

Puente Arroyo Paneque. Puentes atirantados asimétricos de luces medias en entornos urbanos.

Arroyo Paneque bridge. Asymmetric Cable Stayed bridges for medium span in urban areas

Óscar Ramón Ramos Gutiérrez^{a,*}, Marcos J. Pantaleón Prieto^b, Iván Campo Rumoroso^c, Pedro Manuel Sierra García^d, Alejandro Castillo Linares^e, Manuel Ángel Díaz García^c

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria.

^b Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria. Catedrático Estructuras Metálicas.

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. WSP Spain. Bridge Department.

^d Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director Técnico. Consejería de Fomento. Ciudad Autónoma de Ceuta.

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. ACL.

RESUMEN

El Puente Arroyo Paneque está ubicado en la ciudad de Ceuta, salvando el arroyo que discurre entre la Avenida Otero y el Grupo Rocío. Se trata de un puente atirantado de naturaleza urbana de 81 m de longitud total y 67 m de luz atirantada. Es un puente atirantado asimétrico, con retenida rígida, que permite integrarse de manera eficiente en las particulares condiciones del entorno. El tablero es de tipo cajón mixto multicelular, y está soportado por 9 tirantes en un único plano en la mediana. Como es habitual en esta tipología de atirantados urbanos de luces medias y bajas, y tal como se comparará a lo largo del artículo para otros puentes similares tipológicamente hablando, el mástil es el elemento singular y diferenciador del diseño. En este caso está formado por dos fustes metálicos de forma pentagonal de ancho y canto variable que se unen en cabeza mediante una macla figurativa que también sirve de anclaje de los tirantes.

ABSTRACT

The Arroyo Paneque bridge is located in Ceuta, crossing the creek between Otero and Rocío streets. It is an asymmetric cable stayed bridge with a total length of 81 m, main span of 67 m and rigid back stays, correctly inserted in the urban surrounding landscape. The deck cross section is a composite box girder, supported by 9 cables anchored in its central plane. As usual in this kind of urban cable stayed bridge for short and medium spans (and as it will be shown along the paper for other similar examples), the tower or mast is the singular and differentiating element of the bridge design. In this case the tower is made of two steel shafts; with pentagonal cross section and variable width and depth. Both shafts join together on the top part, melting in one symbolic figure that acts as anchor point of the stay cables.

PALABRAS CLAVE: atirantado, urbano, asimétrico, sección mixta, retenida rígida

KEYWORDS: asymmetric cable stayed bridge, composite box section, urban areas, rigid back stay

1. Puentes atirantados asimétricos en entornos urbanos

Los puentes atirantados, que nacieron en la segunda mitad del siglo XX, pronto desplazaron a los puentes colgantes en el rango de luces que se extiende desde los 300 m hasta – hoy en día – más allá de los 1000 m.

Junto con este proceso de conquista en el campo de las grandes luces, la tipología de puente atirantado se mostró también como una gran aliada para el diseño de puentes en entornos urbanos, con luces mucho más modestas y donde, a priori, el puente atirantado es menos competitivo desde el punto de vista económico que otras tipologías convencionales.

Las razones de este desarrollo de los puentes atirantados en entornos urbanos son, a nuestro juicio, bastante evidentes. Por una parte, la tipología atirantada permite proyectar tableros realmente esbeltos y aligerados, que posibilitan rasantes poco elevadas cuando se trata de trazar el cruce de un camino sobre una vaguada, o sobre un río, consiguiendo disminuir las longitudes totales de puente, o la altura de los muros de acompañamiento, reduciendo las pendientes longitudinales y, en general, facilitando una integración menos agresiva y funcionalmente más adecuada de la nueva infraestructura en el medio urbano. Por otra parte, a nadie escapa el carácter escultórico y casi monumental que poseen los puentes atirantados correctamente insertados dentro de la ciudad o en su periferia. Podríamos decir que es una de las tipologías, si no la que más, que mejor permite desarrollar en el ingeniero de puentes cierta vocación arquitectónica, aunando los sentidos de la proporción, espacialidad y monumentalidad. Asimismo, en el conjunto del puente atirantado destaca, obviamente, un

elemento principal, y es la torre o mástil. Su geometría, material, altura, ubicación y retenida condicionan de forma definitiva la percepción del puente por parte de los ciudadanos.

