

DOS PUENTES MIXTOS PARA LA L.A.V. MADRID-BARCELONA-FRONTERA FRANCESA

Juan A. SOBRINO ALMUNIA

Dr. Ingeniero de Caminos

PEDELTA, SL

Director

jsobrino@pedelta.es

Javier JORDÁN GARCÍA

Ingeniero de Caminos

PEDELTA, SL

Director Técnico

jjordan@pedelta.es

Resumen

Recientemente se han construido los dos primeros puentes de acero en la línea ferroviaria de la alta velocidad (LAV) que conecta Madrid, Barcelona y la frontera francesa (Perpiñan). Ambas estructuras cruzan infraestructuras existentes (carreteras o ferrocarril) con un gálibo vertical muy estricto para reducir el impacto medio-ambiental (básicamente reduciendo terraplenes y desmontes en los accesos). El diseño conceptual es similar para los dos puentes: un tablero de estructura mixta acero-hormigón suspendida de dos tirantes de acero con directriz curva. Una solución innovadora en las líneas de alta velocidad españolas.

Palabras Clave: puente ferrocarril, alta velocidad, mixto

1. Introducción

Los dos puentes que se presentan están ubicados en la LAV Madrid-Barcelona-Figueras. El primero de ellos, el puente de Llinars sobre la autopista AP-7, se encuentra a unos 45 km al norte de Barcelona., el segundo puente está ubicado en Sant Boi, a unos 15 km al sur de Barcelona, muy próximo a su aeropuerto. Los dos puentes se han proyectado para satisfacer requisitos explícitos similares requeridos por el ADIF, que podrían ser sintetizados en los puntos siguientes:

- Los puentes cruzan las infraestructuras existentes, autopistas o carreteras con un intenso tráfico, no permitiéndose ninguna interrupción del tráfico de carretera durante la construcción del puente.
- El gálibo vertical del puente sobre la carretera debe ser estricto (5,5 m) y la altura de los elementos estructurales bajo la plataforma la mínima posible. Ambos requisitos tienen la intención de reducir la altura de la vía sobre el terreno para reducir al mínimo las consecuencias para el medio ambiente en los accesos.
- Los puentes están situados en sitios altamente visibles y deben ser cuidadosamente diseñados, presentando una imagen innovadora: un símbolo de la tecnología de la vanguardia del ADIF.

1.1 Criterios de diseño

De acuerdo con las especificaciones del cliente, las estructuras se han proyectado cumpliendo las especificaciones de la normativa española de puentes de ferrocarril (IAPF-2007) en lo que se refiere a las acciones y verificaciones estructurales (en particular verificaciones referentes a los Estados Límites de Servicio que limitan desplazamientos, distorsiones, rotaciones y vibraciones del tablero). La mayor parte de estas verificaciones son similares a las exigidas en diferentes documentos de la UIC. Respecto al dimensionamiento de los elementos estructurales se han empleado las recomendaciones para el proyecto de puentes de acero o mixtos de carretera (RPM-95 y RPX-95) y la norma EHE

Como conclusión general, los Estados Límite de Servicio, en particular el control de desplazamientos, gobierna el dimensionamiento de los elementos metálicos. Los puentes se han construido mediante el procedimiento de empuje y por este motivo los espesores de chapa de las almas y del ala inferior han estado condicionados por el fenómeno de inestabilidad ("patch loading") y plastificaciones locales generadas durante el empuje. El Estado Límite de fatiga ha condicionado el diseño de algunos detalles como la unión entre vigas longitudinales y transversales.

El acero empleado en los elementos metálicos del puente es S355-J2G3 con diferentes clases de control y de limitación de defectos en las superficies dependiendo del espesor de las chapas y de su ubicación. En las uniones o chapas que

reciben soldaduras transversales se ha llevado a cabo un exhaustivo control mediante rayos X. El hormigón empleado en el tablero es HA-30.

