

Pasarela Peatonal desde el sector Roza Martín al Casco Urbano de Majadahonda, Comunidad de Madrid

*Pedestrian Footbridge from the Roza Martín district to Majadahonda town center,
Community of Madrid*

José Romo Martín^a, Julio Sánchez Delgado^b, Javier Milian Mateos^c,
María Martín Bello^d y David Sanz Cid^e

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR Ingenieros Consultores. CEO. jrm@fhcor.es

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR Ingenieros Consultores. Director Técnico. jsd@fhcor.es

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR Ingenieros Consultores. Jefe de Proyecto Obra Civil. jmm@fhcor.es

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. FHECOR Ingenieros Consultores. Jefa de Proyecto Obra Civil. mmb@fhcor.es

^e Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Cesma Ingenieros, S.L. Ingeniero. cesma@cesmaing.com

RESUMEN

La nueva pasarela comunicará peatonalmente los sectores Roza Martín y Los Satélites con el casco urbano de Majadahonda sobre la glorieta de intersección de las carreteras M-503 y M-516. La solución proyectada consiste en una pasarela colgante formada por un cajón cerrado metálico continuo, con luces de 20.0 + 140.0 + 20.0 m, con trazado curvo en planta. El sistema de cuelgue está formado por cables principales y péndolas dispuestos solamente en el borde del tablero exterior de la curva, aprovechando la sustentación excéntrica para compensar la torsión de la curva en planta. El mástil se sitúa en el lado exterior de la curva y está formado por una sección circular metálica.

ABSTRACT

The new footbridge will provide a pedestrian connection between the Roza Martín and Los Satélites districts and the town center of Majadahonda over the intersection of the M-503 and M-516 roads. The projected solution consists of a suspension footbridge formed by a continuous steel box deck, with span lengths of 20.0 + 140.0 + 20.0 m, with a curved layout in plan. The suspension system consists of main cables and hangers arranged only at one edge of the deck, at the outer edge of the curve, taking advantage of the eccentric support to compensate for the torsion of the curve. The mast is located at the outer side of the curve and consists of a circular steel section.

PALABRAS CLAVE: pasarela peatonal, colgante, metálica.

KEYWORDS: footbridge, suspension bridge, steel made.

1. Introducción

El Ayuntamiento de Majadahonda ha impulsado en los últimos años diversas iniciativas para mejorar la conexión y promover la integración de la zona oeste del municipio con el casco

urbano. En esta área oeste se encuentran los sectores Roza Martín y Los Satélites, ambos predominantemente residenciales. Estas zonas están separadas del casco urbano de

Majadahonda por las vías de la M-50 y la carretera M-516, mientras que su límite norte lo marca la carretera M-503. Estas infraestructuras viarias generan una brecha territorial significativa, dificultando considerablemente la comunicación peatonal entre estos sectores y el casco urbano.

Con el objetivo de garantizar un tránsito peatonal seguro y fluido, el Ayuntamiento aprobó en el verano de 2016 la contratación para la redacción del proyecto de una pasarela peatonal. Consciente de la importancia y singularidad de esta infraestructura, se estableció como premisa fundamental no solo un diseño técnicamente sólido, sino también una propuesta con un marcado carácter plástico. La intención es que la pasarela no solo cumpla su función práctica, sino que se convierta en un referente visual para los conductores al acceder a Majadahonda.

2. Las ideas iniciales

Como es habitual en el diseño de pasarelas, fue necesario realizar un estudio detallado de los flujos peatonales y, en consecuencia, un análisis de las posibles soluciones para la disposición en planta de la estructura. La solución finalmente seleccionada se muestra en la Figura 1. En planta, la estructura describe una curva con un radio de 300 m, y el centro de la estructura se dispone muy próximo al centro de la glorieta.

Para superar la glorieta y sus ramales de acceso, cumpliendo con el galibo vertical requerido (5.50 m), se diseñaron dos rampas en tierra con la configuración indicada en planta. Estas rampas, construidas mediante terraplén y muros, permiten optimizar costos al evitar espacios perdidos bajo la estructura, los cuales suelen generar problemas funcionales o estéticos.



Figura 1. Vista en planta.

Definido el trazado en planta, se analizaron diversas alternativas estructurales (ver Figura 2). La primera opción consistía en un tablero apoyado en varios puntos dentro de la glorieta, configurado como una viga continua con múltiples apoyos. Esta solución quedó descartada debido a razones de seguridad vial, ya que se buscó evitar la instalación de pilas en las proximidades de las vías de circulación.



Figura 2. Alternativas estructurales estudiadas.