Entendemos que esta singularidad del mástil dentro del entorno urbano es la que conduce, en muchas de las ocasiones, a la tipología de puente atirantado asimétrico. En efecto, la presencia de una única torre en el puente es la que permite destacar su figura de manera unívoca, sin competencia. La tensión estructural del único elemento que recoge todas las cargas del puente se ve acompañada por la tensión figurativa y visual: la asimetría en el diseño hace focalizar toda la atención del usuario en el mástil, reforzando aún más su carácter escultórico y referencial. Lógicamente, esta asimetría en el diseño está posibilitada por las luces generalmente moderadas que demandan los puentes urbanos (que podríamos situar entre los 60 y 180 m).

Hay muchos y muy buenos ejemplos de puentes atirantados asimétricos en entornos urbanos. Únicamente por razón de limitación de espacio, y como preámbulo de la descripción del Puente Arroyo Paneque, mostraremos aquí solo algunos en los que han participado los autores de este artículo.

El viaducto sobre el Parque Tecnológico de Paterna (Valencia) fue el primer puente atirantado de Juan José Arenas y Marcos J. Pantaleón en la recién fundada APIA XXI (el proyecto original es del año 1988). Se trata de un puente atirantado asimétrico tanto por el mástil (único) como por la disposición de los vanos de acompañamiento (64 m el vano principal y 36 m el vano de retenida). El tablero es de hormigón pretensado y el mástil metálico, con un único plano de atirantamiento al centro.



Figura 1. Viaducto sobre el Parque Tecnológico de Paterna

El puente de Hispanoamérica sobre el río Pisuerga en Valladolid fue proyectado en el año 1992 por Juan José Arenas y Marcos J. Pantaleón, si bien fue el primero el que continuó al frente de la ingeniería de construcción, entre los años 1996 y 1999. Se trata de un puente atirantado asimétrico de 120 m de luz principal y un vano lateral de 36 m que se remata en un fuerte

contrapeso final [1]. Aquí tanto el mástil como los tirantes de retenida son de hormigón pretensado, formando un pórtico triangular. El tablero está formado por dos nervios longitudinales de hormigón pretensado y celosías metálicas transversales.



Figura 2. Puente de Hispanoamérica sobre el río Pisuerga en Valladolid

El Puente de Escaleritas, en las Palmas de Gran Canaria (2004 – 2007), es proyecto de Marcos J. Pantaleón y Óscar Ramón Ramos [2].

Este atirantado asimétrico, de 100 m de luz principal, dispone de mástil metálico y tablero mixto, con un único atirantamiento en el plano

central y dos planos de retenida a un macizo de contrapeso.



Figura 3. Puente de Escaleritas en Las Palmas de Gran Canaria

El Puente TrengTreng – KayKay (en construcción) es un puente atirantado que cruza el Río Cautín en las afueras de la ciudad de Temuco, en Chile [3]. Es proyecto de Óscar Ramón Ramos, Marcos Pantaleón y Frank Schanack, entre otros. El diseño quebrado de la forma del mástil está basado en una leyenda local

y simula las dos serpientes, del bien y del mal, luchando entre ellas. El vano principal atirantado es de 140 m de luz, con retenida a un recinto de hormigón relleno de tierra. Tablero y mástil son de hormigón pretensado.



Figura 4. Puente TrengTreng – KayKay en Temuco (Chile)

2. El Puente Arroyo Paneque

El Puente Arroyo Paneque, ubicado en la Ciudad Autónoma de Ceuta, materializa el salto sobre el curso de agua del que toma el nombre permitiendo la conexión entre dos zonas de la urbe próximas en distancia, pero sin comunicación vial directa. El viaducto enlaza con la Avenida Otero en las proximidades del estribo de retenida desembocando en el Grupo Rocío en su extremo opuesto.

Dada la singularidad del enclave urbano en el que se encuentra, un entorno natural de

carrizos y zonas verdes en el centro de la ciudad, desde un primer momento se quiso dotar de cierta entidad al viaducto, motivo por el que se optó por la solución de puente atirantado asimétrico.

La estructura salva una distancia total de 81 m entre apoyos de estribos, mediante dos vanos de luces 14 y 67 m, siendo en este segundo vano en el que se plantea un sistema de atirantamiento con disposición en abanico. El alzado general del puente se muestra en la figura 1, donde se puede apreciar el salto diáfano sobre la vaguada que permite la solución adoptada.