1.2 Comportamiento estructural

Aunque la geometría del tablero puede recordar a la de un puente colgante el comportamiento estructural es el de una viga continua de canto variable.

Se han desarrollado varios modelos de análisis estructural para comprobar el adecuado comportamiento global del puente y de sus elementos. A modo de resumen los modelos han sido los siguientes:

- Un modelo global del puente en régimen elástico y lineal donde se combinan elementos finitos tipo viga y lámina (para el tablero de hormigón). Se han definido diferentes espesores equivalentes de los elementos de tipo lámina para considerar la fisuración o la reología del material.
- Un modelo global del puente elástico y lineal para obtener las sollicitaciones y desplazamientos durante el proceso de empuje y para la determinación del comportamiento dinámico (análisis temporal) generado por el paso de distintos tipos de trenes reales circulando a diferentes velocidades según lo especificado en la IAPF y Eurocódigo 1. Como resultado del exhaustivo análisis dinámico se ha confirmado el excelente comportamiento dinámico del puente, obteniéndose aceleraciones inferiores al límite admisible para vías sobre balasto (0,35 g) incluso para velocidades próximas a 400 km/h (Figura 1). La frecuencia principal (incluyendo todas las cargas permanentes) de las dos estructuras es de 1,28 Hz para el Puente de Llinars y de 1,33 Hz para el de Sant Boi.

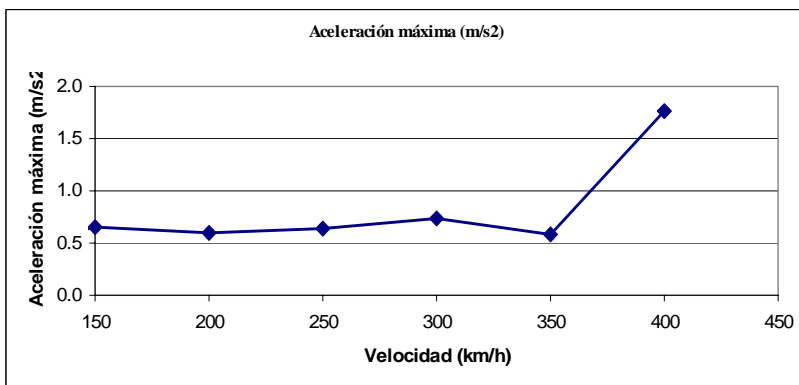


Fig. 1. Máximas aceleraciones inducidas por el tren tipo 3 del Eurocódigo 1 a su paso a distintas velocidades.

- Diversos modelos numéricos de nudos y zonas fuertemente rigidizadas mediante elementos finitos tipo lámina para obtener la distribución de tensiones y evitar su concentración.

2. Puente de Llinars

2.1 Descripción del puente

El puente tiene una longitud total de 574 m, presentando dos partes claramente diferenciadas: la primera, que cruza sobre la autopista, está constituida por una estructura mixta acero-hormigón, la segunda está formada por un tablero de hormigón postesado de sección cajón y luces de 48 m, construido vano a vano.

El puente mixto presenta una longitud total de 307 m y un radio del eje del tablero en planta de 5050 m. Su tablero está constituido por una estructura continua de 5 vanos con luces 45+71+75+71+45 m (Figuras 2 y 3). Las luces, de dimensiones importantes para un puente de ferrocarril de alta velocidad, y la ubicación de las pilas están condicionadas por el elevado ángulo de esviaje del cruce sobre la autopista y la previsión futura de su ampliación de tres a cuatro carriles. A consecuencia del escaso gálibo vertical de la línea de ferrocarril sobre la autopista, apenas se dispone de una altura de 1,45 m bajo la capa de balasto (2,15 m respecto la cota de carril). La estructura portante debía concebirse en su mayor parte sobre la cota de la vía. El procedimiento de construcción ha sido también un aspecto esencial en la concepción del puente ya que las interferencias con el tráfico de la autopista debían ser mínimas y en ningún caso era posible llevar a cabo interrupciones de circulación.