Las dos soluciones restantes planteaban un único soporte central ubicado muy cerca del centro de la glorieta. La primera incluía una pila inferior en forma de "V" para reducir la luz del tablero, complementada con un sistema de atirantamiento. La segunda, que fue la opción

finalmente adoptada por el Ayuntamiento, corresponde a una estructura colgante con un mástil central único. Esta solución no solo optimiza el diseño estructural, sino que también aporta un elemento estético distintivo al entorno urbano.

3. Propuesta conceptual

La solución elegida por el Ayuntamiento (ver Figura 3) consiste en una estructura colgante con un único mástil central. La suspensión se realiza desde el lado exterior de la curva, mediante un mástil con sección circular que se estabiliza gracias a dos cables de retenida anclados a las cimentaciones. Los cables principales se anclan al tablero por su lado externo. En prolongación de esa parte suspendida el tablero tiene un vano corto de compensación a cada lado del tramo colgado. De esta forma se reduce notablemente la luz de torsión y también las deformaciones en el tablero. Las pilas intermedias están formadas por dos fustes circulares que se conectan de manera monolítica al tablero. Asimismo, el tablero se empotra en las cabezas de los estribos,

configurando una estructura monolítica, sin juntas ni aparatos de apoyo.

4. Comportamiento estructural

El tablero funciona esencialmente como una estructura colgante [1][2]. Dada la proximidad de los puntos de anclaje de los cables al tablero respecto a los estribos, la mayor parte de la carga horizontal generada se transmite como tracción directamente a la cabeza de los muros de los estribos. Esto permite liberar al tablero metálico de esfuerzos de compresión significativos.

El momento de eje vertical, que se genera por la excentricidad de los anclajes de los cables respecto al eje del tablero, alcanza su valor máximo en las zonas próximas a los puntos de anclaje y disminuye progresivamente hasta cambiar de signo en las cercanías del mástil central. Este comportamiento es debido a la geometría en planta de la pasarela y por la componente horizontal de los cables, que compensan el momento local introducido en los puntos de anclaje.



Figura 3. Vista de la solución.

5. Descripción de la estructura

La suspensión excéntrica del tablero (por el borde exterior) genera además un momento torsor que es máximo en las secciones de las pilas y desaparece en las inmediaciones del mástil central. Este momento torsor produce esfuerzos axiales de signo contrario en los fustes de las pilas: compresión en los fustes interiores (orientados hacia el centro del arco de circunferencia) y tracción en los fustes exteriores.

La curva en planta permite disminuir los esfuerzos axiales producidos por los acortamientos y alargamientos térmicos al estar el tablero empotrado en los estribos, que son elementos muy rígidos.

Los esfuerzos de torsión a los que se ve sometido el tablero de la pasarela bajo la carga permanente producen unas deformaciones que se han compensado definiendo una contraflecha de montaje diferente entre los bordes interior y exterior de la curva en planta.

La estructura planteada consiste en una pasarela colgante compuesta por un tablero continuo con una distribución de luces de: 20.0 + 140.0 + 20.0 m (ver Figura 4). El trazado en planta consiste en un trazado curvo de 300 m de radio con una longitud de 140 m, y dos rectas situadas a ambos lados de la curva de 20 m de longitud cada una (ver Figura 5).

El trazado en alzado se ha diseñado respetando el gálibo mínimo de 5.50 m en los bordes de la calzada. El alzado de la pasarela presenta un trazado no simétrico, con una pendiente de llegada a los estribos de 2.99% al E-1 y de 6.00% a E-2. Tanto la pasarela como los accesos poseen una pendiente transversal del 2.00%.

El tablero consiste en un cajón cerrado metálico [3] de 4.0 m de ancho y 0.70 m de canto con dos almas interiores y rigidizadores longitudinales en ambas alas superior e inferior (ver Figura 6). Dispone de diafragmas transversales cada 2.1 o 2.2 m aproximadamente.

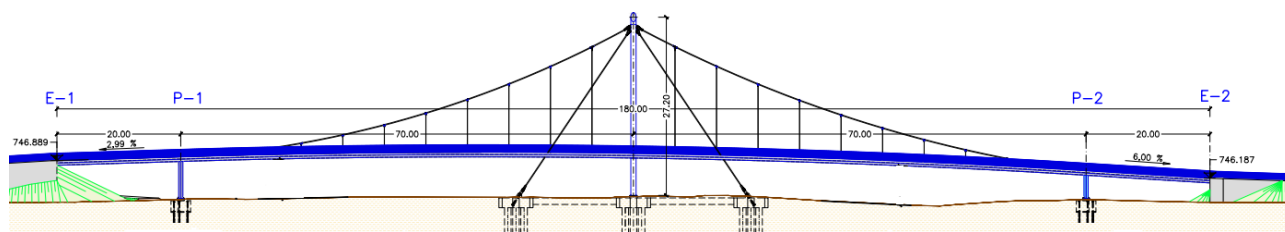


Figura 4. Alzado de la pasarela.

