que se han introducido las cargas ferroviarias de acuerdo con la IAPF. Como resultado de los análisis realizados se decidió aumentar el canto de la losa entre vigas transversales hasta 0,60 m de espesor, para aumentar la masa y la rigidez transversal de la estructura evitando así el fenómeno de resonancia o un aumento de la amplificación dinámica como consecuencia del acoplamiento entre la acción repetida de las cargas y la frecuencia de vibración transversal de la estructura.

En la figura 8 se muestran las formas modales asociadas a los modos principales de vibración de la estructura.

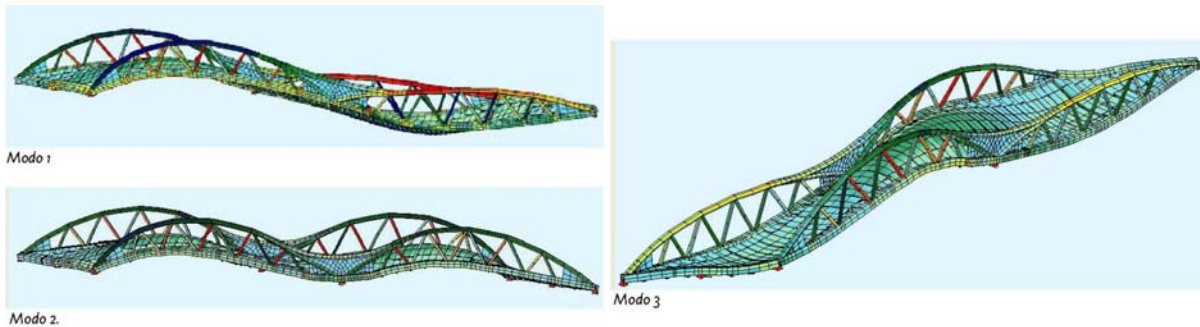


Figura 8. Modos principales de vibración de la estructura

El diseño del puente ha buscado atenuar el efecto del esviaje del tablero sobre el tráfico ferroviario. Para ello, se han dispuesto unos vanos cortos, en prolongación de los trazados de las vías, de forma que el encuentro del final del tablero con el murete del estribo se realiza de forma recta, es decir, perpendicular al eje de la vía. De esta forma el paso a efectos del tráfico ferroviario es recto. La configuración geométrica de estos vanos de aproximación es la indicada en las figuras 9 y 18. Los tableros en esta zona están formados por vigas HEB600 de acero, con una secuencia de disposición semejante a la del vano principal. Cada uno de estos vanos se apoya en la gran viga transversal de remate del vano principal y en una serie de apoyos de neopreno dispuestos en los puntos finales de los largueros.

Por ser una estructura relativamente corta, no ha sido necesario disponer aparato de dilatación de vía en la estructura.

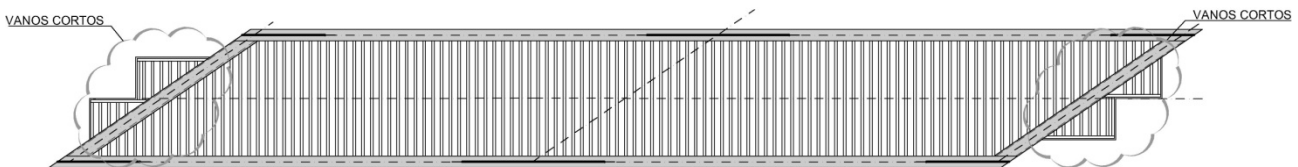


Figura 9. Planta del tablero con vanos cortos ortogonales al trazado.

Otro de los aspectos especiales propios de un puente para en una línea de alta velocidad ferroviaria es la importancia de las fuerzas horizontales que ha de resistir la infraestructura. En el presente caso, además de las acciones de frenado, la estructura se ha calculado frente a la acción sísmica al encontrarse en una zona con sismicidad moderada. La aceleración de cálculo correspondiente es de $0,104g$, con un valor máximo de aceleración en la meseta del espectro de respuesta de $0,285g$. El sistema antisísmico previsto incluye el empleo de tres amortiguadores por estribo, dos de ellos actuando según la dirección longitudinal del tablero y un tercero en la dirección transversal (figura 10).

Las celosías se apoyan tanto en pilas como en estribos mediante aparatos de neopreno teflón, que además de transmitir las cargas verticales correspondientes, sirven como elemento con un comportamiento elástico que permite el necesario auto-recentrado del puente en la situación post-sísmica.

