

Pasarela sobre el río Tajo en Trillo

Footbridge over the Tagus River in Trillo

Juan Luis Bellod Thomas^a, Javier San Román Galán^b

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

^b Arquitecto. Cesma Ingenieros, S.L. Arquitecto. cesma@cesmaing.com

RESUMEN

La pasarela sobre el río Tajo en Trillo sustituye a una estructura previa, en mal estado. Tras eliminar dos de las pilas existentes, mejorando la sección hidráulica, la nueva pasarela se apoya en la subestructura existente, de sillería, mediante piezas de hormigón de compleja geometría. La pasarela cuenta con dos vanos, de 43 m y 23 m, resueltos mediante una estructura mixta con un arco superior ($f/L = 1/8$) y con una viga en vientre de pez ($h/L = 16$), respectivamente para cada vano. El tablero se resuelve con un cajón metálico, jabalcones y un forjado mixto con chapa grecada colaborante. La actuación contempla también el acondicionamiento de los accesos y la rehabilitación de los muros, mejorando el entorno.

ABSTRACT

The footbridge over the Tagus River in Trillo replaces a previously existing structure, which features a bad state. After removing two of the existing piers, improving the hydraulic section, the new footbridge is supported on top of the existing ashlar substructure by means of concrete pieces of complex geometry. The footbridge features 2 spans, of 43 m and 23 m, with a composite structure including a top arch ($r/S = 1/8$) and a fish bellied girder ($h/L = 16$), respectively for each span. The deck is solved using a steel box girder, transverse beams and a composite deck with profiled sheeting. The intervention includes the reconditioning of the approaches as well as the rehabilitation of the walls, improving the environment.

PALABRAS CLAVE: pasarela, rehabilitación, estructura mixta, arco, estructuras de fábrica.

KEYWORDS: footbridge, rehabilitation, composite structure, arch, masonry structure.

1. Introducción

El proyecto de rehabilitación de la pasarela que comunica el balneario Carlos III con el complejo de turismo rural El Colvillo, ubicada en el municipio de Trillo (Guadalajara), busca restablecer la conexión entre ambos espacios, garantizando la permeabilidad entre las dos márgenes del río Tajo. La pasarela existente estuvo cerrada durante muchos años debido a su mal estado, lo que obligaba a dar un gran rodeo, en muchos casos no accesible para peatones, para conectar ambos puntos. Fig. [1].



Figura 1. Pasarela existente en estado semirruinoso

La actuación contempla no solo la rehabilitación de la pasarela, sino también la

reurbanización de los accesos, que se encontraban en un estado de degradación importante, con muros de fábrica inestables, vegetación invasiva, tierra suelta, etc.

2. Condicionantes

Al tratarse de un proyecto de rehabilitación, el principal condicionante es la presencia de una estructura existente, de la cual resulta necesario valorar su estado, con objeto de determinar qué elementos se encuentran en buenas condiciones, cuáles presentan un deterioro reparable y cuáles resulta necesario demoler. Fig. [2].

Tras valorar el estado de la estructura existente, se concluyó que tanto las pilas, en especial la pila central, como los estribos, se encontraban en buen estado, presentando la fábrica un buen comportamiento y apariencia, siendo necesario realizar únicamente reparaciones localizadas. Sin embargo, se determinó que la superestructura mostraba signos de degradación irreversible, con corrosión generalizada y fisuras localizadas en gran número de elementos metálicos, así como un tablero de bovedilla cerámica y hormigón con gran número de boquetes y desconchados. Por otro lado, los muros de contención de las rampas de acceso presentaban una fábrica muy distinta a la de las pilas y los estribos, con mayor grado de deterioro en amplias zonas, especialmente en la margen derecha.

Todo ello sirvió para adoptar la decisión de conservar los estribos y la pila central, realizando únicamente una demolición parcial de la coronación, donde la fábrica era de peor calidad, así como los muros de acceso, si bien realizando las reparaciones que resultasen

necesarias en las zonas más degradadas. Por el contrario, se dictaminó la demolición de la superestructura al completo y de las dos pilas restantes. Fig. [3].