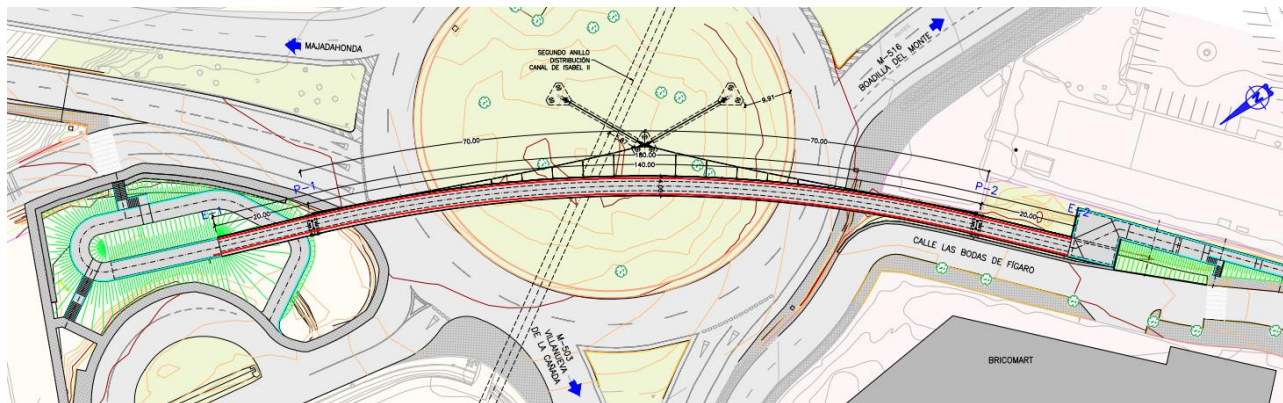


Figura 5. Planta de la pasarela.

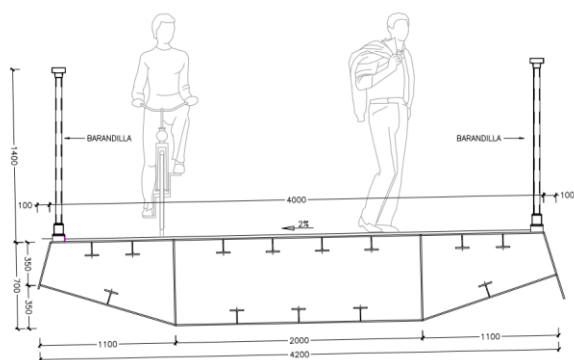


Figura 6. Sección tipo.

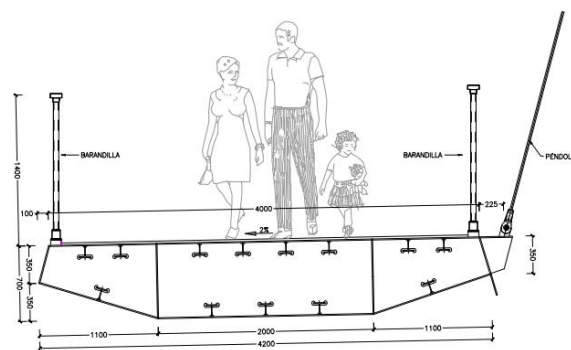


Figura 7. Sección tipo por péndola.

El sistema de cuelgue está formado por cables principales y péndolas que se disponen solamente en el borde del tablero exterior de la curva en planta. Los cables principales, situados en un plano inclinado, tienen un desarrollo parabólico, funicular de las cargas verticales (ver Figura 9). Todos los cables son cerrados galvanizados triple Z [4]. Los dos cables principales poseen una sección nominal $\phi 100\text{mm}$.

El tablero se conecta a cada uno de los dos cables principales en diez puntos. En cada una de las conexiones parten en forma de voladizo unas costillas de sección variable hasta intersectar con el plano del cable (ver Figura 7). Desde este punto y hasta el cable se dispone unas péndolas de sección nominal $\phi 40\text{mm}$ en las dos centrales, las más largas y con mayor área tributaria de tablero, y $\phi 21\text{mm}$ en las restantes.

La conexión entre las péndolas y el cable se realiza mediante unas abrazaderas atornilladas al cable y que presentan una unión bulonada con la péndola para evitar la introducción de momentos en el cable (ver Figura 8).