Los amortiguadores longitudinales se han diseñado para una carga horizontal superior en al menos un 20% a la carga de frenado. En el presente caso la fuerza total de frenado y arranque es de 3760 kN y el sistema de amortiguadores longitudinales está formado por cuatro aparatos de 1250 kN, es

decir con una capacidad total de 5000 kN aproximadamente. De esta forma el punto fijo para la situación de servicio sin frenado está en la pila, ya que para cargas lentas los amortiguadores no coaccionan el movimiento. Durante la acción del frenado, los amortiguadores se bloquean impidiendo el movimiento longitudinal del tablero, transmitiéndose la fuerza a los estribos. Este es el criterio habitualmente empleado en el diseño del sistema de amortiguación de puentes de ferrocarril situados en zona sísmica [6].

El bloqueo producido por los amortiguadores no es total, debido a la existencia de una rigidez muy alta pero no infinita antes de que los amortiguadores alcancen un comportamiento pseudo-plástico. En el presente caso, la rigidez inicial del conjunto de los cuatro amortiguadores es de 830 MN/m, lo que supone un movimiento máximo de 4,5 mm, compatible con los requisitos ferroviarios.

Durante la acción del sismo último, los amortiguadores entran en régimen histerético disipando una gran parte de la energía sísmica.

En esta situación, el conjunto de los amortiguadores longitudinales transmite una carga máxima nominal de $4 \times 1250 = 5000$ kN, lo que supone el 9,7% de la masa del tablero (5260 t). Es decir, se consigue una reducción de la fuerza sísmica al 65% del valor máximo asociado al valor de aceleración de la meseta del espectro.

En la dirección transversal se ha dispuesto un amortiguador por estribo de 1250 kN que bloquea el tablero transversalmente para la situación de servicio, entrando sólo en un ciclo histerético bajo la acción del sismo último.

Cada pareja de amortiguadores longitudinales, junto con el amortiguador transversal de cada estribo, contribuye al control del giro de eje vertical que se produce en los puentes esviados durante la acción del sismo.

El sistema de amortiguadores longitudinales y transversales permite la disipación de energía suficiente para el sismo de servicio, con un nivel de movimientos mínimos que garantiza la integridad del conjunto infraestructura-vía.

4. Descripción de la estructura

Los estribos son cerrados de hormigón armado, cimentados mediante pilotes de 1,25 m de diámetro y 12,00 m de longitud típica. Los estribos presentan un importante ancho en cabeza, con el fin de alojar tanto al sistema de amortiguadores como a los vanos cortos que hacen que la transición entre los accesos y la estructura se realice de forma recta, es decir, sin esviaje (figura 10).

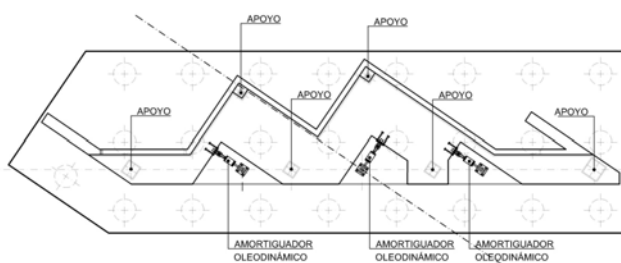


Figura 10. Planta de uno de los estribos

Los estribos presentan en alzado una serie de cajeados para permitir la colocación y en su caso posible sustitución de los apoyos y los amortiguadores antisísmicos (figura 11).



Figura 11. Vista del alzado de un estribo



Figura 12. Vista de una de las pilas

La estructura tiene un apoyo intermedio en el eje de la mediana de la autopista, que se materializa mediante dos fustes de hormigón de sección octogonal (figura 12). Las pilas se cimentan mediante 6 pilotes de 1,50 m de diámetro y 30,00 m de profundidad.

Los pilotes y el encepado correspondientes a cada fuste se han construido según la dirección de la autopista, con el fin de minimizar la interferencia con la misma.

Como se ha indicado anteriormente, el tablero está constituido por un sistema de dos celosías laterales (figura 13), que configuran el sistema estructural longitudinal, y un sistema de vigas transversales y una losa construida sobre ellas que proporciona la necesaria rigidez transversal a la estructura.