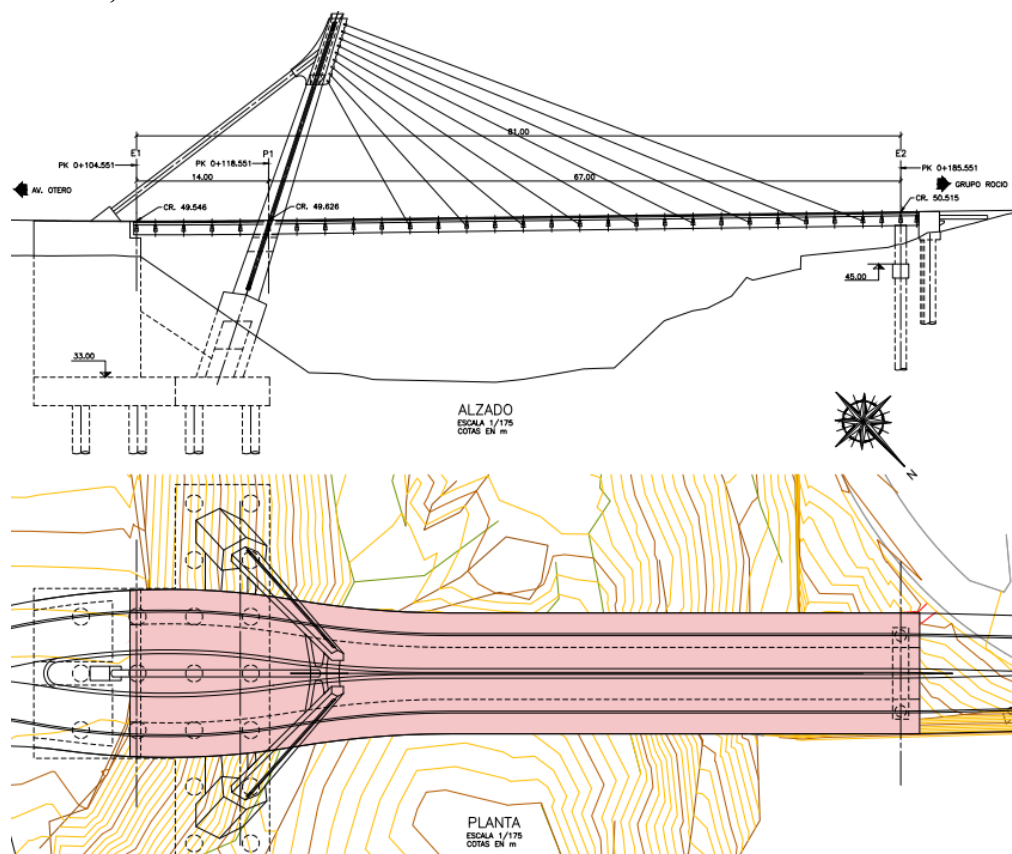


Figura 5. Definición general del puente

Como elemento singular y diferenciador del diseño del puente se ha proyectado un único mástil inclinado en uno de los estribos, compuesto por dos fustes metálicos independientes que se unen en su coronación mediante una pieza metálica de carácter

escultórico que recibe el único plano de atirantamiento existente.

Esta geometría está inspirada en el mito griego de las columnas de Hércules, concretamente en la imagen clásica del hijo de Zeus apoyado en dos columnas, una a cada lado

del Estrecho de Gibraltar, ubicándose la más meridional en Ceuta. La imagen de las dos columnas con el lema *non terrae plus ultra*, simbolizaba el fin del mundo conocido en la época de los griegos y su uso en la iconografía y heráldica españolas es extenso, formando parte actualmente del propio escudo nacional.

La macla que arriostra ambos fustes en cabeza, además de recibir el sistema de atirantamiento de la estructura, formado por un conjunto de 9 tirantes de 31 cordones de acero de alto límite elástico, conecta en su parte trasera con el tubo de acero de la retenida rígida que ha sido proyectada.

