

Viaducto Atirantado para ferrocarril de alta velocidad en Hernani

Cable-stayed viaduct for high-speed railway in Hernani

**Guillermo Capellán Miguel^a, Pablo Alfonso Domínguez^b, Ysabel Guil Celada^c,
Itziar A. Fernández Hernández^d, M^a Teresa Calleja Oria^e y Narciso Pulido Asín^f.**

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados. Director Técnico. gcapellan@arenasing.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados. Project Manager. palfonso@arenasing.com

^c Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados. Project Manager. yguil@arenasing.com

^d Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. Euskal Trenbide Sarea. Directora de Obra. iafernandez@ets-rfv.eus

^e Ingeniera Técnica de Obras Públicas. Sacyr. Jefa de Oficina Técnica. mcalleja@sacyr.com

^f Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sacyr. Gerente - Jefe de Proyecto Dpto. Ingeniería. npulido@sacyr.com

RESUMEN

El Tramo Central del Viaducto de Hernani es el primer puente con vanos atirantados de la red de Alta Velocidad en España (diseñado para una velocidad de 200 km/h). La tipología adoptada es la de un tablero continuo con sección artesa de hormigón pretensado, con vanos tipo de hasta 31 m, excepto en los cruces sobre el río Urumea, que obligan a adoptar una luz de 67,70 m el tramo 1 y de 120 m en el tramo 2. Para resolver estos vanos, se opta por reforzar la estructura mediante atirantamiento superior desde mástiles verticales, configurando dos vanos atirantados, uno con esquema asimétrico de un solo mástil y otro simétrico de doble mástil.

ABSTRACT

The Central Section of the Hernani Viaduct is the first bridge with cable-stayed spans on the high-speed network in Spain (designed for a speed of 200 km/h). The typology adopted is that of a continuous deck with a prestressed concrete U-shaped-section, with standard spans of up to 31 m, except at the crossings over the Urumea River, where it is necessary to adopt a span of 67.70 m in section 1 and 120 m in section 2. To solve these spans, the structure was reinforced by cable stays from vertical pylons, configuring two cable-stayed spans, one with an asymmetrical single-pylon scheme and another with symmetrical double-pylon scheme.

PALABRAS CLAVE: atirantado, sección artesa, hormigón pretensado, ferrocarril, alta velocidad.

KEYWORDS: cable-stayed, U-section, prestressed concrete, railway, high-speed.

1. Introducción

El viaducto de Hernani, perteneciente al "Proyecto Constructivo de la Plataforma del Tramo Hernani-Astigarraga de la Nueva Red Ferroviaria en el País Vasco en la Rama de Gipuzkoa" tiene una longitud total de 1434.69 m entre ejes de apoyos en extremos del viaducto. Se encaja entre los términos municipales de Hernani y Astigarraga, ambos colindantes con el de San Sebastián, en la vega del río Urumea, al que cruza hasta tres veces, pasando además bajo el viaducto existente de la Autovía del Urumea.

Por motivos estructurales, el viaducto se divide en tres tramos, separados por 2 estribos que hacen la función de punto fijo. En concreto, el viaducto completo incluye:

- Viaducto de Aproximación (617.37 m): tablero pretensado de losa aligerada, que se encontraba ejecutado en el momento de comenzar la Fase II de las obras.
- Tramo Central (470.61 m): tablero con sección artesa en U constante, con vanos tipo de hasta 31 m de luz y 2 vanos atirantados de 67.70 m y 120 m de luz para salvar los cruces sobre el río Urumea. Se divide a su vez en el Tramo Central 1 (233.87 m), solidario al Vto. de Aproximación, y el Tramo Central 2 (228.00 m), separados por el Estribo 2,

que actúa como punto fijo de ambos tableros.

- Viaducto de Prolongación: tablero de doble viga artesa prefabricada de hormigón con losa in situ sobre prelosas, excepto en una zona de cruce sobre vías en la que define una losa pretensada in situ. El punto fijo de este viaducto se materializa en el Estribo 2, que constituye a su vez el extremo libre del Tramo Central 2.

El presente artículo hace referencia al Tramo Central, proyectado por Fulcrum y Arenas & Asociados [1].

Las soluciones atirantadas y extradadas han sido profusamente utilizadas en puentes ferroviarios en especial en Japón. Como ejemplo de puente atirantado aplicado al tren de alta velocidad cabe mencionar el Puente sobre el río Po de la línea de alta velocidad entre Bolonia y Milán en Italia, con 192 m de luz con tablero de 4.50 m de canto, diseñado para una velocidad de 300 km/h.

En el viaducto de Hernani, el atirantamiento se materializa mediante mástiles metálicos solidarios al tablero y tirantes con doble terminal en horquilla, permitiendo disponer las orejetas de anclaje sobre el tablero, sin necesidad de atravesarlo o utilizar elementos adicionales de mayor tamaño.



Figura 1. Vista del Tramo Central del Viaducto de Hernani.

2. Descripción de la solución

El Viaducto de Hernani Tramo Central se ubica a partir de la pila 26, del P.K. 0+623.500 al P.K. 1+093.110 con una longitud de 470.61 m. Materializa dos cruces sobre el Río Urumea, mediante sendos vanos atirantados.

El Tramo Central, como se ha dicho, se divide a su vez en dos tramos de viaducto separados por el Estribo 2, que actúa como punto fijo de ambos. La sección transversal en los dos tramos es de tipo U o artesa. Está formada por:

- 10.70 metros centrales para alojar el sistema de vía en placa y las canaletas.
- 2 bandas longitudinales de 1.90 m de ancho sobre los que se sitúan barandillas, caminos de servicio, etc.

El ancho total del tablero es de 14.50 metros en ambos tramos.

La solución ejecutada corresponde a un proyecto modificado, en el que se reestudian algunos aspectos del tablero y el sistema de atirantamiento, respecto al proyecto original [1], para mejorar estructuralmente su funcionamiento, que redunda en un mantenimiento más sencillo para la explotación. Los elementos principales de la estructura, con

la configuración definida en este proyecto, se describen a continuación.

2.1. Tablero

La tipología del viaducto es la de un tablero continuo de hormigón pretensado, con vanos tipo de hasta 31 m de luz, con la excepción del segundo y tercer cruce sobre el río Urumea, que obligan a adoptar luces de 67.70 y 120 m, respectivamente. Para resolver estos vanos, se opta por reforzar la estructura por medio de atirantamiento superior desde mástiles verticales, configurando vanos atirantados, con un total de tres ejes o mástiles de atirantamiento, uno en esquema asimétrico en el vano de 67.70 m y dos en configuración simétrica en el vano de 120 m.

La sección resistente del tablero está compuesta por dos cordones longitudinales de hormigón pretensado unidos transversalmente mediante losa sobre costillas de hormigón pretensado de canto variable. La separación entre costillas varía ligeramente de unos vanos a otros, pero es aproximadamente de 3.00 m. Sobre las costillas se sitúa la losa de canto variable de 0.33 a 0.416 m, que sirve de soporte a la superestructura. El canto de las vigas longitudinales es de 3.40 m en el tramo 1 y de 4.00 m en el tramo 2.

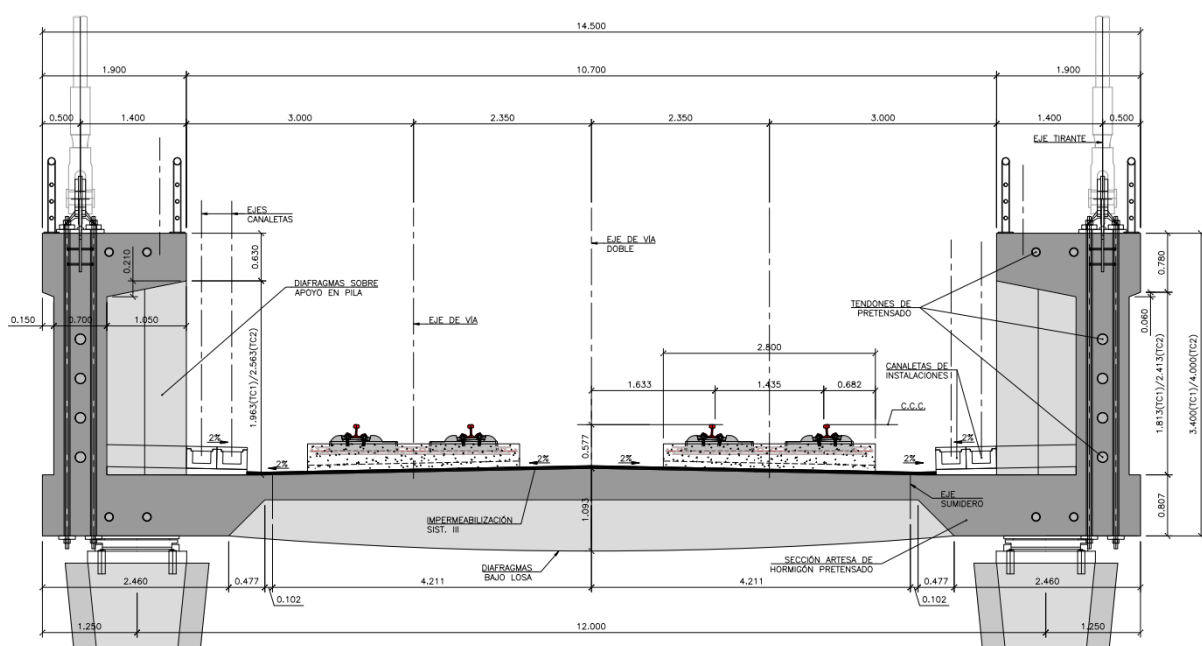


Figura 2. Sección tipo del Tramo Central del Viaducto de Hernani.



Figura 3. Vista de la cara inferior del tablero con las costillas transversales.

Las secciones de estos cordones tienen forma aproximada de C, con cabeza superior de 1.90 m de ancho y en 0.84 m de canto, alma de 0.70 m de espesor, y cabeza inferior de 2.46 m de ancho y canto de 0.807 m. En las zonas de apoyo sobre pilas existe un recrecido en el alma de entre 5 y 8 m de longitud desde el apoyo, para alojar las cuñas del pretensado curvo y para una mejor transmisión de las reacciones de los apoyos. El espesor de las almas en estas zonas es de 1.20 m, excepto en el diafragma de apoyo, donde aumenta hasta 1.75 m. Existen además recrecidos en los puntos de cuelgue de la cimbra aporticada y, así como en la transición a la sección el Viaducto de Aproximación.

Los condicionantes geométricos del emplazamiento definen la tipología de la sección tipo y los vanos singulares de 67.7 y 120 m. La estructura cruza constreñida bajo un puente existente de autovía que limita su altura. Por otro lado, el canto se ve limitado por la avenida de 500 años a un espesor máximo de 1.10 m bajo la vía en placa. Esta restricción nos lleva a adoptar una sección en U singular para el tablero y a añadir una superestructura atirantada para los vanos de 67.7 y 120 m. La luz de estos vanos viene fijada por el respeto del Dominio Público Marítimo Terrestre asociado al río Urumea y a los condicionantes hidráulicos que se desprenden de los estudios de inundabilidad.



Figura 4. Paso bajo el tablero y entre las pilas del viaducto de autovía existente.

2.2. Sistema de atirantamiento

El atirantamiento desde cada mástil está formado por 9 tirantes anclados cada 2.10 m en el eje de mástil y distancias entre 5.40 y 5.80 m en la intersección con la cara superior del tablero. El vano de 67.7 m se equilibra con dos vanos de 30 m y una sola torre, y el vano de 120 m con dos vanos de 27 m en cada extremo, y dos torres. Las torres metálicas poseen forma de H con travesaños superiores e intermedios como arriostramiento frente a cargas laterales inducidas por la planta curva. Cada torre del mástil se apoya en un zócalo que supone un ensanchamiento de la viga lateral del tablero, cuya geometría responde a la necesidad de dar continuidad estructural y formal a la sección del mástil.



Figura 5. Mástil de atirantamiento.

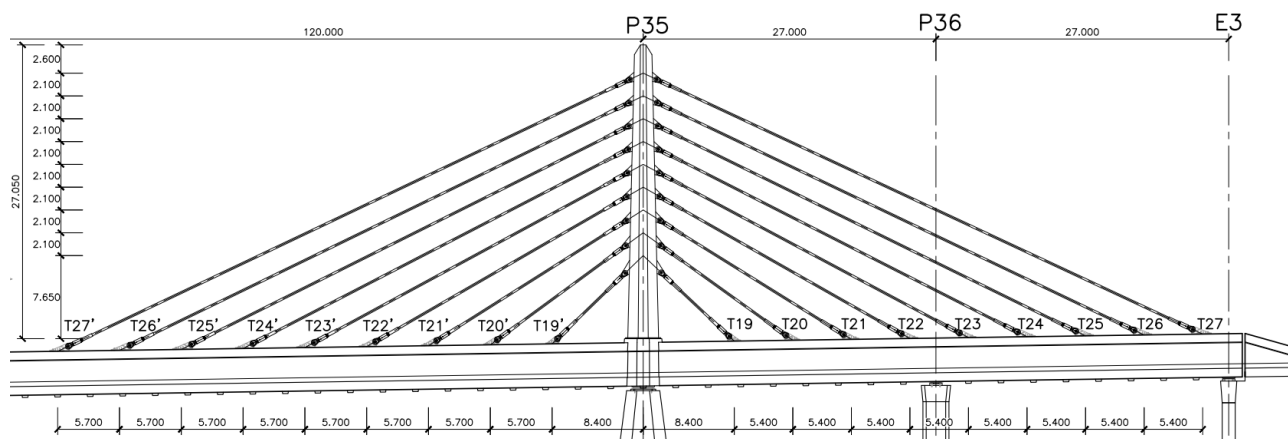


Figura 6. Plano de tirantes de uno de los mástiles del Tramo 2.

Los cables alcanzan hasta 60 m de longitud y 37 uds. de 0.6" para cargas permanentes de hasta 3320 kN. El anclaje de ambos extremos de los tirantes se resuelve mediante mazarotas articuladas, con terminal superior pasivo y terminal inferior activo para permitir el tesado. Las orejetas superiores del mástil se sueldan directamente al alma intermedia del mástil metálico. Las orejetas inferiores, también metálicas, se anclan al tablero mediante una chapa embebida en el hormigón, en prolongación de la orejeta, con pernos conectores, y 4 barras Ø47 verticales, de acero de alta resistencia, que fijan la orejeta mediante

una placa base en la cara superior del tablero. Estas barras pretensadas, ancladas a la cara inferior del tablero, comprimen verticalmente las almas, evitando la fisuración del tablero.



Figura 7. Orejeta de anclaje al tablero.

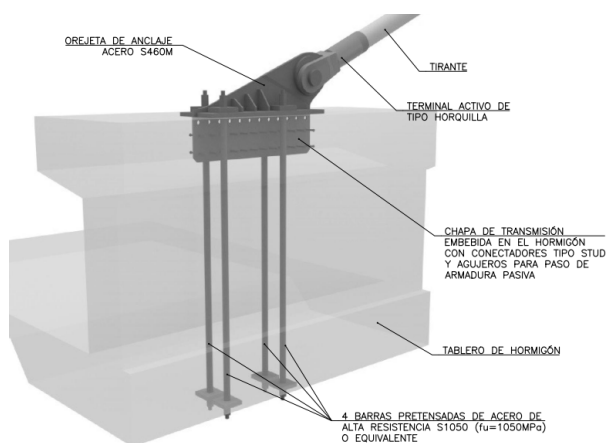


Figura 8. Esquema de sistema de anclaje al tablero de orejeta inferior de tirante.

Esta configuración permite alinear el plano de tirantes con el eje del alma lateral del tablero, ya que las barras verticales dejan espacio suficiente para el paso de los tendones de pretensado longitudinales.

Las mazarotas de mayor tamaño, para hasta 37 cordones, fueron fabricadas por primera vez y homologadas por VSL para este proyecto.



Figura 9. Mazarota de anclaje de tirante.

La elección de la tipología atirantada para los vanos singulares del Viaducto de Hernani fue fruto de un Estudio Tipológico detallado. Las razones principales que llevan a la elección de la solución atirantada son de tipo económico y constructivo, unidas a las restricciones y condicionantes del emplazamiento que limitan fuertemente la geometría de tablero. Otras soluciones con mayor canto o canto variable inferior no resultan viables geométricamente, es necesario reforzar la estructura con una superestructura. La solución atirantada permite mantener la misma sección de tablero de hormigón pretensado de los vanos tipo, lo que

permite grandes ventajas económicas y constructivas. Otras soluciones estudiadas con estructura híbrida, metálica o mixta resultaron más costosas, como las soluciones tipo celosía, arco, etc.

En la redacción del proyecto y durante el desarrollo de las obras se tomaron decisiones y se definieron detalles para facilitar el mantenimiento de la estructura, como estrategia para mejorar su durabilidad. Así, todos los elementos del sistema de atirantamiento que son sustituibles (los propios tirantes, las barras pretensadas de las orejetas inferiores y los pretensados verticales de pilas y estribos de retenida), son accesibles desde el exterior, directamente desde los caminos de servicio del tablero, mediante cestas elevadoras o haciendo uso de góndolas inferiores en los vanos principales.

2.3. Pilas y estribos

La mayor parte de las pilas del viaducto tienen un fuste de sección octogonal constante y un capitel superior de sección octogonal variable. Se diferencian del resto las pilas situadas bajo los mástiles cuyo fuste es de sección octogonal de canto variable y carecen de capitel, dando continuidad formal a la geometría del mástil y el zócalo sobre el que se dispone. La altura de las pilas varía de 4.5 m a 8.4 m.



Figuras 10 y 11. Pila tipo y pila bajo mástil.

La cimentación de pilas es profunda sobre encepados con pilotes in situ de diámetro 1.50 y 1.80 m o pilotes prefabricados hincados, con sección cuadrada de 0.40 m de lado. En las pilas tipo están formadas por 4 pilotes de 1.50 m de diámetro o 16 pilotes hincados, mientras que la cimentación de las torres de atirantamiento está formada por 16 pilotes de 1.80 m de diámetro.

El Tramo 1 del Viaducto es solidario al Viaducto de Aproximación, y finaliza en el Estribo 2, donde se ha materializado el punto fijo frente a las acciones longitudinales, que es común para los dos tramos del viaducto. El Tramo 2 parte de este estribo y finaliza en el estribo 3, que será el punto fijo del Viaducto de Prolongación. En ambos estribos se reproduce la sección del tablero dando continuidad visual y a los caminos de servicio. Además, en el Estribo 2 esta continuidad sirve para materializar el punto fijo, mediante pretensados pasantes entre las almas de ambos tableros. La cimentación de los estribos es igualmente pilotada.

Todas las pilas y estribos cuentan con apoyos tipo POT, excepto los apoyos bajo mástiles, que son tipo esférico y dispuestos con la parte fija en el tablero para garantizar la alineación del eje del mástil con el eje de apoyo en todo momento. En las pilas y estribos de retenida se dispone un pretensado vertical para evitar despegues, con vaina de polietileno y un cajeado tanto en subestructura como en tablero, para permitir movimientos longitudinales. El anclaje superior e inferior son accesibles para el mantenimiento e incluso su sustitución si fuera necesario.

Por último, se ejecutaron pilas provisionales en los vanos de cruce sobre el Urumea (una en el Tramo 1 y tres en el Tramo 2), con cimentaciones de pilotes hincados. De esta forma, se reducía la luz al entorno de 30-36 m, permitiendo que el tablero se sustente por sí

mismo antes de la instalación del sistema de atirantamiento. Para la ejecución estas pilas que fue necesario ejecutar dos penínsulas provisionales invadiendo parcialmente el cauce del río.

3. Análisis y parametrización

Durante el análisis estructural del viaducto y su definición geométrica, se siguió una estrategia de parametrización, mediante el software Grasshopper sobre Rhino. Se trabajaba en todo momento con un modelo tridimensional de la estructura, incluyendo la geometría de los elementos de hormigón (subestructura y tablero), el pretensado longitudinal y transversal, mástiles metálicos, los tirantes y sus orejetas de anclaje (junto con su sistema de conexión al tablero), aparatos de apoyo, etc. Esto permitió adelantarse a la ejecución, detectando posibles colisiones e interferencias entre elementos, con toma de decisiones previa a la puesta en obra, evitando posibles retrasos y rectificaciones costosas.

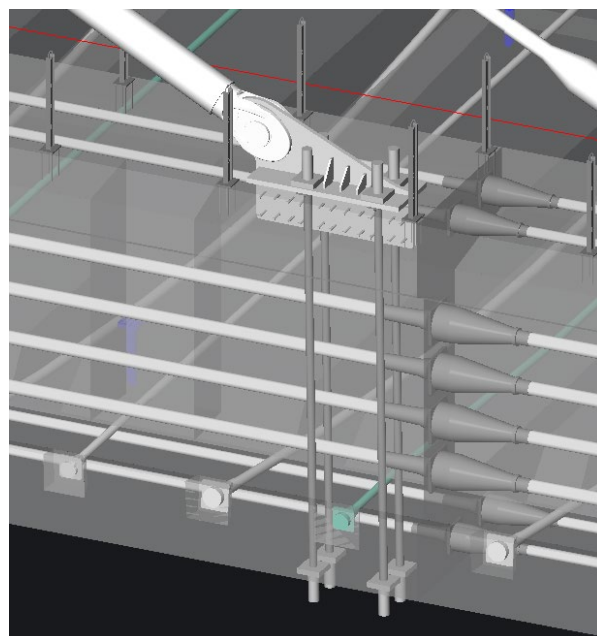


Figura 12. Detalle de zona de posibles interferencias en modelo paramétrico.

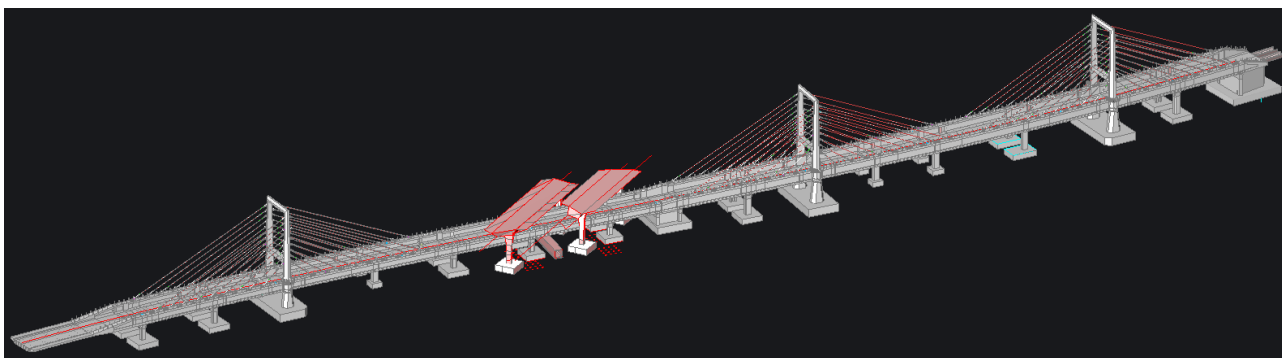


Figura 13. Modelo tridimensional paramétrico.

El modelo de cálculo de la estructura se generaba a partir de este modelo tridimensional paramétrico, permitiendo así establecer una trazabilidad entre geometría y análisis. Asimismo, gracias a la parametrización desarrollada y a la relación entre ambos modelos

(geométrico y de cálculo), las modificaciones necesarias debidas a interferencias detectadas o cambios en obra, se realizaban de forma muy rápida y dinámica, reduciendo mucho el tiempo de verificación y validación de las modificaciones.

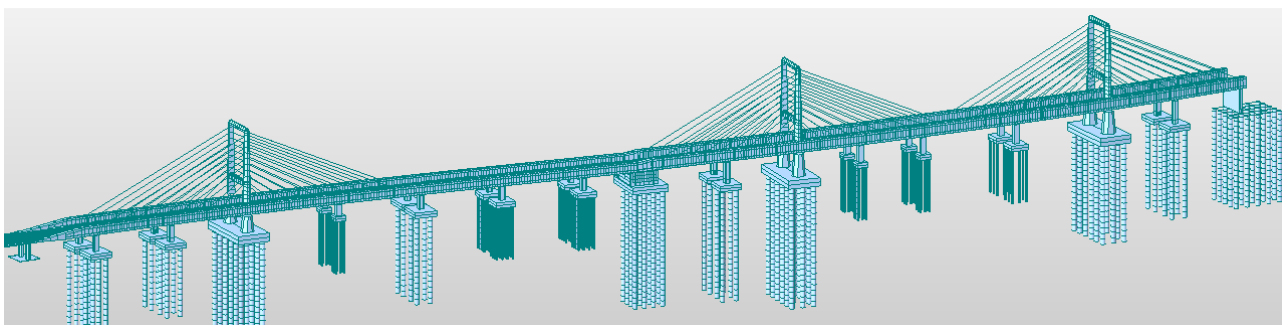


Figura 14. Modelo de cálculo.

4. Proceso constructivo

Una vez ejecutada la subestructura, formada por las cimentaciones pilotadas y los alzados de pilas y estribos, se procedió a la ejecución del tablero y sistema de atirantamiento como se describe a continuación.

El tablero se construyó sobre cimbra aporticada, que se apoyaba en las cimentaciones

de las propias pilas definitivas y provisionales. Se trabajó con 3 tramos, que iban avanzando para el desarrollo de los tajos correspondientes a las fases del tablero (8 en cada Tramo). La sección de hormigón se ejecutaba, a su vez, en 2 fases, la primera que incluye el cordón inferior de las vigas laterales, junto con la losa y costillas transversales, y, la segunda, formada por el alma y la cabeza superior de las vigas laterales.



Figura 15. Hormigonado de losa de tablero, se aprecia el frente de fase anterior y la viga de cuelgue de la cimbra.

En las fases correspondientes a vanos atirantados, se debían colocar y nivelar las orejetas de anclaje cuya parte inferior quedaba embebida en la sección de hormigón.

La ejecución de ambos tableros comenzó desde el Estribo 2, que es el punto fijo común, hacia PK- en el Tramo 1 y hacia PK+ en el Tramo 2. El último vano ejecutado en el Tramo 1, supuso la conexión con el tablero del Viaducto de Aproximación, momento en el cual se liberó el punto fijo provisional dispuesto en el Estribo 1.

Al mismo tiempo que se avanzaba en la ejecución del tablero, se comenzaron los trabajos de fabricación de los mástiles metálicos en las instalaciones de Megusa en Sevilla. Se puso especial cuidado en la posición y orientación de las orejetas de anclaje, para lo que se redactó un procedimiento detallado de ejecución que incluía medidas para evitar deformaciones durante el proceso de soldeo. Durante el montaje en blanco de cada mástil, se realizó un levantamiento tipo LIDAR de la pieza completa, como verificación final de la geometría antes del traslado a obra.



Figura 16. Montaje en blanco de mástil en taller.

Se transportaron a obra en 4 piezas, las dos torres laterales y las riostras superior e inferior. El montaje en obra se realizó mediante un grúa situada sobre el propio tablero de la estructura.



Figura 17. Montaje de mástil en obra.

A continuación, tras el tesado de las barras verticales de anclaje de las orejetas del tablero, se instalaron los tirantes, que se habían premontado en su longitud completa sobre el tablero del puente. La secuencia de instalación se realizó desde los tirantes más cortos hasta los más largos.



Figura 18. Tesado de tirante.

El tesado de cada tirante se realizaba desde la mazarota inferior, en una sola fase, mediante un útil específico, con el que además se realizaba la aproximación final a la orejeta inferior, donde ya se encontraba instalada la parte de terminal con horquilla. En algunas fases se realizó una comprobación de la carga en tirantes, mediante

ensayo de cuerda vibrante. Asimismo, se realizó una verificación final de la carga en todos los tirantes, obteniéndose una desviación máxima del 5.4% respecto a la carga esperada.

A lo largo de toda la obra se realizó un control del comportamiento de la estructura mediante la instrumentación instalada, que permitía acceder en remoto a los datos recogidos en tiempo real. Mediante esta instrumentación se controló el momento de despegue del tablero de las pilas provisionales durante el tesado de los

tirantes, momento en que se pudo proceder a la demolición de las mismas y a la retirada de las penínsulas provisionales en el cauce.

Para finalizar la obra se ejecutaron los voladizos que rodean los mástiles para el paso del camino de servicio, se colocaron y sellaron los capots de protección de los extremos de las barras pretensadas, se finalizaron las barandillas y se instalaron las góndolas de mantenimiento de la cara inferior del tablero en de cruce sobre el río Urumea.



Figura 19. Vano atirantado sobre el río Urumea.

5. Conclusiones

El Tramo Central del Viaducto de Hernani resuelve la necesidad de doble cruce sobre el río Urumea con los condicionantes existentes, mediante una solución racional que constituye el primer puente con vanos atirantados en la red de alta velocidad en España.

Queremos agradecer su participación a todos los implicados en su ejecución, especialmente a:

- Propiedad y Dirección de Obra: Euskal Trenbide Sarea.
- Asistencia a la D.O.: UTE Dair e Ingeplan

- Constructora: UTE Hernani - Astigarraga Fase 2 (Sacyr, Sacyr Neopul, Mariezcurrena y Zubieder).
- Cimbras y encofrados: Tecozam.
- Taller metálico: Megusa.
- Tirantes: VSL
- Instrumentación: Teknés Innovación.
- Diseño de la estructura y asistencia a la construcción: Arenas & Asociados.

Referencias

- [1] G. Capellán, E. Merino, M. Sacristán, Y. Guil, Viaducto de Hernani sobre el río Urumea. Un puente atirantado para la línea ferrocarril de alta velocidad, VI Congreso ACHE, 2014.