Figura 13. Vista de una de las celosías longitudinales

El cordón inferior de la celosía está sometido a un esfuerzo axial debido al trabajo longitudinal y a los esfuerzos locales de flexión introducidos por las vigas transversales que recogen directamente la carga de la plataforma ferroviaria, ya que éstas no apoyan directamente en los nudos de las celosías.

Como se ha indicado anteriormente, con el fin de reducir la “masa visual” del cordón inferior, que es por otra parte el elemento más visible desde la autopista, se ha empleado una especie de “carenado” lateral que divide en dos el cordón. Este carenado ha servido además para el guiado longitudinal del puente durante las fases de empuje. El cordón inferior tiene unos espesores típicos de 30 a 40 mm en las alas superior e inferior, y de 30 a 35 mm en las almas verticales. El cordón inferior tiene un canto de 1200 mm, lo que supone una relación 1/44 respecto a la luz del vano (figura 14).

El cordón superior tiene forma rectangular a la que se añaden también dos elementos triangulares laterales que contribuyen a dividir visualmente el canto aparente de estos elementos. Además de este efecto puramente formal, los dos carenados laterales del cordón superior aumentan la inercia transversal proporcionando una mayor estabilidad a la celosía frente al pandeo lateral (figura 14) El cordón superior tiene un canto de 800 mm, lo que supone una relación 1/67,5 respecto a la luz del vano, está formado por chapas de 40 mm de espesor típico en las alas superior e inferior y de 30 y

40 mm en las almas verticales. Los carenados laterales del cordón superior están constituidos por chapas de 25 mm de espesor (figura 14).

Las diagonales son elementos también metálicos de sección rectangular, de 400 mm de ancho y 600 mm de canto (figura 14). Las chapas que forman las diagonales penetran hasta el interior de la sección de los cordones, materializándose de esta forma el empotramiento de las diagonales en los cordones superior e inferior.

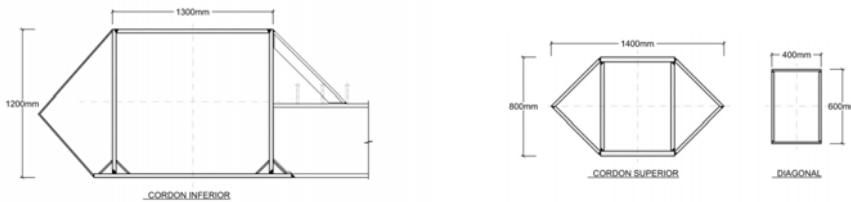


Figura 14. Sección tipo del cordón inferior, superior y diagonales

Las caras de las celosías paralelas con las almas verticales de los cordones se han redondeado para permitir un flujo suave de esfuerzos (figura 15).

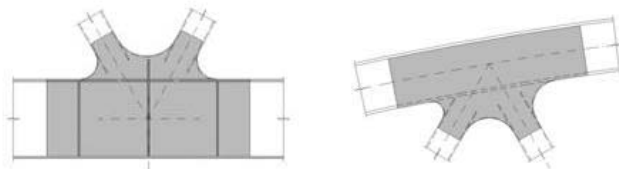


Figura 15. Detalle de nudos

Uno de los puntos más importantes, tanto desde el punto de vista formal como del resistente y del constructivo, es la zona de apoyos en las pilas intermedias.

En esta zona, se reduce el canto y al mismo tiempo se maciza la celosía, sustituyéndose las diagonales correspondientes por una chapa ciega. El cordón superior de la celosía se aproxima con suavidad al cordón inferior, presentando una bifurcación que marca en cierta forma el desacoplamiento entre la flexión, que es resistida por los cordones superiores e inferiores, y el cortante, que es transmitido como compresión a través de los elementos oblicuos que se han bifurcado del cordón superior (figura 16).



Figura 16. Zona de apoyo en pila

Las zonas de bifurcación entre los cordones longitudinales superiores y las “bielas” hacia el apoyo, son puntos críticos que se han materializado con la ayuda de cilindros intermedios macizos de chapa que han permitido la realización de las soldaduras correspondientes.

Como se ha indicado anteriormente, el tablero está constituido por un sistema de vigas transversales HEB-600 separadas 1,00 m entre sí. Entre estas vigas se ha colocado una chapa grecada que sirve de encofrado a una losa de hormigón armado de 0,60 m de espesor.