Por otro lado, al tratarse de una estructura existente, tanto la traza como los puntos de arranque de la pasarela quedan predefinidos. Asimismo, resulta necesario reponer los servicios que cruzan el cauce a través de la estructura existente.

Adicionalmente, al ser una obra sobre el río Tajo, la Confederación Hidrográfica introdujo severas restricciones para dar luz verde a la ejecución de la rehabilitación. Entre otras, se imposibilitó la disposición de apoyos adicionales provisionales o definitivos sobre el cauce principal del río, así como cualquier reducción de la altura mínima libre sobre el cauce. Adicionalmente, se establece la necesidad de eliminar apoyos existentes para mejorar la sección hidráulica. Asimismo, la CH Tajo obligó a establecer un control muy estricto respecto a las demoliciones y a los posibles residuos que pudieran caer al cauce como consecuencia de dichas operaciones, lo que obligó a retirar la superestructura existente mediante grúa.

Finalmente, como último condicionante representativo cabe mencionar que la pasarela conecta dos entornos completamente distintos, con diferentes usos y morfologías de urbanización, por lo que las actuaciones en ambas márgenes debían cumplir con el reto de generar un espacio atractivo, que dotase de cohesión a la actuación y crease un cierto hito en esta zona, algo degradada entonces, del municipio de Trillo. Por ello, se buscó una estructura esbelta y visualmente permeable, que ensalzase el paisaje a su alrededor.

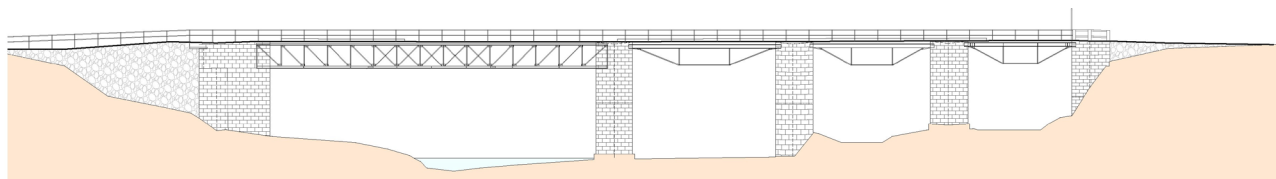


Figura 2. Alzado de la pasarela existente

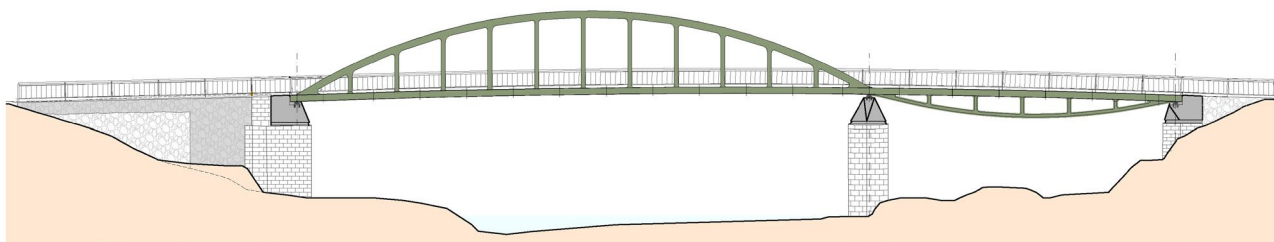


Figura 3. Alzado de la nueva pasarela

3. Concepción estructural y descripción de la superestructura

Los condicionantes citados anteriormente fueron resueltos mediante la definición de una estructura mixta de 66 m de longitud y 5 m de ancho, formada por 2 vanos de 43 m y 23 m, respectivamente, resuelta mediante un arco superior, fig. [4], para el vano de mayor luz, y una viga en vientre de pez para el vano de luz menor, fig. [5], con un arco como elemento inferior traccionado.