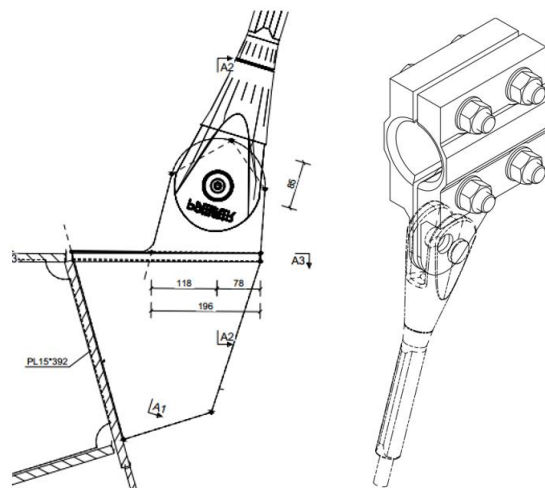


Figura 8. Típicas conexiones de péndolas a tablero y cable principal.

A su vez, se disponen también dos tirantes traseros a modo de retenida del sistema de cuelgue, ambos de sección nominal $\phi 100\text{mm}$. Las pilas a cada lado del vano principal poseen dos fustes y están formadas por una sección circular metálica de 298.5 mm de diámetro y 30 mm de espesor. La cimentación de éstas está formada por un encepado de 1.70 m de canto sobre 12 micropilotes de diámetro de perforación de 225 mm y tubo metálico $\phi 127 \times 9\text{ mm}$ (ver Figura 10).

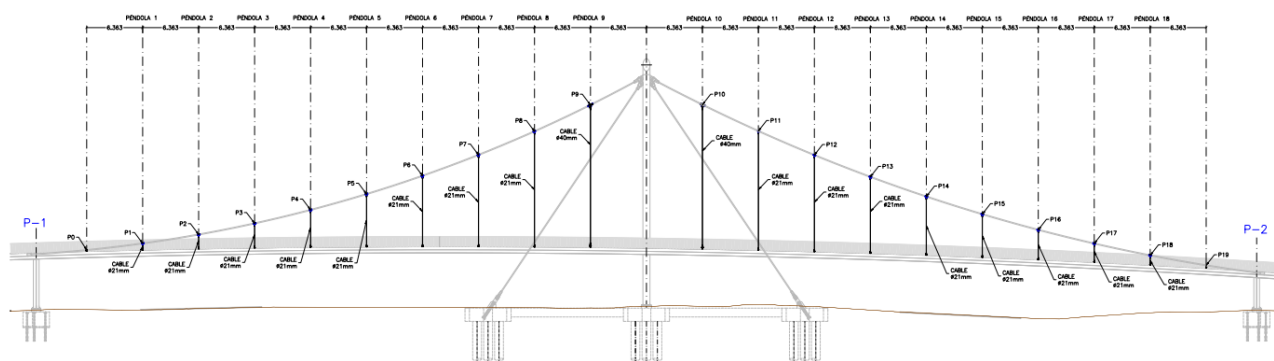


Figura 9. Alzado del sistema de cuelgue.

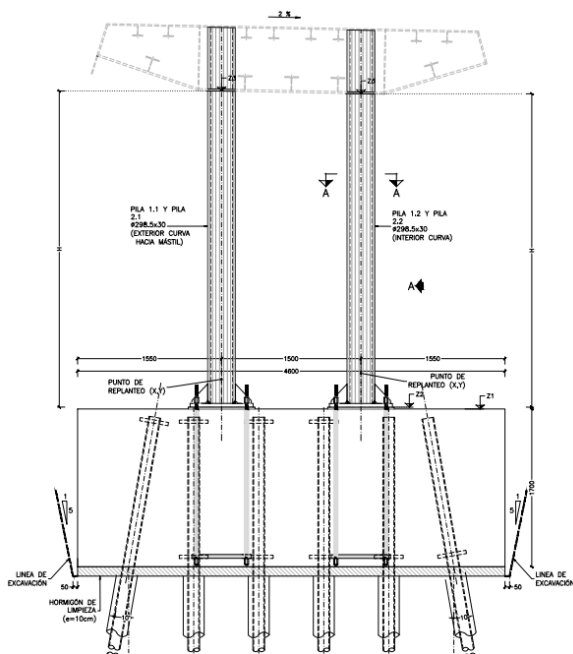


Figura 10. Pilas.

Otro elemento esencial de la pasarela es el mástil, que se sitúa en el lado exterior de la curva. El mástil está formado por una sección circular metálica de diámetro 800 mm y 40 mm de espesor. Su altura sobre la glorieta es de 26.1 m (ver Figura 11). Al mástil se anclan en cabeza los cables principales y las retenidas. La geometría se ha definido de modo que bajo la hipótesis de carga permanente las cargas horizontales transmitidas por los cuatro cables se compensen, de modo que las flexiones sobre el mástil sean mínimas.