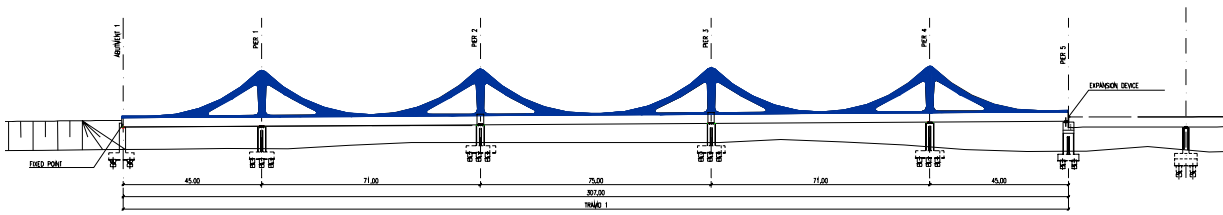


Fig. 2. Alzado general del puente de Llinars (tramo metálico).



Fig. 3. Puente de Llinars

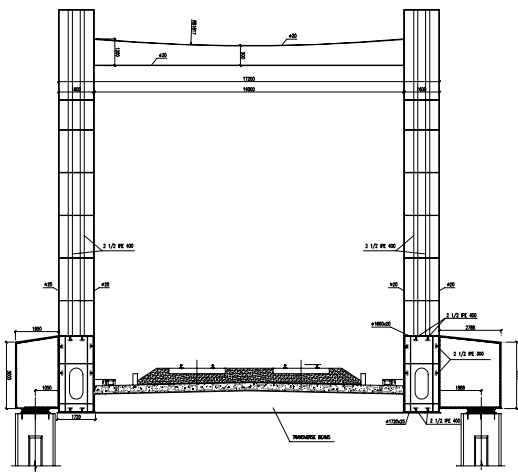


Fig. 4. Sección transversal del Puente



Fig. 5. Vista de la estructura durante construcción.

En el estudio de alternativas se analizaron nueve soluciones: una pérgola, un puente atirantado, un puente de sección tubular de hormigón postesado y diferentes tipologías con estructura metálica: arco, viga sustentada con tirantes, etc. Finalmente, valorando aspectos constructivos, económicos, integración en el entorno, el comportamiento estructural y el mantenimiento, se adoptó como la solución óptima una estructura metálica: una viga continua de canto variable y tablero inferior.

El puente, de 17 m de ancho total y 14 m de ancho útil, soporta dos vías de ancho UIC sobre balasto (Figuras 4 y 5). El tablero mixto consiste en una serie de vigas transversales de sección I, de 1,1 m de canto separadas cada 3,55 m soldadas a las vigas longitudinales y conectadas superiormente a una losa de hormigón armado de 35 cm de espesor.

El canto de la viga metálica varía viga a viga ya que longitudinalmente el tablero se ha definido como una recta de pendiente constante para facilitar su empuje, pero la rasante de la vía es parabólica. De este modo, la altura de balasto es constante en el tablero, evitándose sobrepesos innecesarios. La unión entre las vigas transversales y las longitudinales se ha ideado con una reducida inercia a flexión, evitándose problemas de fatiga sobre el alma interior de la viga longitudinal. La losa y las vigas transversales se conectan entre sí mediante pernos de cortante de 19 mm de diámetro y 125 mm de altura (tipo Bernold). La losa se construye una vez lanzada la estructura metálica, hormigonándose en dos fases, una primera sobre una chapa grecada de pequeño espesor (cuyas dimensiones son las mayores dentro del catálogo habitual de este tipo de perfiles) capaz de soportar un peso medio de 2 kN/m² (aproximadamente 8 cm de hormigón) y una segunda fase hasta alcanzar el espesor total (Figura 6).

Las vigas longitudinales presentan una sección cajón de 1,6 m de ancho y altura variable entre 3,5 y 6 m. Las vigas están formadas por chapas rigidizadas interiormente mediante perfiles longitudinales tipo ½ IPE 300 o ½ IPE 500. Transversalmente se han colocado marcos de rigidización cada 3,5 m o diafragmas cada 7 m. En algunos tramos, el centro de vano y zonas de apoyo, la distancia entre estos rigidizaciones transversales se reduce a 1,75 m. Estas vigas longitudinales se suspenden de tirantes formados por chapa de acero de directriz curva. Los tirantes de cada vano se unen en la coronación de los pilonos de 14,5 m de altura.

La ubicación de las pilas sólo era posible en las zonas de mediana y más allá de los arceles exteriores de la Autopista, considerando la previsible ampliación a un carril más. Por este motivo, algunas de las pilas no están bajo la planta del tablero. Para conseguir apoyar el tablero sobre éstas se han diseñado unas vigas-ménsula transversales empotradas en la viga longitudinal y que apoyan en su extremo sobre la pila. Esta solución permite evitar un apoyo esviado del tablero y una vista más transparente del conjunto desde la dirección coincidente con el eje de la autopista.

Los tirantes que soportan el tablero presentan una sección cajón de 1,6 m de ancho y un canto ligeramente variable, con un valor medio de 1,7 m. El cajón está formado por chapas rigidizadas. La directriz de los tirantes es curva, con un radio de 48,6 m, por motivos puramente estéticos, transmitiendo una visión intencionadamente plácida para un puente de grandes dimensiones y un gálibo vertical muy estricto sobre una autopista de intenso tráfico.

Los pilonos (de 14,5 m de altura sobre la viga longitudinal) están sometidos a esfuerzos significativos, en particular, aquellos coincidentes con las ménsulas de apoyo sobre pilas excéntricas. La sección tipo de los pilonos es una viga cajón constituida por chapas rigidizadas cuyo ancho varía en altura entre 2,1 y 2,7 m.

El sistema de protección de la estructura metálica consiste en un sistema típico de tres capas para las superficies exteriores; después de una limpieza y granallado hasta alcanzar un grado Sa-2,5, se aplica una primera capa de una poliamida-epoxi pigmentada con fosfato de zinc (25 µm), posteriormente una capa intermedia del epoxi-poliamida (170 µm) y finalmente una capa final de poliuretano acrílico (30 µm). En las superficies interiores el sistema de protección consiste en dos capas (una imprimación y una capa de epoxi-amina alcanzándose 200 µm). Los elementos no accesibles por sus reducidas dimensiones (pilonos y tirantes) se han sellado para conseguir su estanqueidad. La selección del color era esencial para mejorar el aspecto de esta estructura de enormes dimensiones y sobretodo con un gálibo tan estricto sobre la autopista. Tras un amplio estudio se decidió un color azul – igual que los postes de catenaria- para los elementos sobre el tablero y una franja longitudinal gris de unos 2 m (aproximadamente la relación áurea respecto al canto total) en la parte inferior. Esta composición y elección de colores aumenta claramente la esbeltez aparente del puente (Figura 7).



Fig. 6. Vista interior del puente en construcción.



Fig. 7. Vista general de la estructura.

El peso total de la estructura es 2.800 toneladas, que representa una cuantía media de 615 kg/m² (respecto a una plataforma de 14 m de ancho).

La superestructura se apoya sobre pilas y estribos de hormigón armado. Las cimentaciones son profundas, empleándose pilotes de 1,5 m de diámetro. Como es habitual en puentes de alta velocidad, se ha definido un punto fijo de la estructura que en este tablero es el estribo lado Barcelona (en el viaducto de hormigón el tablero se ancla en el estribo opuesto, colocándose la junta en la pila sobre la que apoyan los dos tableros).

2.2 Construcción

Las piezas de acero del puente han sido fabricadas en los talleres de la empresa URSSA en Vitoria (a 550 km de la obra) y transportadas en elementos prefabricados de alrededor de 20 m de longitud y un peso máximo de 40 toneladas, ensamblándose en el terraplén de acceso al puente del lado Barcelona.

El puente se ensambló en cuatro tramos de 75 m de longitud máxima y con un peso de casi 700 T. Una vez montado cada tramo, lo que requería unas cinco semanas, se procedió al empuje de la parte ya construida (el empuje precisaba entre uno y dos días, Figuras 8 y 9). El montaje de cada tramo se lleva a cabo sobre soportes metálicos provisionales, distanciados aproximadamente 10 m, que permiten apoyar provisionalmente las piezas que llegaban prefabricadas del taller mientras se iban uniendo. Finalizadas las soldaduras, se aplicó la capa de pintura de acabado. Para llevar a cabo la operación de empuje, el peso de la estructura metálica se transfería a ocho apoyos fijados en su parte superior a la estructura metálica y que en su parte inferior deslizan sobre un sistema de apoyos de neopreno teflón, guiados mediante carriles. Estos apoyos provisionales tienen una capacidad vertical máxima de 10.000 kN.

Los primeros tramos se empujan mediante gatos hidráulicos de 600 kN de capacidad. Estos gatos, anclados sobre el carril de deslizamiento, empujan directamente al apoyo deslizante en su parte inferior. Por el contrario, el lanzamiento del último tramo se ha llevado a cabo mediante cables y un sistema de tiro anclado en el estribo. Con objeto de asegurar un igual reparto de la reacción de cada apoyo provisional entre las dos almas del cajón metálico, todos los apoyos provisionales tanto del parque de ensamblaje como aquellos sobre las pilas poseen una rótula esférica.

Para reducir los esfuerzos longitudinales en la estructura metálica durante su construcción, el tablero se lanza junto con una nariz de lanzamiento de 30 m de longitud, cuya flecha máxima durante el empuje ha sido de 360 mm. Este movimiento ha condicionado el plano de lanzamiento del puente, para no reducir el gálibo vertical de la autopista durante construcción.

Como se ha descrito anteriormente, algunas pilas del puente están situadas fuera de la planta del puente. Como durante el empuje el puente se debe apoyar en las vigas longitudinales, se han construido pilas metálicas provisionales ubicadas bajo proyección en planta de la viga longitudinal (ocupando parcialmente un arcén exterior o el futuro carril de la autopista).



Fig. 8. Vista durante el empuje.



Fig. 9. Vista del tablero en posición definitiva.

2.3 Datos técnicos generales

El equipo de los ingenieros que han participado en el diseño y la construcción del puente es:

Propiedad:	ADIF, Ministerio de Fomento.
Directores del proyecto:	ADIF, Alberto Reguero y José L. Torres-Baptista
Proyecto del tramo:	SERCAL, José M ^a Warletta
Proyecto de la estructura:	PEDELTA, Juan A. Sobrino, Javier Jordán, Juan V. Tirado y Ricardo Ferraz
Dirección de obra:	ADIF, Rafael Rodríguez, Agustín Fernández, Mario García y Juan L. Monjaraz
Asist. Téc. a Dirección de obra:	SERCAL, José L. Aldecoa
Constructor	Constructora Hispánica, Miguel Ruíz
Subcontratistas	URSSA, estructura metálica, Pedro Arredondo ALE-LASTRA, lanzamiento, Javier Martínez ATISAE, control de ejecución, Roberto Rondelli

3. Puente de Sant Boi

3.1 Descripción del puente

El puente de Sant Boi es conceptualmente similar al viaducto de Llinars con una geometría diferente al presentar luces algo menores. La longitud total del puente es de 870 m con dos zonas claramente distintas: un primer tramo constituido por un tablero mixto de acero y hormigón de seis vanos con luces 44+63+63+63+63+44 m (340 m) que cruza diversas infraestructuras existentes y un segundo tramo sobre el río Llobregat con un tablero de sección tipo artesa de hormigón pretensado construido in situ por el procedimiento vano a vano con luces de 50 m (Figura 10), donde se emplea una autocimbra de grandes dimensiones diseñada 'ad hoc'. El trazado en planta del puente metálico tiene sus últimos 70 m en una curva en clotoide que enlaza con una curva circular de 3500 m de radio.



Fig. 10. Vista aérea del puente de Sant Boi.

El puente, de 17 m de ancho total y 14 m de ancho útil, da paso a dos vías de ancho UIC sobre balasto. El tablero mixto consiste en un forjado mixto con vigas transversales de sección I, de 1 metro de canto, separadas 3 m (Figura 11). El sistema y comportamiento estructural es similar al definido anteriormente para el puente de Llinars.

Las vigas longitudinales presentan una sección cajón de 1,4 m de ancho y un canto variable entre 3,5 y 5,5 m. Las vigas están formadas por chapas rigidizadas interiormente mediante perfiles longitudinales tipo $\frac{1}{2}$ IPE 500. Transversalmente se han colocado marcos de rigidización cada 3,1 m o diafragmas cada 6,2 m. Las vigas longitudinales se suspenden de tirantes de directriz curva formados por chapas de acero. Los tirantes de vanos consecutivos se unen en la coronación de los pilonos de 11,5 m de altura.



Fig. 11. Vista aérea del puente de Sant Boi.



Fig. 12. Vista del tablero en posición definitiva.

Los pilonos tienen una sección transversal tipo cajón de dimensiones constantes en toda su altura (2,4x1,5 m) con chapas de 25 mm de espesor rigidizadas longitudinalmente mediante perfiles $\frac{1}{2}$ IPE 400.

Los tirantes que soportan el tablero presentan una sección cajón de 1,4 m de ancho y un canto ligeramente variable, con un valor medio de 1,2 m. El cajón está formado por chapas rigidizadas. La directriz de los tirantes es curva, con un radio de 46,7 m, por motivos puramente estéticos.

El sistema de protección mediante pintura es similar al puente de Llinars, si bien la elección de los colores difiere para adaptarse al de los postes de catenaria (Figura 12).

A diferencia del puente de Llinars, de menor longitud, los dos tableros que forman el viaducto de Sant Boi tienen un punto fijo común, la pila 6 donde ambos apoyan. Esta pila debe ser capaz de resistir 25.000 kN de fuerza horizontal y los desplazamientos horizontales de la coronación de esta pila, de cerca de 20 m de altura, deben ser inferiores a 30 mm. Ha sido necesario dotar a esta pila de una configuración estructural muy rígida, diseñándose un elemento intraslacional en forma de A. Esta pila está cimentada sobre nueve pilotes de dos metros de diámetro empleados también en el resto de la subestructura con profundidades que alcanzan casi los 40 m.

El peso de acero empleado en el puente es de 2.637 T (554 Kg/m² referidos a una anchura de la plataforma de 14 m).

El puente es muy visible desde varias poblaciones y desde las carreteras adyacentes y, en consecuencia, se ha prestado especial atención al diseño formal y al color de los elementos. Las pilas que soportan el tablero de hormigón con una sección artesa que debe soportarse en sus almas, separadas unos 16 m, se han diseñado con un único fuste de formas curvas que se abre en su parte superior y se aligera mediante un hueco en forma de corazón consiguiéndose una pila de superficies curvas muy transparente a pesar de su elevado ancho en coronación (Figura 13). Las pilas se han construido con un fuste de hormigón armado y su coronación se ha pretensado para resistir la desviación de fuerzas de los apoyos hacia el fuste y las cargas transmitidas por la autocimbra durante la construcción.

El resto del puente con tablero de hormigón y vanos de 50 m se ha resuelto mediante una sección en artesa con tablero inferior, nervado transversalmente, fuertemente pretensada en sentido longitudinal y transversal. Esta sección permite dar una continuidad formal al tablero, reducir la altura de la rasante sobre el terreno natural y actúa como barrera sónica.



Fig. 13. Pilas del tablero de hormigón y vista de la autocimbra.