El tablero se define por medio de un cajón metálico de 1.5 m de ancho y 0.5 m de canto, con almas verticales, que se conecta al forjado mixto por medio de los pernos conectadores situados en la platabanda superior. De ambos lados del cajón nacen jabalcones con una separación de 3.5 m, que se rematan en ambos extremos por una chapa plegada lateral, que sirve además como encofrado durante el vertido del hormigón del forjado y de elemento soporte para la barandilla. Estos jabalcones quedan resueltos mediante vigas armadas con sección doble T de canto variable desde los 0.5 m hasta los 0.24 m. El forjado mixto presenta un espesor total de 0.12 m con un bombeo del 2% que permite la evacuación de las aguas pluviales hacia las canaletas laterales. Este forjado se resuelve mediante la colocación, previamente en taller, de una chapa grecada colaborante de 58 mm de canto. Al forjado se le da un acabado de hormigón desactivado.

Asimismo, dentro del tablero se reponen los servicios existentes, para lo que se disponen pasatubos en todos los diafragmas.

Por su parte, el arco superior presenta una flecha máxima de 5.5 m, lo que se corresponde con una relación flecha/luz de $f/L = 1/8$, con un cordón superior que queda conformado por una sección rectangular de 0.3x0.5 m y con montantes verticales de sección cuadrada 0.3x0.3 m, con una separación de 3.5 m entre sí, coincidente con los jabalcones.

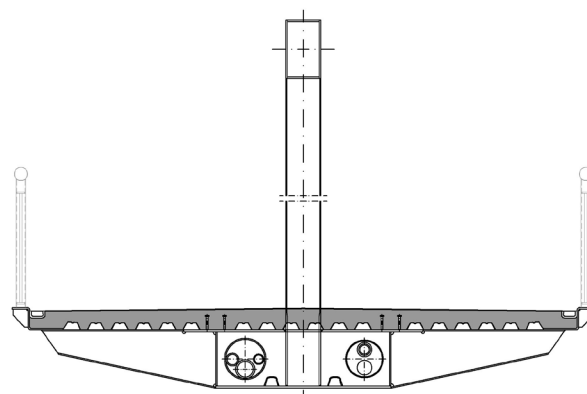


Figura 4. Sección tipo en arco superior

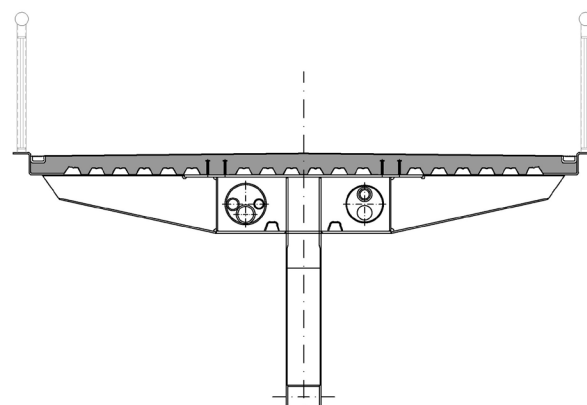


Figura 5. Sección tipo viga en vientre de pez

La viga en vientre de pez, por otro lado, tiene un canto máximo de 1.65 m, lo que se corresponde con una relación canto/luz de $h/L = 1/16$, claramente condicionada por la restricción de la altura libre mínima bajo la estructura. El tirante inferior, en forma de arco,

presenta una sección de 0.3x0.2 m, al igual que los montantes verticales.