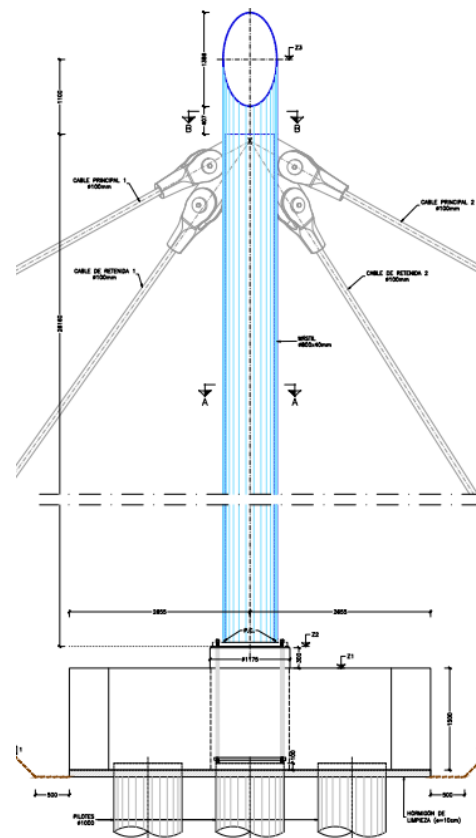


Figura 11. Mástil.

Las cimentaciones tanto del mástil como de las retenidas están formadas por encepados de 3 pilotes de 1.00 m de diámetro. Estos encepados están unidos por unas vigas de atado cuyo objetivo es el de transmitir las fuertes componentes horizontales de las retenidas a los pilotes comprimidos del mástil, de modo que los traccionados de las retenidas, menos rígidos, se vean sometidos a menores flexiones (ver Figura 12).

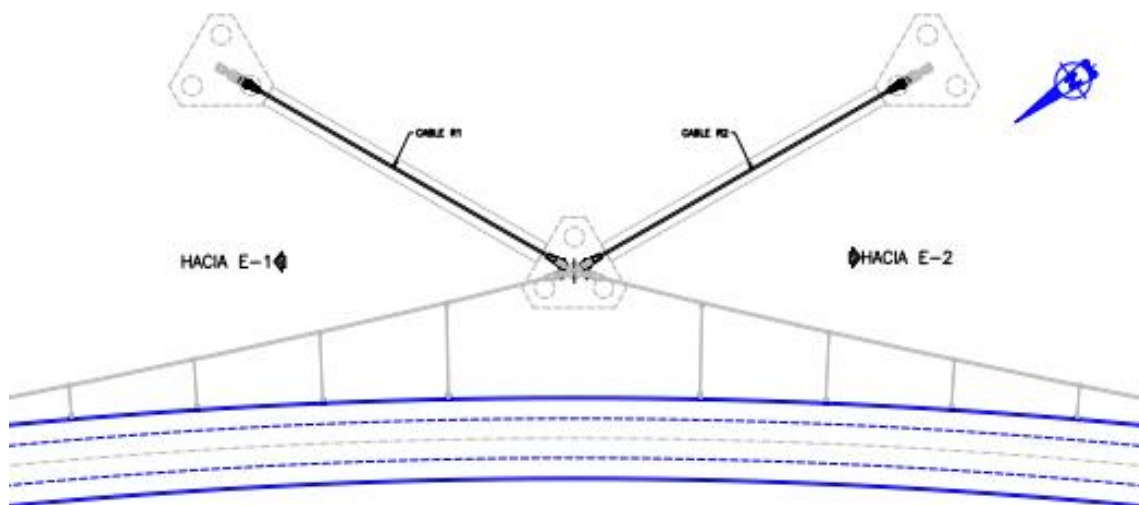


Figura 12. Planta de cimentaciones de mástil y retenidas.

La conexión entre el tablero y los estribos, al igual que entre el tablero y las pilas, es rígida, sin la disposición de apoyos ni juntas de dilatación. La función de los estribos es fundamental en esta pasarela puesto que tienen que recibir las fuertes tracciones introducidas por los cables principales y transmitírselas al terreno. Esta transmisión de la tracción entre el tablero y el estribo se realiza mediante barras de acero pasivo soldadas al tablero y ancladas en el hormigón del estribo (ver Figura 13).

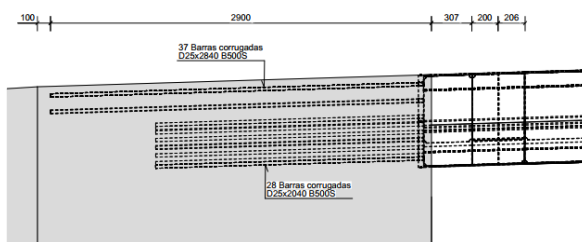


Figura 13. Anclaje entre tablero y estribos.

El estribo, finalmente, transmite la tracción al terreno a través del rozamiento, por lo que los estribos deben ser necesariamente pesados [5]. Para ello se diseña el estribo E-1 con muros en vuelta de 23 m de longitud y altura variable de hasta casi 7 m, y rellenando con tierras el espacio entre los muros para incrementar aún más su peso (ver Figura 14). El impacto visual, sin embargo, se mitiga integrando la geometría del estribo con la rampa de acceso, y disponiendo taludes de tierras a los lados que lo esconde parcialmente.

El estribo E2 adapta su geometría al trazado en planta de la rampa de acceso de la pasarela. También dispone de muros en vuelta y relleno, en este caso, de hormigón ciclópeo. La longitud es de 22 m y la altura variable hasta casi 6 m.

En ambos estribos se dispone una losa de hormigón armado sobre los muros en vuelta para alojar las rampas de acceso.

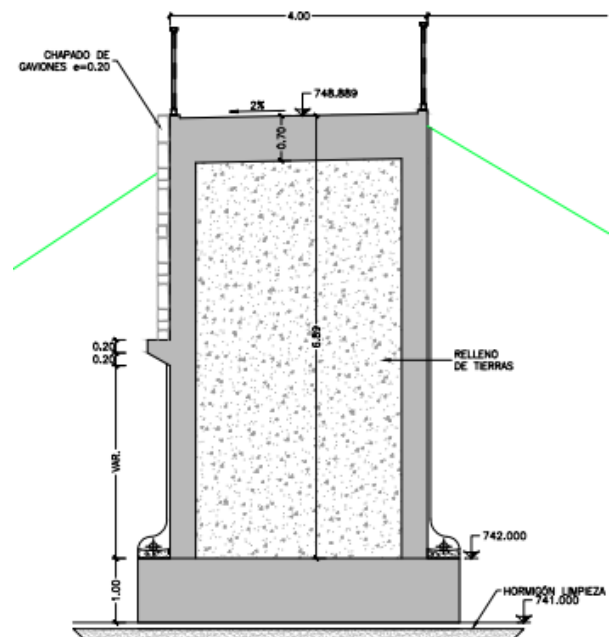


Figura 14. Sección tipo del estribo E1.

6. Modelización

Para el cálculo de la estructura se realizó un primer encaje de la geometría mediante el uso de Grasshopper/Rhino y Sofistik. Se iteraron varias variables como la posición del mástil y anclaje de retenidas respecto al tablero, y la altura del mástil, hasta alcanzar el equilibrio óptimo bajo carga permanente (ver Figura 15).

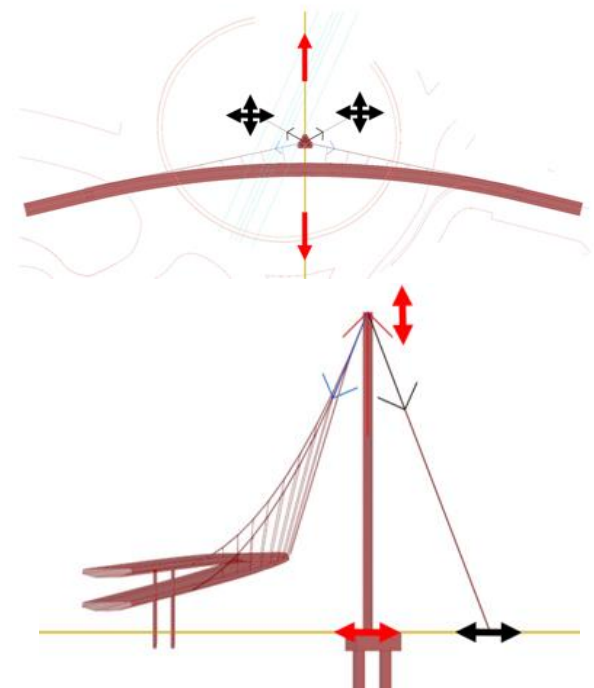


Figura 15. Encaje de la estructura mediante Grasshopper/Sofistik.

Posteriormente, y a partir de la geometría inicial encajada previamente, se desarrolló un modelo de elementos finitos tipo barra tridimensional mediante el programa SOFISTIK para el análisis del resto de las sobrecargas. El modelo incluía el tablero, cables, péndolas, pilas y mástil (ver Figura 16). Todos los cálculos se realizaron mediante análisis no lineal iterativo en grandes desplazamientos (Th3).

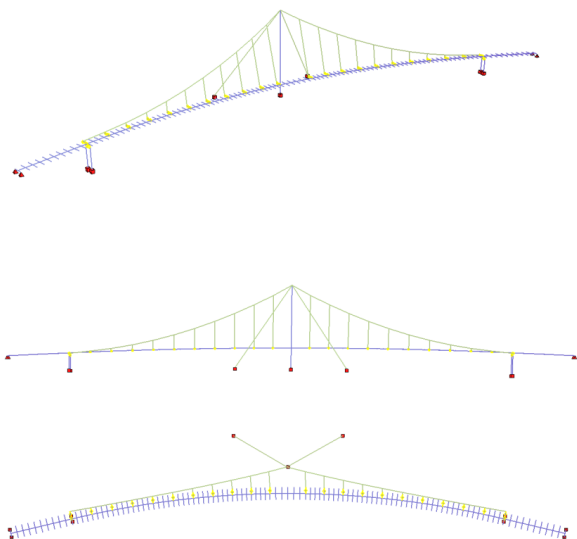


Figura 16. Modelo de cálculo empleado en Sofistik.

7. Proceso constructivo

Para el montaje de la pasarela se consideró la puesta en carga simultánea de todos los cables mediante el tesado simétrico de los cables de retenida del pilono. Para ello, se definieron diferentes fases de instalación de los cables sin carga inicial y se dispuso una rótula provisional en la base del pilono (ver Figura 17), con el objetivo de permitir la transmisión directa de la fuerza de tesado de los cables de retenida a los cables principales sin la intervención de la rigidez a flexión del pilono. Adicionalmente, el pilono se instaló con un desplome inicial de la coronación hacia el tablero de la pasarela de 60 cm, con objeto de compensar los movimientos producidos durante el tesado de los cables de retenida para la puesta en carga del sistema de cables.

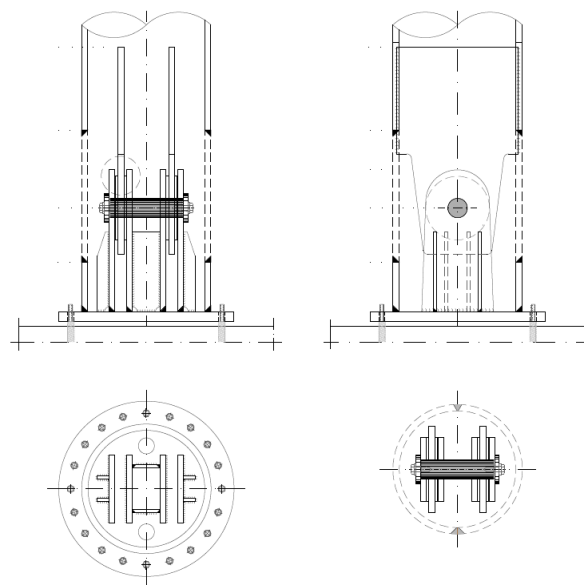


Figura 17. Rótula provisional en base de pilono.

El proceso constructivo realizado consistió: en primer lugar, se realiza la ejecución de cimentaciones, pilas y estribos y se monta la totalidad del tablero metálico apeado sobre 6 torres provisionales. Posteriormente, se realiza el montaje del pilono, articulado provisionalmente en su base, con un sistema de arriostramiento provisional para garantizar su estabilidad durante las fases de instalación de los cables (ver Figura 18), que se describen a continuación.



Figura 18. Pilono con arriostramiento y cables de retenida.

Inicialmente se instalaron secuencialmente ambos cables de retenida con una carga de 70 kN y ambos cables principales con cargas de 110 y 130 kN respectivamente, que equivalen a las tensiones resultantes en los cables por su peso propio al anclar las horquillas extremas en las orejetas de pilono y tablero situadas en su posición inicial, sin considerar ningún tesado adicional (ver Figura 19).



Figura 19. Instalación del primer cable principal.

Para la obtención de la geometría inicial de los cables y su longitud de corte e instalación, se consideraron tanto las contraflechas de montaje previstas para el tablero como el desplome o contragiro inicial del pilono.

Una vez instalados los cables principales y los cables de retenida es posible retirar el sistema de arriostramiento provisional del pilono, ya que el sistema es autoestable, y proceder a la instalación de las péndolas, que se realizó de forma secuencial y simétrica desde el pilono hacia los estribos. Las péndolas se instalaron sin tesado inicial, más allá de la fuerza necesaria para vencer el peso propio y llevar la horquilla de anclaje inferior a su posición en las orejetas del tablero.