Las vigas transversales se empotran parcialmente en los cordones inferiores de las celosías, con el fin de garantizar el efecto marco-transversal necesario para evitar el pandeo lateral de la celosía (figura 17).

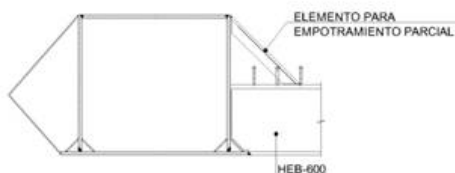


Figura 17. Detalle del empotramiento parcial de las vigas transversales en la viga longitudinal

Las vigas transversales son perpendiculares a los planos de las celosías, para reducir la luz transversal y al mismo tiempo para simplificar las vistas inferiores del puente. De esta forma, no hay una riostra o viga transversal que conecte directamente los cordones inferiores en las secciones correspondientes a las pilas intermedias.

En los estribos se ha planteado una viga de cierre paralela a la autopista. Esta viga tiene una dimensión considerable (25,55 m) y una carga muy importante. Para poder mantener el canto del tablero en esta zona, se han dispuesto dos apoyos intermedios, de forma que la viga tiene tres vanos de 8,87 m, 7,80 m y 8,87 m de luz.

Esta viga ha necesitado un canto metálico de 0,90 m. Sobre ella, se ha dado continuidad parcial a la losa superior de hormigón, que en esta zona se rebaja a 0,30 m de espesor para mantener el canto total del tablero.

En prolongación del vano principal del tablero se ha colocado un vano de aproximación en cada estribo, que permite la materialización recta de la junta entre tablero e infraestructura. Estos vanos están constituidos por perfiles laminados HEB-600 sobre los que se hormigona la losa de hormigón armado de 0,60 m de espesor.

Esta zona presenta sus propios apoyos de neopreno con la disposición indicada en la figura 18.

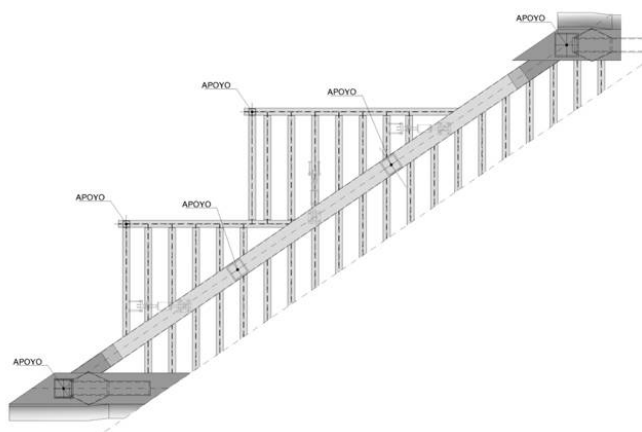


Figura 18. Configuración de los vanos de aproximación

5. Construcción

El paso ha sido construido por Acciona Infraestructuras. La estructura metálica se ha fabricado en los Talleres Torrejón.

El tablero se ha colocado en su posición definitiva mediante la técnica de empuje, partiendo desde una de las márgenes de la autopista. Todos los elementos auxiliares necesarios para el empuje han sido diseñados por Acciona.

El proceso constructivo comenzó por la ejecución de las cimentaciones de pilas y estribos, y la construcción de los alzados de estos elementos.

Paralelamente comenzó la fabricación del tablero en taller, habiéndose dividido los cordones superiores de las celosías en 7 tramos, y el cordón inferior en 5 piezas para facilitar su transporte e instalación en obra (figura 19).



Figura 19. Ensamblaje de las celosías en obra

El tablero metálico, de 106 m de longitud, se ensambló en el parque de empuje dispuesto tras el estribo 1, en una posición ligeramente retrasada respecto al eje de apoyos del mismo estribo, siendo 108,25 m el movimiento total del tablero (figura 20).



Figura 20. Vista de la estructura preparada para el empuje

El proceso de empuje presentó las siguientes fases:

- Ensamblaje de la estructura metálica en el parque de empuje.
- Montaje de chapas grecadas entre vigas transversales y posterior ferrallado de la losa.
- Hormigonado de la parte trasera de la losa que sirve como contrapeso (150 m² aproximadamente).
- Avance del tablero en una longitud de 55,25 metros hasta llegar a la pila.
- Gateo para paso por pila.
- Avance del tablero en una longitud de 53,00 metros hasta llegar al estribo 2.
- Transferencia de carga de los apoyos provisionales a los definitivos.