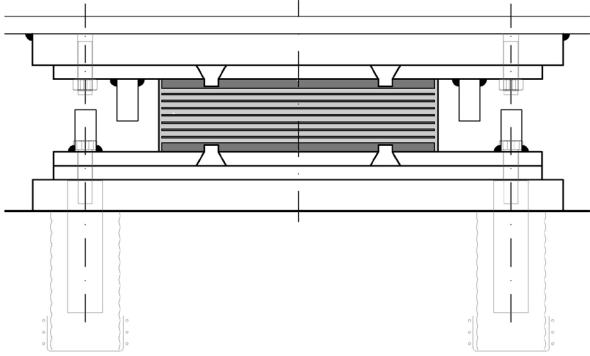


Figura 6. Apoyos de neopreno anclados con topes laterales

La estructura se apoya sobre los estribos y sobre la pila central mediante apoyos de neopreno anclados, en los que se dispusieron topes laterales, fig. [6], para poder resistir correctamente las acciones horizontales derivadas del viento principalmente. La estructura metálica se izó con los apoyos ya atornillados a las cuñas, de tal forma que estos coincidan con el eje del diafragma, por lo que fue necesario disponer apeos provisionales sobre los estribos y la pila.

Las actuaciones realizadas en los estribos y la pila existente se describen más en detalle en el siguiente apartado, si bien cabe mencionar que durante su hormigonado se dejaron en espera vainas embebidas para que, durante la maniobra de izado y colocación de la estructura metálica, fuera posible insertar en su interior los pasadores que materializan el anclaje del apoyo a la subestructura.

Con todo ello se busca una solución ligera, y que por tanto no aumente sustancialmente el peso que esta transmite a la subestructura existente con respecto a la pasarela original y que permita el montaje de la estructura mediante grúa; disponiéndose únicamente una unión en obra sobre la pila central, sin que sean necesarios apoyos provisionales intermedios, no aceptados por la CH Tajo. Asimismo, se busca una cierta elegancia en su forma, haciendo que la pasarela sea un elemento estructural emblemático en la zona, siempre respetando el cauce del río. Fig. [7].



Figura 7. Vista inferior de la pasarela

4. Rehabilitación de la subestructura existente y de los muros de acceso

Tal y como se comentó anteriormente, los estribos y las pilas existentes se encontraban en buen estado, con excepción de la coronación, donde el deterioro era ostensible, acentuado además con la demolición de la superestructura existente. Fig. [8].



Figura 8. Estribo 1 de la pasarela

Por tanto, eliminando las dos pilas demolidas para aumentar la sección útil del cauce y mejorar el comportamiento hidráulico de la actuación, se procede a rehabilitar la coronación de dichos elementos. En primer lugar, se demuelen los 2 m superiores y se eliminan las tierras de relleno interiores en los 1.5 m siguientes, manteniendo los muros de fábrica existentes en dicha profundidad, lo que permite la definición de un tirante inferior de 0.25 m de

espesor unido a los muros de mampostería por medio de barras postinstaladas con resina. Fig. [9]. Sobre dicho tirante se coloca un relleno estructural de 0.50 m de espesor, que sirve de apoyo del nuevo cabecero, en hormigón armado, de los estribos y de la pila.

Dicho cabecero se adapta a la geometría existente de cada uno de los casos. En concreto, la compleja geometría del cabecero de la pila, resuelto mediante un prisma macizo de hormigón, obligó a realizar un modelo 3D con la geometría y armadura para facilitar la ejecución en obra.