Con todos los cables instalados se procedió al tesado simultáneo de ambos cables de retenida hasta una carga final de 1800 kN, permitiendo levantar el tablero de las torres provisionales y recuperar el desplome inicial del pilono hasta su posición vertical definitiva (ver Figuras 20 y 21). El tesado se realizó por escalones de 200 kN comprobando al final de cada escalón la posición del pilono, la posición del tablero y la carga en las péndolas.



Figura 20. Tesado de cables de retenida.

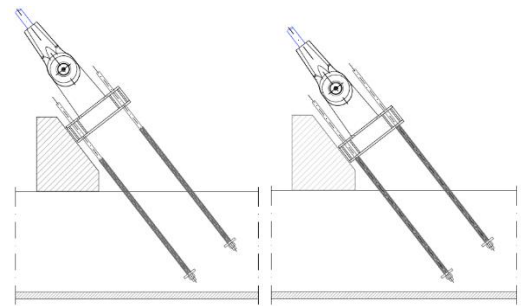


Figura 21. Desplazamiento del anclaje de retenida durante el tesado.

Con el sistema de cables puesto en carga y el pilono y tablero en su posición definitiva, se procedió al empotramiento definitivo de la base del pilono y al hormigonado de los plintos situados tras los anclajes de los cables de retenida para proceder al tesado final de las barras que sujetan las placas de anclaje de estos cables.

Finalmente, se realizó la instalación de las barandillas y la ejecución del resto de acabados de la estructura.

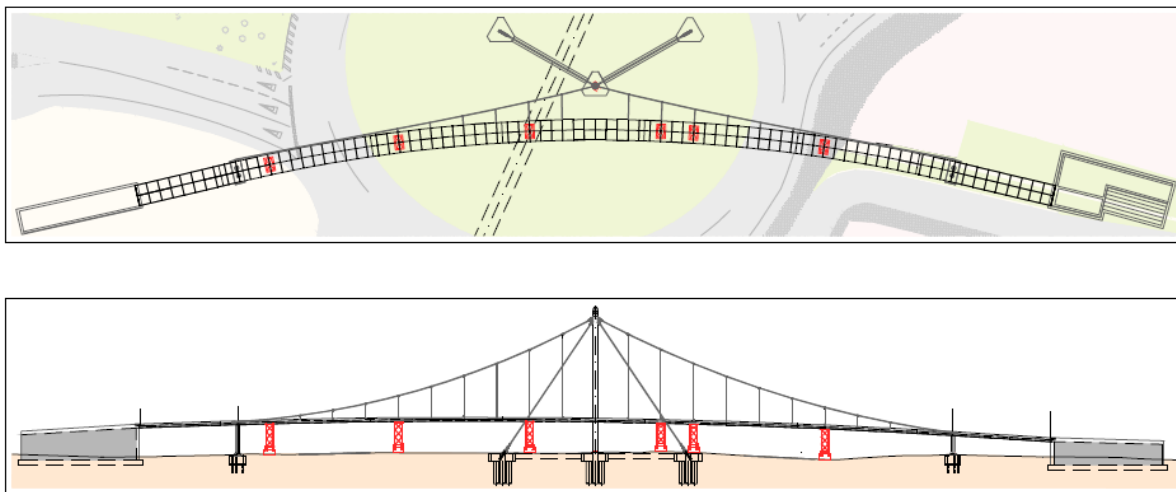


Figura 22. Planta y alzado de la pasarela durante el proceso de montaje.



Figura 23. Pasarela durante la construcción, tras el desapeo de las torres provisionales.

Agradecimientos

Agradecer a Becsa Simetría, a cargo de la construcción de la pasarela, el trabajo realizado y su aportación documental y técnica para la elaboración del presente artículo.

Referencias

- [1] Strasky, J.(2011). Stress Ribbon and Cable-Supported Pedestrian Bridges. Second ed. ICE Publishing
- [2] Corres, H. Romo, J. (1996). Aspectos específicos del diseño y análisis de puentes colgantes de luces bajas y medias. Asamblea ATEP, Logroño 1996.
- [3] Romo, J.; Martín Canueto, M. (2005).Pasarela sobre el río Carrión (Palencia). III Congreso de ACHE de puentes y estructuras, Zaragoza.
- [4] CEN/AENOR (2015). UNE-EN 1993-1-11. Eurocódigo 3. Proyecto de estructuras metálicas. Parte 1-11: Cables y tirantes.
- [5] Romo, J.; Schlaich, M.; Corres, H.(1995). Análisis de grandes elementos de hormigón armado. Aplicación práctica del método de las bielas y tirantes. Revista Hormigón y Acero Vol. 46 Num. 195.