3.2 Construcción

En la construcción del tablero metálico han participado diversos talleres de Sevilla, Madrid y Barcelona bajo la coordinación de Talleres Torrejón (ACCIONA). Las piezas se transportan a obra en longitudes que varían entre 12 y 20 m y son ensambladas en el terraplén de acceso lado Lleida.

El puente se construye en tres tramos con unas longitudes de 125+126+89 m. Tras el montaje de cada tramo (que requiere aproximadamente unas doce semanas) se procede al empuje de la estructura metálica. Las distintas piezas que llegan a la obra descansan sobre soportes provisionales separados 11 m. Una vez unidas las piezas, la mitad de los soportes se retira, quedando la estructura apoyada sobre soportes que permiten el deslizamiento de la estructura. En este puente los aparatos de apoyo están anclados al terreno y permanecen fijos durante el empuje, deslizando el tablero sobre apoyos de neopreno teflón. El igual reparto de la reacción vertical entre las dos almas de cada viga longitudinal se consigue mediante dos gatos hidráulicos verticales conectados a una misma central de presión. Estos apoyos incluyen también un sistema de guiado horizontal. La estructura se lanza mediante un sistema de tiro anclado en el estribo y barras horizontales unidas a la parte trasera del tramo a empujar mediante una chapa provisional. En las pilas, el puente desliza directamente sobre pastillas de neopreno teflón que se apoyan sobre apoyos tipo POT que actúan como una rótula esférica para los giros esperados durante el empuje.

Para reducir los esfuerzos longitudinales inducidos por el procedimiento de construcción, se ha diseñado una nariz de lanzamiento de 25 m de longitud, cuyo movimiento máximo en construcción es de 270 mm (Figura 14).

El tablero de hormigón se ha construido mediante un procedimiento vano a vano con juntas a cuartos de la luz mediante autocimbra. Una vez montada la autocimbra se alcanzaban rendimientos de ejecución muy elevados: entre 10 y 14 días por vano. El tablero tiene un ancho total de 16,50 m y un elevado peso (40T/m) y para su construcción NECSO ha fabricado una autocimbra de grandes dimensiones –una de las mayores de Europa– que permite complejos movimientos y aperturas de encofrado.



Fig. 14. Tablero metálico y nariz de empuje durante su lanzamiento.

3.3 Datos técnicos generales

El equipo de los ingenieros que han participado en el diseño y la construcción del puente es:

Propiedad:	ADIF, Ministerio de Fomento.
Directores del proyecto:	ADIF, Alberto Reguero y Paloma Paco
Proyecto del tramo:	UTE GPO-PEDELTA, Xavier Montobbio
Proyecto de la estructura:	PEDELTA, Juan A. Sobrino, Javier Jordán, Juan V. Tirado, Ricardo Ferraz y Lara Pellegrini
Dirección de obra:	ADIF, Rafael Rodríguez y Mauro Bravo
Asist. Técnica a Dirección de obra:	UTE GPO-PEDELTA, Antoni Pons y Antonio Puertas
Constructor	ACCIONA, Jaime Vega y Roberto Carballo
Subcontratistas	Talleres Torrejón, estructura metálica, Gonzalo Rodríguez, Manuel Sánchez y Marta Calvo ULMA, autocimbra.

4. Conclusiones

Los dos puentes presentados son las primeras estructuras metálicas del corredor ferroviario de alta velocidad Madrid-Barcelona-Figueras. Ambos viaductos se han diseñado con la intención de reducir la dimensión de la estructura debajo de la plataforma para minimizar el impacto ambiental de la obra.

La selección de un tablero mixto de acero y hormigón suspendido de tirantes de chapa de directriz curva ha permitido un diseño innovador, elegante y sobrio con una fuerte personalidad que ilustra las enormes posibilidades de la construcción metálica para este tipo de puentes ferroviarios.

El empleo de un procedimiento de construcción mediante lanzamiento del tablero ha evitado las interferencias con las infraestructuras existentes debajo del puente y garantizado la seguridad de todos los equipos implicados en la construcción.