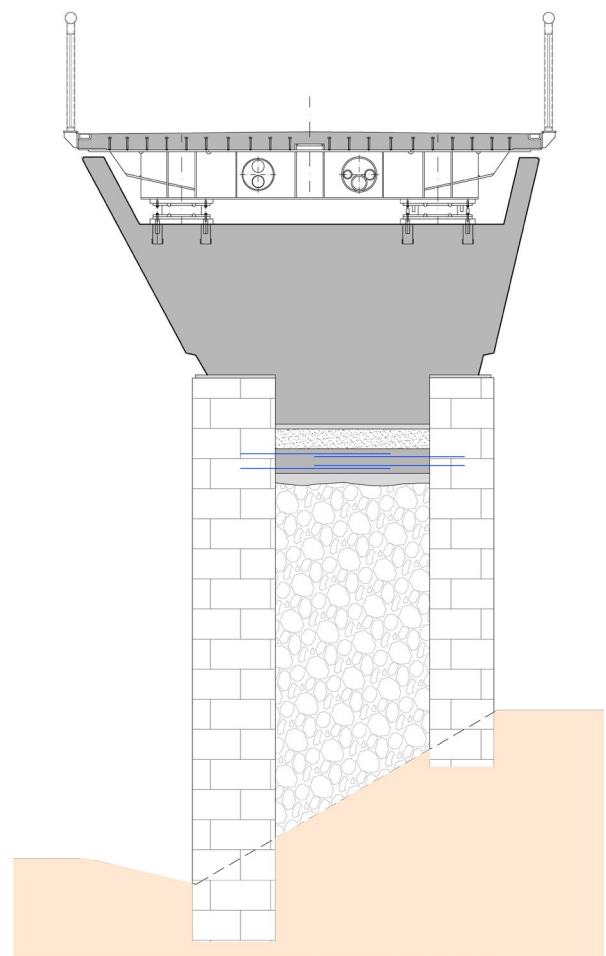


Figura 9. Pila de la pasarela

Por su parte, los estribos son huecos, macizándose en la zona de apoyo de la pasarela. En dichos huecos se disponen las arquetas que permiten la conexión de los servicios existentes a su paso por la pasarela. La parte del estribo hueco queda tapada por un revestimiento de

sillería con apariencia similar a la existente en la subestructura. Fig. [10].

Finalmente, para el caso del estribo 2, se define un muro de escollera situado al pie del muro de mampostería existente, a fin de prevenir la eventual socavación que pudiera llegar a producirse por la acción del río.

Por otro lado, los muros de acceso a la estructura presentaban un grado de deterioro mayor, especialmente en las zonas más próximas a la estructura y en la coronación de los muros, lo que obligó a realizar una campaña de catas y de saneo. Fig. [11].

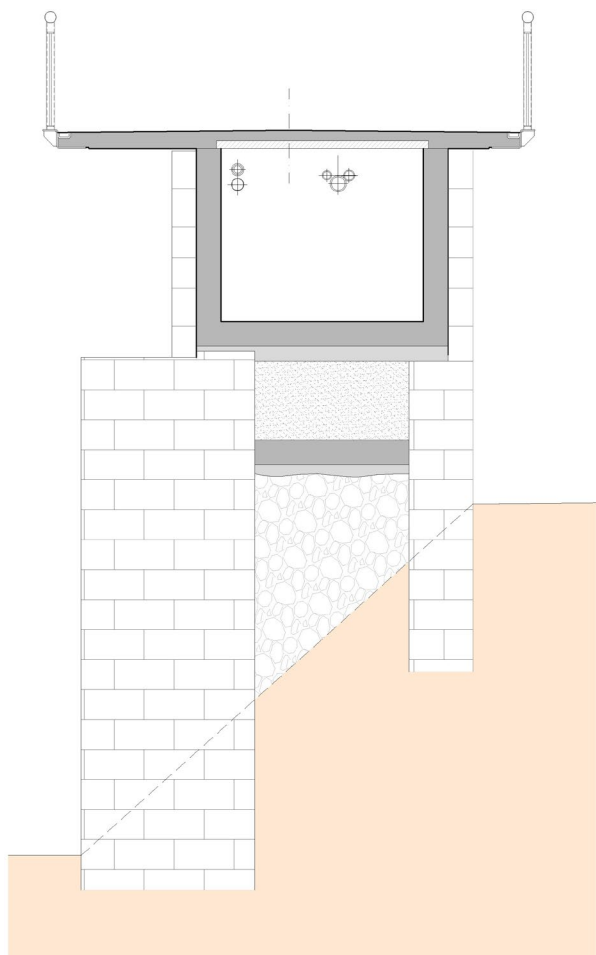


Figura 10. Estribo 2 de la pasarela

Si bien las labores de saneo se particularizaron para cada caso, con carácter general consistieron en la retirada del relleno de tierras y del material deteriorado, la ejecución de muros de hormigón armado, unidos

solidariamente a una losa superior de hormigón armado, conformado una sección en “pi”; y la ejecución de un nuevo revestimiento de mampostería con apariencia similar a la existente. La losa superior, con acabado de hormigón desactivado, se remata con las mismas chapas laterales y la misma barandilla que el forjado de la pasarela, dando continuidad a estos elementos.