El tablero se ha planteado como un cajón metálico multicelular de 1.15 m de canto sobre el que reposa una losa de hormigón de 25 cm de espesor. Para poder soportar los 3.65 m de voladizo a cada lado, se disponen jabalcones metálicos en las secciones de marco. Todo el conjunto soporta una plataforma de anchura variable, entre los 12.80 m del estribo 1 y los casi 17.80 m del estribo 2, que alberga dos carriles de tráfico separados por una mediana y sendas aceras en sus laterales para uso peatonal



Figura 6. Visualización tridimensional del Viaducto Arroyo Paneque

2.2. Mástil

Como se ha comentado previamente, el mástil de la estructura es el elemento más singular del diseño, se trata de un elemento de una altura total de 35.50 m, cuyos fustes se encuentran inclinados 18° longitudinalmente y 30° en transversal.

La sección de la parte vista de los fustes es metálica y tiene forma pentagonal con doble canto variable. Se han dispuesto sendos rehundidos en sus extremos transversales con la intención de restar masividad al mástil a la vez que conferirle cierto cuidado estético (figura 3).

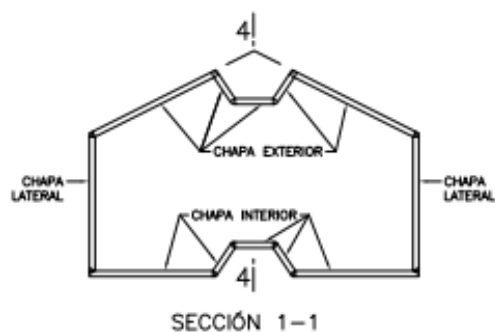


Figura 7. Sección del mástil

Los arranques del mástil, elementos que actúan de conexión con el encepado, se proyectan en hormigón armado, siendo su sección transversal homotética de la sección de

los fustes metálicos. El encepado, formado por cuatro filas de un número variable de pilotes, sirve de cimentación para el conjunto del mástil y alzados del estribo de retenida. Dada la asimetría del diseño, en este macizo convergen las principales reacciones de la estructura: el axil de atirantamiento del tablero (cuyo valor ronda los 12400 kN), el axil de la retenida (en torno a 25000 kN) y las reacciones de los empotramientos de los fustes.

A media altura entre el empotramiento con la cimentación y la macla superior, se sitúa una riostra que sirve de apoyo para el tablero, tal y como se puede apreciar en la figura 4 bajo estas líneas.

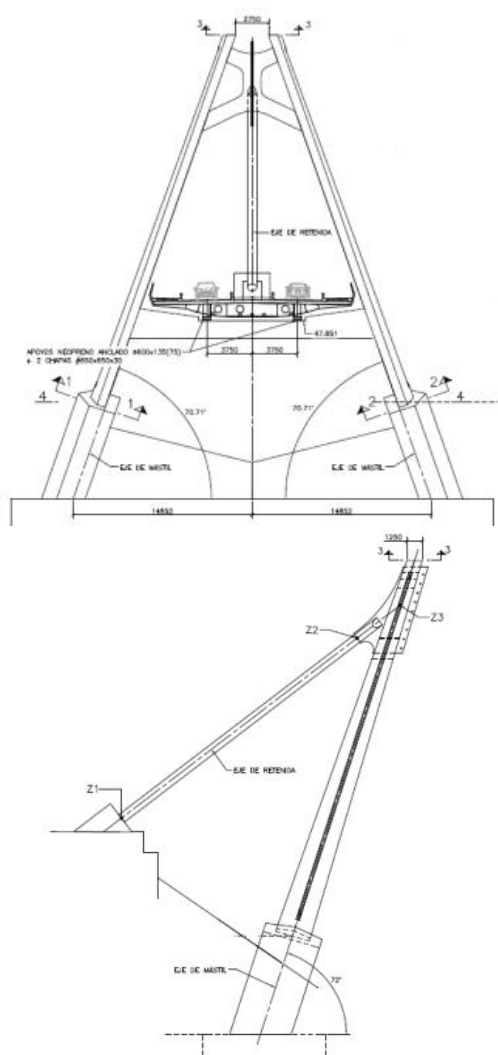


Figura 8. Alzados frontal y lateral del mástil

Los extremos superiores de los fustes se encuentran arriostrados entre sí por medio de la macla cuya descripción e inspiración ha sido previamente explicada. Dicho elemento está compuesto por un conjunto de chapas de acero S 355 J2 de gran espesor, destacando la chapa central de 120 mm de espesor contenida en el plano de simetría longitudinal del viaducto que soporta los anclajes pasivos de los tirantes, materializados por medio de una conexión clásica orejeta-bulón, y la conexión con el tubo de la retenida por medio de un conjunto de soldaduras realizadas por rasante.

Para las comprobaciones tensionales y resistentes de esta pieza se ha desarrollado un modelo de elementos finitos en Abaqus, explicado y comentado en el punto 9 de este artículo.

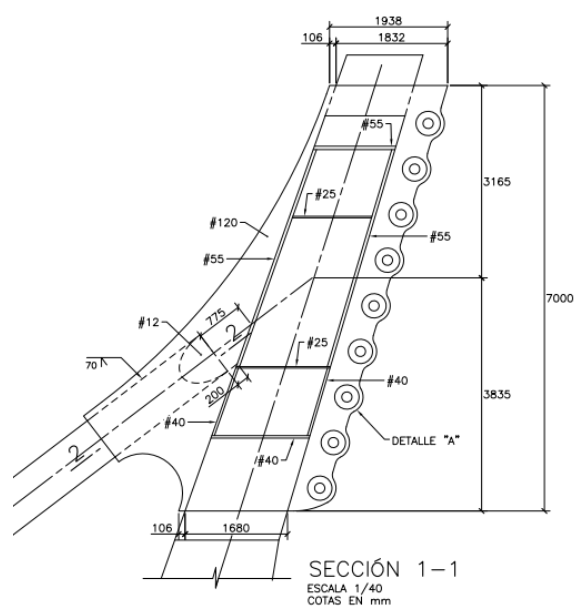


Figura 9. Anclaje pasivo de los tirantes y conexión de la retenida

2.3. Tablero

La sección transversal del tablero alberga una única calzada con dos carriles destinados al tráfico y dos aceras peatonales. Desde el punto de vista estructural, se trata de un cajón mixto multicelular, con un número variable de células

obligado por la variación en planta del tablero, que pasa de 17.8 m en uno de los estribos a 12.8 en el extremo opuesto (figura 6). Esta variabilidad en planta se explica por la necesidad de acomodar el empotramiento de la retenida en el estribo y el consecuente sobreancho necesario en la mediana

El canto del cajón metálico es de 1.15 m, siendo el ancho entre extremos de platabandas superiores de 5.3 m. A la chapa de fondo, convenientemente rigidizada, se le ha conferido cierta curvatura de tal manera que se le resta angulosidad a las líneas del tablero, al igual que se ha hecho en puentes de tipologías similares como son el Viaducto de Escaleritas o el Viaducto de La Arena, con un resultado estético notable.

El número de almas varía a lo largo del puente con la variación de la anchura. En el tramo de anclaje de los tirantes, coincidente con un ancho constante, el cajón cuenta con cuatro almas, albergando entre las dos centrales el anclaje activo de los tirantes (figura 7).

Sobre la sección metálica se dispone una losa de hormigón colaborante de 25 cm de espesor convenientemente conectada al cajón metálico mediante pernos. La losa superior se apoya también sobre un conjunto de jabalcones metálicos, dispuestos en las secciones de marcos transversales, que permiten soportar unos voladizos de 3.65 m al pasar de un funcionamiento de ménsula a una losa apoyada en tres bordes.

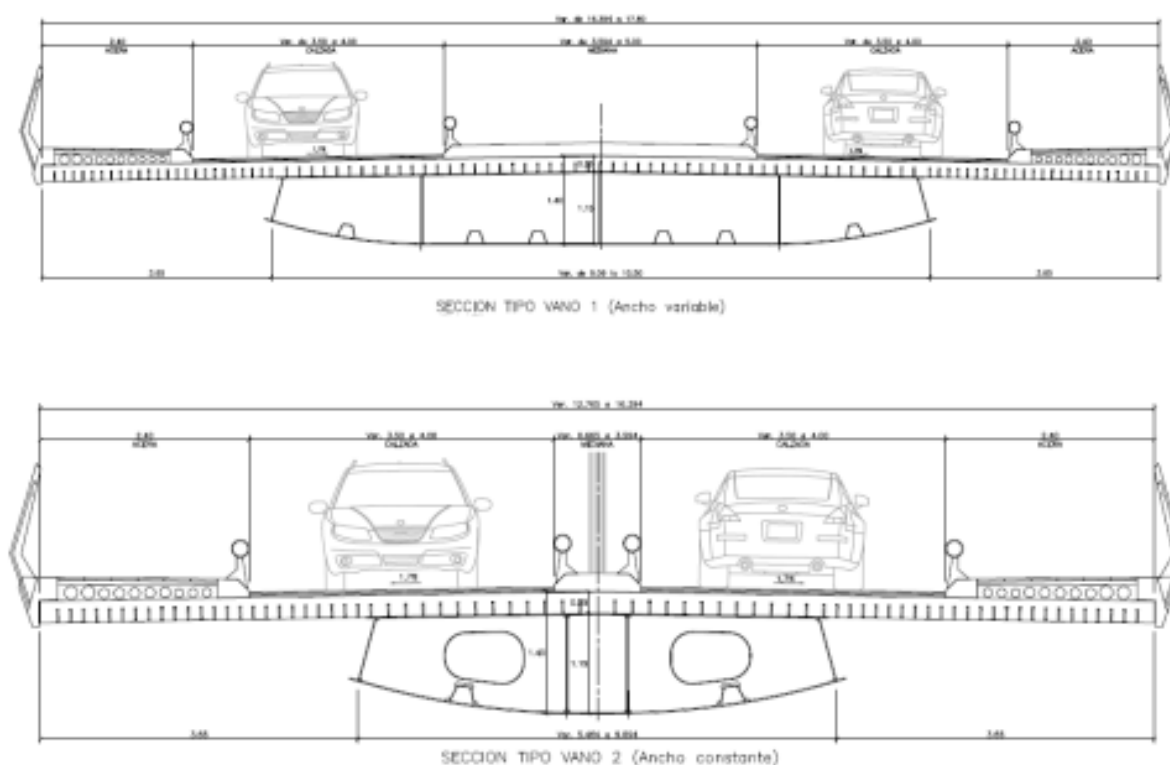


Figura 10. Sección transversal del puente

El cajón se ha proyectado para ser inspeccionable en un futuro, de tal manera que se pueda revisar el estado de conservación de la estructura metálica y los anclajes de los tirantes.

En lo que respecta al reposo del tablero sobre la subestructura, se materializa por medio de tres líneas de aparatos de apoyo elastoméricos

con dos dispositivos por cada eje de apoyos. Al existir un único plano de atirantamiento central, las cargas excéntricas son resistidas gracias a la inercia a torsión del cajón metálico y transmitidos a la subestructura por medio de cada uno de los tres pares de apoyo.

Longitudinalmente, se han dispuesto sendos aparatos de apoyo, de idéntica tipología a los dispuestos para las cargas verticales, entre el tablero y el estribo de retenida para transmitir el axil provocado por el sistema de atirantamiento.

2.4. Atirantamiento y retenida

El sistema de atirantamiento del vano principal se compone de 9 tirantes de 31 cordones de acero de alto límite elástico y 150 mm² de sección (cada cordón).

Los tirantes se disponen en forma de abanico, encontrándose el anclaje activo de los tirantes en el tablero y realizándose el tesado en el hueco entre las dos almas centrales del cajón. En su otro extremo, los tirantes se conectan a una única pieza metálica central mediante una conexión típica de orejetas y bulones (figura 7).

La retenida es rígida y se ha planteado como un tubo de acero anular de 762 mm de diámetro exterior y 90 mm de espesor, conectado al elemento central del mástil mediante soldaduras realizadas por rasante (figura 7) y anclada en el estribo por medio de cables de pretensado a un muro central de gran espesor, garantizando la compresión de la conexión en todos los estados de cálculo.

2.5. Estribos

Si bien el funcionamiento de todos los elementos estructurales de un puente de esta tipología es interdependiente, es en el estribo de retenida y su cimentación en el que se aglutina el esquema de fuerzas resistentes: axil del tablero, reacciones de los mástiles y axil de la retenida. Por este motivo, se proyecta como un componente

masivo, con muros y cimentación de gran espesor.

En contraposición, el estribo de salida tiene un funcionamiento convencional con el tablero, siendo necesaria la existencia del par de fuerzas otorgado por sus apoyos para resistir la torsión del tablero, por lo que se ha proyectado como dos fustes exentos tras los que se ejecuta la contención de tierras.

2.6. Proceso constructivo

Al tratarse de una vaguada de altura limitada, se plantea montar el tablero metálico apoyado en torres una vez se haya finalizado la ejecución de la subestructura (mástil y estribos) donde también reposa en fase metálica.

Una vez soldados los diferentes tramos del cajón, se disponen las prelosas colaborantes sobre la estructura metálica y se vierte el hormigón de la losa. De este modo, en las siguientes fases de tesado, el axil de compresión será resistido por la sección mixta, contando con la contribución a compresión de la losa.

Una vez hormigonado el tablero se procede al tesado de los tirantes, comenzando por el más tendido. Cada tres tirantes tesados, se retira una de las torres provisionales hasta que se produce la entrada en carga de todo el sistema del puente.

Finalmente, se procede a la ejecución de aceras, al vertido del aglomerado asfáltico que actuará de pavimento y a la colocación de barreras, impostas y elementos de iluminación.

2.7. Modelo de cálculo general

Se ha desarrollado un modelo de cálculo de elementos finitos. En dicho modelo se incluyen elementos tipo barra, cable, lámina y muelles. Por ejemplo, todos los elementos lineales: tablero, mástil, retenida y pilotes se introducen como vigas con su sección correspondiente. Por otra parte, encepados y alzados del estribo

número 1, así como la macla de anclaje superior, se modelizan como elementos tipo shell o lámina por la importancia de su comportamiento tridimensional.

Se incluye en el modelo la elasticidad del terreno en función de la estratigrafía presente, el proceso constructivo teniendo en cuenta la

sección evolutiva del tablero y la influencia de los efectos de segundo orden durante el proceso constructivo y en servicio.

La construcción se ha iniciado en septiembre de 2019 y está prevista su finalización en un plazo de 18 meses.

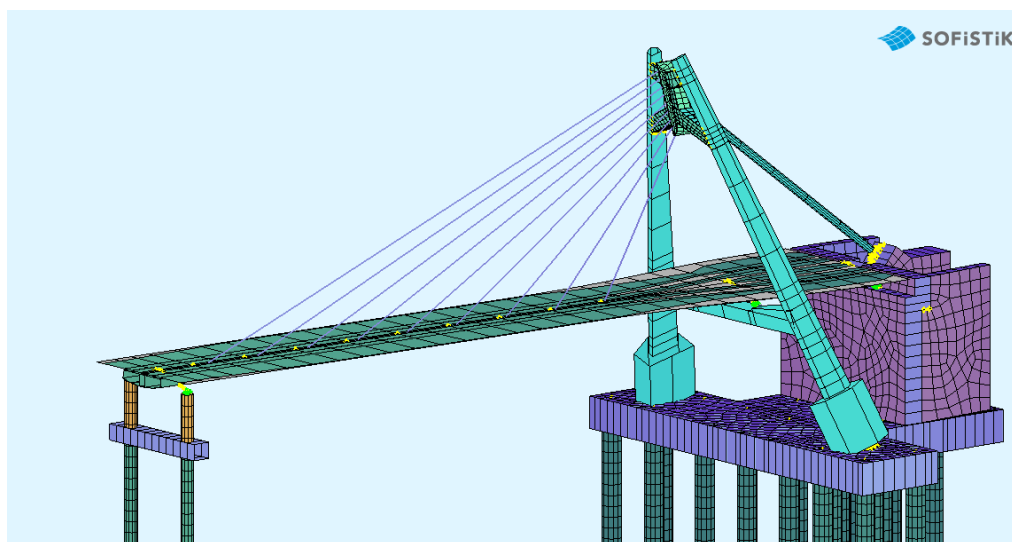


Figura 11. Modelo de cálculo global

Referencias

- [1] Arenas, JJ.: El puente de Hispanoamérica sobre el río Pisuerga en Valladolid. Hormigón y Acero, nº 214 (199).
- [2] Pantaleón, M., Ramos, O.R. et al.: Viaducto de Escaleritas en Las Palmas de Gran Canaria. Hormigón y Acero, nº 244 (2007).
- [3] Ramos, O.R., Pereira, RR. et al.: Puente Atirantado TrengTreng-KayKay en Temuco (Chile), VII Congreso de ACHE, La Coruña (2017).