El empuje se realizó partiendo de la estructura apoyada en 6 puntos en el parque de fabricación (ver figura 21).

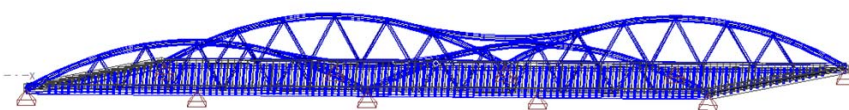


Figura 21. Puntos de apoyo de la estructura en la situación inicial del empuje.

El movimiento se conseguía mediante la tracción de una barra por celosía, que estaban conectadas en sus extremos a la parte trasera del tablero y por otra al gato de tiro que se anclaba al estribo más próximo al parque de empuje (figura 22).



Figura 22. Disposición de las barras de tiro

El peso total a empujar fue de 1400 t. Cada punto de apoyo provisional de la estructura se materializó mediante dos aparatos de apoyo, uno bajo cada una de las almas del cajón inferior de la celosía.

La carga máxima por pareja de apoyos durante las distintas fases del empuje fueron:

- Apoyos del parque de empuje 3600 kN.
- Apoyos en estribo 1 y pila: 6300 kN.
- Apoyos en estribo 2: 1500 kN.

Para el deslizamiento sobre los apoyos provisionales se dispusieron almohadillas de teflón con una tensión de trabajo máxima de 12 MPa. Para el paso por la pila y la llegada al estribo opuesto se previó una pequeña nariz para elevar ligeramente el tablero (figura 23).



Figura 23. Nariz delantera

Para asegurar el guiado transversal del puente se dispusieron unos topes transversales en el estribo 1 y en los fustes de las pilas. Estos topes consistían en unos rodillos laterales anclados a una estructura metálica provisional (figura 24).



Figura 24. Detalles de apoyo en parque, guía lateral de estribos, y apoyo doble en fuste y guía lateral en pila.

El empuje se realizó sin cortar el tráfico de la autopista (figura 25). Una vez colocado el tablero en su posición en planta definitiva se procedió mediante gateo a la transferencia de la carga vertical desde los apoyos provisionales a los definitivos. Posteriormente se completaron los vanos de aproximación metálicos y por último se procedió a hormigonar el resto de la losa.



Figura 25. Vistas durante el empuje

6. Conclusiones

Los puentes para las Líneas de Alta Velocidad presentan una gran cantidad de condicionantes de diseño, especialmente aquellos relacionados con la deformabilidad y la limitación de las aceleraciones verticales durante el paso del tren. La solución en celosía permite conjugar la necesaria rigidez con una cierta ligereza formal. El progreso en los procesos de corte y ensamblaje de las modernas estructuras metálicas, permiten un discurso formal cada vez más rico, incluso dentro de los parámetros de rigor presupuestario que deben caracterizar las actuaciones de la Administración Pública. El puente sobre la AP-7 en Riudellots de la Selva constituye un ejemplo de adaptación de la solución clásica de celosía tipo Warren a una problemática muy concreta. Se trata de una estructura que pretende responder al reto de construir una obra de gálibo estricto con una luz importante y con fuertes condicionantes de resistencia y rigidez, conjugando vectores aparentemente irreconciliables como la eficiencia, la economía de recursos y un cierto valor formal, que se juzga necesario en una obra bajo la que circulan diariamente miles de personas (figura 26).



Figura 26. Vistas del puente terminado

7. Referencias

- [1] AGUILÓ M. Forma y tipo en el arte de construir puentes. Madrid. Abada Editores 2010. p.124 - 133.
- [2] FERNÁNDEZ TROYANO L. Tierra sobre el agua: Visión histórica universal de los puentes. Madrid. Colegio de Ingenieros de Caminos, Madrid. 1999. Tomo II p. 47 a 69.
- [3] ROMO MARTÍN J. 2010 “Los puentes: génesis y sentido del proyecto”. San Sebastián. II Jornadas sobre la vida de los puentes. Asociación Española de la Carretera.
- [4] ROMO MARTÍN J., SÁNCHEZ DELGADO J., SANZ MANZANEDO C. “Viaducto atirantado sobre el By-Pass de Valencia”. Actas IV Congreso Internacional de Puentes y Estructuras ACHE Valencia. 2008.