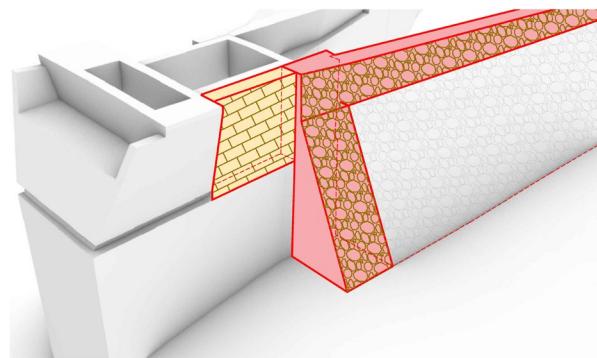


Figura 11. Modelo 3D y labores de saneo en muros de acceso

5. Detalles

Los detalles constructivos fueron concebidos para asegurar unos adecuados mecanismos de transferencia de las fuerzas entre los elementos de la estructura y garantizar su durabilidad, así como para facilitar la fabricación y el ensamblaje de los elementos de la pasarela.

El detalle más relevante de la pasarela queda conformado por el nudo de encuentro entre los dos arcos y el tablero. En este detalle resultó necesario definir diversos rigidizadores, cuya secuencia de montaje y soldeo fue estudiada en detalle, ya que, dadas las reducidas dimensiones de todos los elementos, el acceso a las soldaduras interiores resultaba dificultoso en múltiples casos. Fig. [12]. Además, la diferente inclinación de los arcos y la presencia de pasatubos añadió un plus de complejidad al detalle.

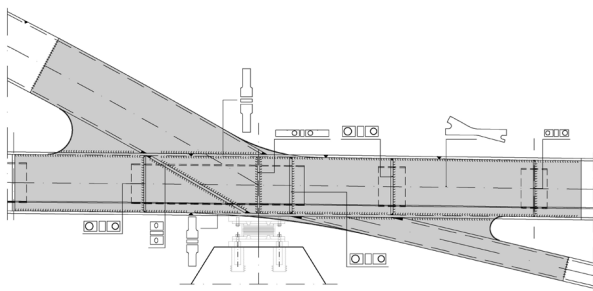


Figura 12. Detalle de unión entre los arcos y el tablero

6. Cálculo y comportamiento dinámico

6.1 Análisis del pandeo del arco superior

Puesto que desde el primer momento se ha buscado realizar una estructura ligera y de gran transparencia, se ha prestado una gran atención a la verificación detallada de los elementos comprimidos frente al pandeo, para evitar su sobredimensionamiento. En este caso, el elemento crítico es el arco superior, al no estar arriostrado transversalmente. Fig. [14].

En este caso, para tener en cuenta el comportamiento del arco, y considerando que los montantes presentan una rigidez significativa fuera del plano, se recurre a un cálculo no lineal mediante elementos finitos, en el que se considera una deformada inicial equivalente a las imperfecciones geométricas de los arcos, distinguiendo entre imperfecciones geométricas simétricas y asimétricas. Posteriormente, se realiza un cálculo no lineal a nivel geométrico que permita obtener la amplificación de esfuerzos derivada de los efectos de 2º orden de la estructura. Fig. [13].

Se pudo observar que, de los esfuerzos totales solicitantes en el arco superior, un 40% correspondía a los efectos de 2º orden, para las combinaciones más desfavorables.

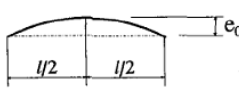
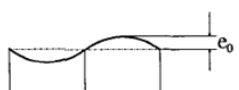
	Forma de las imperfecciones geométricas equivalentes fuera del plano del arco (parábola)
Arco triarticulado Arco biarticulado Arco empotrado	
Arco biarticulado, empotrado, triarticulado con pandeo asimétrico	

Figura 13. Imperfecciones consideradas

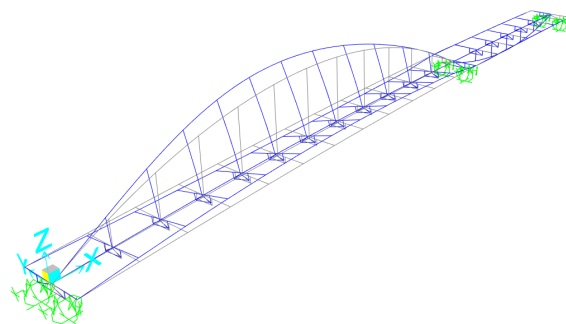


Figura 14. Imperfección simétrica en el arco superior

6.2 Vibraciones

Dada la configuración estructural de la pasarela, las reducidas dimensiones de los arcos y del tablero y la luz del vano principal, se procedió al estudio del comportamiento dinámico de la pasarela en proyecto, para lo que se empleó el método definido en la publicación *Design of Lightweight footbridges for human induced vibrations* [1], siendo contrastado posteriormente mediante una prueba de carga dinámica tras la construcción. De acuerdo con dicha publicación, es posible estimar el comportamiento dinámico de la pasarela a través de la consideración de una serie de tráfico peatonales de paso sincronizado teóricos, representativos de cualquier flujo real de tráfico, las frecuencias propias y las dimensiones del puente. Con ello se definen cargas armónicas a aplicar sobre el tablero con las que determinar las aceleraciones máximas esperadas de la estructura, siendo comparadas

con los límites de aceleración establecidos para diferentes niveles de confort.

Se detectaron 4 modos susceptibles de generar problemas dinámicos, con frecuencias comprendidas entre los 1.31 Hz y los 4.08 Hz.

Las máximas aceleraciones teóricas obtenidas resultaron de 0.5 m/s^2 , siendo inferiores en ambos casos a los límites aceptables.

En lo referente a la prueba de carga dinámica, se definieron hasta 10 fases, empleando de 1 a 8 personas, moviéndose en diferentes ubicaciones y a diferentes velocidades.

7. Proceso constructivo

Dentro de las labores de Dirección de obra, se realizó un seguimiento exhaustivo del proceso constructivo, con especial atención a las estructuras existentes, adaptando las soluciones definidas en proyecto a las eventualidades que fueron aconteciendo durante la obra.

Como momento más destacado del proceso constructivo cabe mencionar el izado del vano de 43 m, fig. [15], inicialmente planteado desde la margen derecha y mediante el empleo de una única grúa. A tal efecto, se posicionó dicha grúa adyacente a los muros existentes, pero, debido a los asientos detectados, se decidió retranquear su ubicación.

Esto provocó que la grúa no contara con la capacidad suficiente para colocar la pieza en su sitio, debido al brazo adicional que debía salvar tras retranqueo de su posición. En consecuencia, fue necesario detener la maniobra y disponer una grúa adicional en la otra margen del río, traída expreso para poder completar la maniobra.

Como comentario final, las dos piezas en las que se izó la estructura vinieron completamente ensambladas de taller, incluyendo la chapa grecada y los pernos conectadores ya instalados, por lo que solo fue necesario realizar una

soldadura en obra para materializar la unión entre ambas piezas.



Figura 15. Montaje del vano principal

8. Urbanización, accesos y acabados

A pesar de que el propósito principal del proyecto era la recuperación de la pasarela sobre el Tajo, conviene no olvidar que dicha estructura se integra dentro de una senda que une el balneario Carlos III con la zona urbana de Trillo, de modo que la recuperación del uso de este camino era también un objetivo importante del proyecto. Esta actuación iba en dos direcciones: por un lado, conectar la pasarela con los caminos existentes y, por otro, recuperar y sanear los ámbitos de los bordes de la pasarela.

En lo que se refiere a la conexión con los caminos, el lado más próximo al pueblo es la zona de camping de “El Colvillo”, con un pavimento característico de adoquín de hormigón de color amarillo. Fig. [16]. Por lo tanto, en el acceso a este camino se repuso el pavimento con este mismo acabado. En el lado del balneario, en cambio, los caminos próximos son de zahorra compactada, y se integran dentro de un antiguo jardín aterrazado vinculados al propio recinto termal. Por lo tanto, el camino que sale de la pasarela a ese lado se concibió con zahorra para conectar armónicamente con la red de caminos preexistente.



Figura 16. Camino entre “El Colvillo” y el balneario

Con relación a la actuación en los bordes de la estructura, esta actuación está muy vinculada a la anteriormente referida de recuperación de los muros de los estribos de la estructura primigenia. Para poder acceder a estos muros y realizar el trabajo de consolidación de los mismos hubo que realizar un importante trabajo de desbroce y modificación del terreno existente. Esta actuación, que en principio se realizó con idea de revertirse, acabó identificándose como una oportunidad de recuperar un acceso no sólo a los estribos y a la pila central por motivos de mantenimiento, sino también al propio cauce del río.

De este modo, en el lado del camping de “El Colvillo” únicamente se realizó una pequeña consolidación de terreno y una estabilización con zahorra compactada, fig. [17], con idea de que la vegetación tapizante del entorno acabe repoblando la suave cuesta actual.



Figura 17. Acceso al río en el lado de “El Colvillo”

En el lado del balneario, en cambio, se realizó un trabajo de paisajismo cuyo resultado fue la construcción de una suave rampa italiana, fig. [18], con un sistema de loseta prefabricada de hormigón que permite el crecimiento de césped a su alrededor.



Figura 18. Detalle del pavimento de la rampa italiana

Con esta rampa italiana se permite el acceso a una explanada junto al muro del estribo, integrada dentro de los jardines aterrazados del balneario, que pueda emplearse en el futuro para futuros usos recreativos compatibles con la explotación termal y de descanso. Fig. [19].



Figura 19. Actuación en el lado del balneario

Un elemento unificador de la actuación es el empleo de una barandilla metálica uniforme que recorre tanto las zonas de acceso donde se produce un desnivel significativo como la propia pasarela. Presenta un color gris neutro similar al del pavimento de la estructura, con un único pasamanos y unos esbeltos montantes verticales que permiten la transparencia del elemento para que desde el interior de la pasarela se pueda apreciar el río en todo momento.

Finalmente, para el diseño de la iluminación de la pasarela el principal objetivo era que la estructura se percibiera como un elemento seguro y utilizable en condiciones de oscuridad sin producir un gran impacto en los alrededores. Fig. [20]. Para ello, se emplearon unos sutiles elementos de balizamiento integrados en el pavimento de la pasarela, imperceptibles de día y que, de noche, delimitan e iluminan el camino sin deslumbrar al usuario ni causar contaminación lumínica en el entorno inmediato.

Agradecimientos

Al s+j arquitectos, por sus aportaciones durante la concepción estructural de la pasarela.

Ficha técnica de la estructura

Datos de la obra	
Ubicación	Trillo, Guadalajara
Año de Ejecución	2022
Propiedad	Ayuntamiento de Trillo
Proyecto constructivo y dirección de obra	CESMA Ingenieros
Empresa constructora	Díez y Compañía, S.A.
Taller metálico	Horta Coslada
Datos técnicos	
Longitud total	66 m
Luces	43-23 m
Ancho del tablero	5.00 m
Ancho libre	2x2.20 m
Canto del tablero	0.69 m
Espesor medio de hormigón en situ	0.15 m
Cuantía de acero estructural en tablero	189 kg/m²
Cuantía de acero de armar en tablero	16 kg/m²



Figura 20. Iluminación de la pasarela

Referencias

[1] Design of Lightweight footbridges for human induced vibrations. Heinemeyer *et al.*, 2009

[2] UNE-EN 1993. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero