

Pasarela ignífuga en la calle San Ildefonso de Salamanca

Fireproof footbridge in San Ildefonso Street in Salamanca

Juan Luis Bellod Thomas^a, Peter Tanner Furrer^b

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

^b MSc ETH, Zürich. Dr. Ingeniero de CCyP. Cesma Ingenieros, S.L. Ingeniero. cesma@cesmaing.com

RESUMEN

La pasarela de la calle San Ildefonso se sitúa sobre la línea FFCC Salamanca-Fuentes de Oñoro, paralela al paso superior existente, y permite el paso de peatones y ciclistas. La estructura, con una luz de 25 m, está formada por perfiles tubulares de sección circular y se concibe como un doble arco inclinado empotrado a los estribos y con tablero mixto intermedio. El tablero, de 4.25 m de ancho, está formado por una losa de hormigón sobre una chapa grecada colaborante, apoyada en traviesas horizontales que se prolongan en los montantes del arco. La estructura, de apariencia ligera y con mínimo impacto visual, ha sido capaz de aguantar tanto temperaturas bajo cero como un fuego descontrolado bajo su tablero.

ABSTRACT

The footbridge in San Ildefonso Street flies over the Salamanca-Fuentes de Oñoro rail tracks, parallel to the existing overpass, and allows the crossing of pedestrians and cyclists. The 25 m span structure features circular hollow section profiles and is conceived as a double inclined arch that embeds itself into the abutments and an intermediate composite deck. The 4.25 m wide deck features a concrete slab over profiled sheeting, which is supported by the transverse beams that emerge from the hangers of the arch. The light-looking and low visual impact structure has been able to withstand both below freeze temperatures and an uncontrolled fire under its deck.

PALABRAS CLAVE: pasarela, estructura sobre FFCC, estructura metálica, doble arco

KEYWORDS: footbridge, structure over rail tracks, steel structure, double arch

1. Introducción

El proyecto de la pasarela en la calle de San Ildefonso se engloba dentro de la Estrategia de Desarrollo Urbano Sostenible Integrado Tormes+ (EDUSI TORMES+) del Ayuntamiento de Salamanca.

Hasta la construcción de la misma el único medio de comunicación entre los barrios de Tejares y de Los Alcaldes, separados por la línea de ferrocarril, era un estrecho paso superior de vigas de hormigón que canalizaba todo el tráfico, con un ancho de tablero de 6.85 m que se

distribuía en una calzada con dos carriles de 2.5 m de ancho, uno por sentido de circulación, y dos aceras en ambos extremos de 0.93 m. Las aceras incluían además unas barandillas que reducían aún más el ancho libre de paso.

La nueva pasarela tiene por objeto dar continuidad de manera cómoda, segura y accesible a los recorridos peatonales y ciclables existentes y previstos, separándolos del tráfico rodado, para el que se dedica la estructura previa tras las pertinentes actuaciones de refuerzo estructural realizadas.

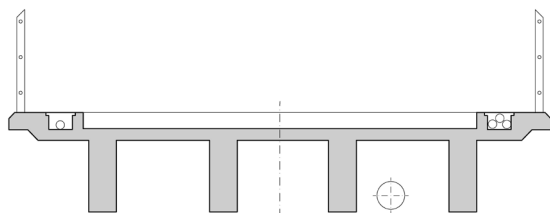


Figura 1. Sección tipo del paso superior previo

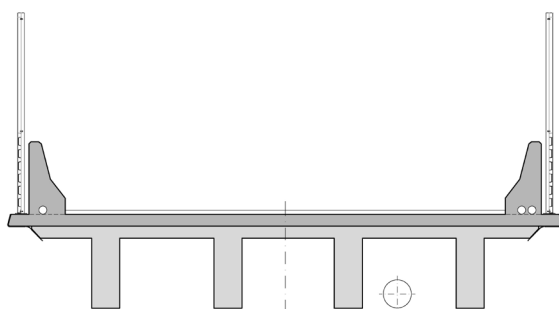
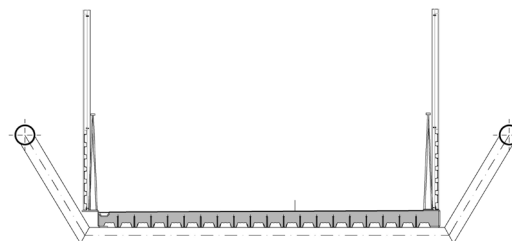


Figura 2. Sección tipo del paso superior reforzado y de la nueva pasarela



2. Condicionantes

El primer condicionante a la hora de abordar el proyecto era la ejecución de una estructura independiente al paso superior previo que diera continuidad tanto a las aceras existentes como al carril bici planteado. El segundo era analizar y reforzar la estructura existente e introducir barreras rígidas en los bordes sustituyendo las endeble barandillas metálicas anteriores. Además, ambas estructuras debían incorporar pantallas antivandálicas sobre las vías de FFCC por requerimiento de ADIF.

Si bien el gálibo vertical sobre las vías a respetar no constituía un estricto condicionante al definir la nueva estructura, máxime teniendo en cuenta el canto del paso superior existente, sí que invitaba a trabajar en una solución en la que la estructura sobresaliera por encima de la rasante del tablero y que, al mismo tiempo, afectara lo menos posible al tráfico ferroviario.

Desde un punto de vista estético, se buscó una estructura liviana y transparente para la pasarela, en contraste con el carácter pesado y masivo del paso superior previo.



Figura 3. Vista de la pasarela y del paso superior

Las condiciones de accesibilidad peatonal se garantizaron estableciendo un ancho de acera de 1.80 m, con una pendiente transversal del 1% para la evacuación de aguas. El ancho del carril bici se fijó en 2.5 m para permitir el cruce de ambos sentidos de circulación con seguridad. En ambos casos con pavimentos antideslizantes, a base de pintura con resina acrílica, con diferentes colores para distinguir los distintos tráfico.

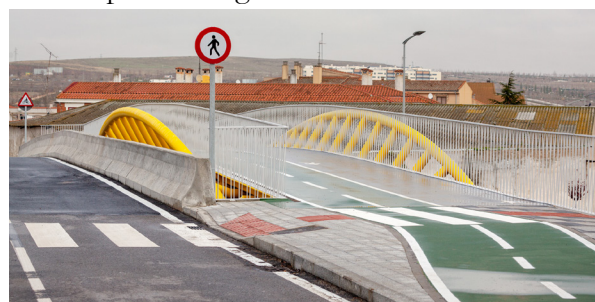


Figura 4. Vista de los acabados finales

Con respecto al terreno, el perfil geotécnico define un pequeño espesor superficial de suelos flojos, sobre una pequeña capa de suelos residuales de moderada compacidad, que apoya directamente sobre un sustrato rocoso de pizarras a una profundidad de 2.80 m.

Finalmente, como condicionante económico y de durabilidad, se buscó una solución que cumpliera los requisitos anteriores con un coste razonable y con soluciones que redujeran y facilitaran todo lo posible eventuales labores de mantenimiento durante su vida útil. Por ello, se proyectó una estructura sin apoyos de neopreno y con una junta de dilatación accesible y sustituible desde la superficie. Asimismo, se seleccionó una pintura de protección de la estructura metálica de gran durabilidad, con una garantía mínima de 25 años. Además, se prestó especial atención al sistema de drenaje para evitar que el agua arrastrara sustancias que pudieran manchar o dañar la estructura.

3. Concepción y descripción de la pasarela

Los condicionantes citados anteriormente se resuelven mediante una pasarela de 25 m de longitud, con un único vano, y con ancho de

tablero de 4.3 m, por medio de un doble arco inclinado con tablero mixto intermedio.

Todos los elementos que forman la estructura metálica de la pasarela se definen por medio de elementos tubulares de sección circular. Los arcos arrancan de los estribos, donde se empotran, por debajo del tablero, separados entre sí una distancia igual al ancho de este, para ir separándose hasta llegar al centro de la pasarela. En este punto se consigue una flecha total de 2.5 m ($f/L = 1/10$), de los cuales 1.25 m se encuentran por encima de la losa superior, con una separación entre ejes de los arcos de 5.95 m. Los montantes, que tienen una inclinación variable, unen los arcos con las vigas transversales sobre las que apoya la losa del tablero.

Por su parte, la losa, de 0.2 m de canto, se construye sirviéndose de una chapa colaborante como encofrado, conformando por tanto un forjado mixto. Dicha losa se remata lateralmente con unas chapas plegadas, que hacen las veces de encofrado, sobre las que se sueldan las barandillas laterales, de 1.25 m de altura al tratarse de una pasarela ciclable. El empleo de chapa grecada como encofrado evita que sea necesario cimbrar sobre las vías de FFCC, disminuyendo considerablemente la afección de la actuación.

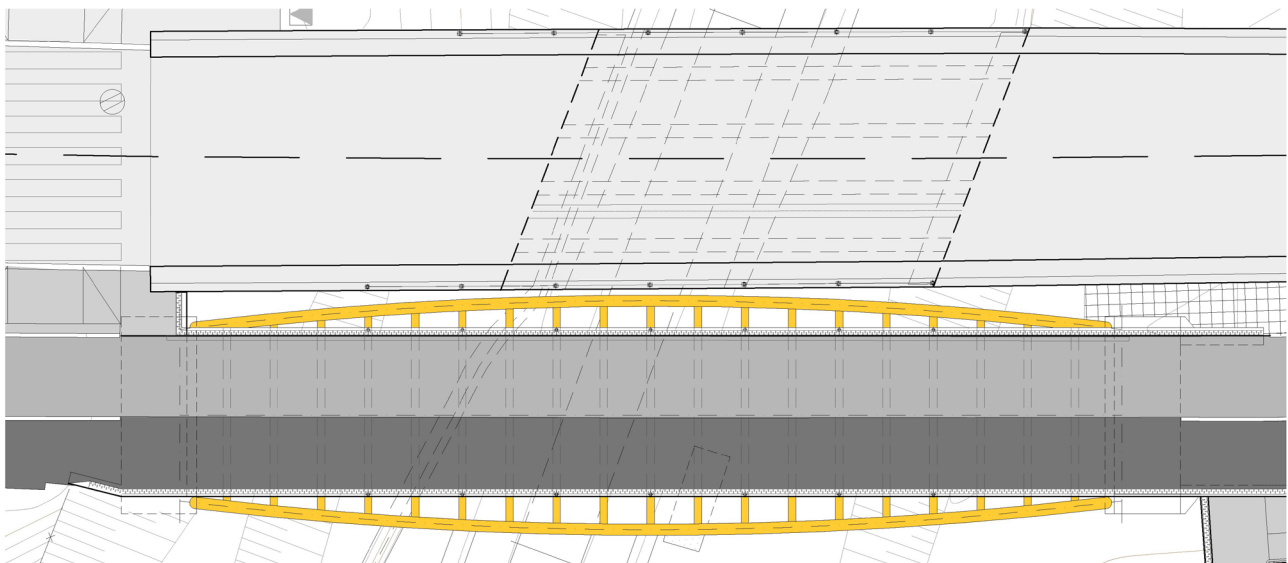


Figura 5. Planta de la pasarela y del paso superior rehabilitado

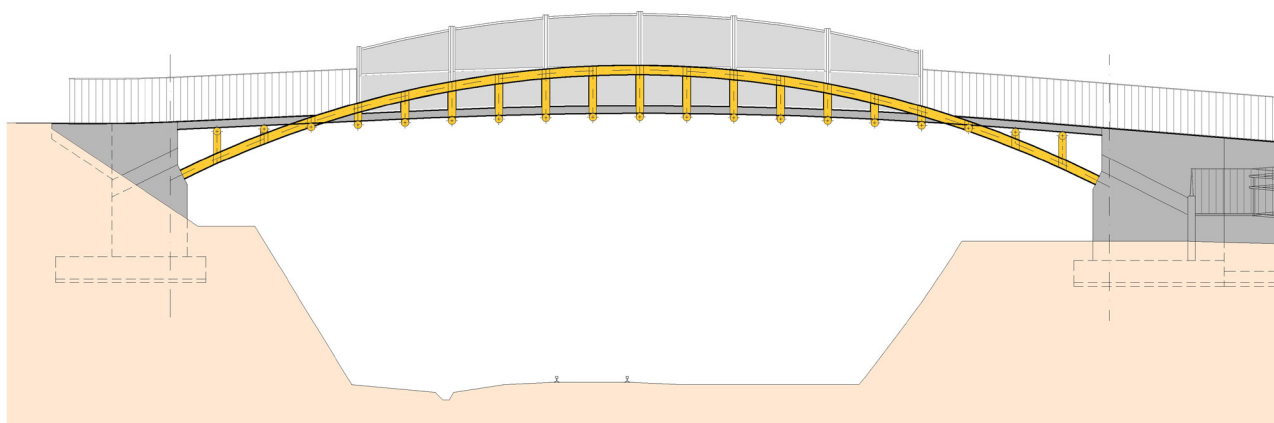


Figura 6. Alzado de la pasarela



Figura 7. Vista general de la pasarela

Con el empleo de elementos tubulares de sección circular en la definición de la estructura metálica se consigue una estructura visualmente ligera, estética y con un mínimo impacto visual sobre el entorno. Por otra parte, se reduce notablemente el empleo de rigidizadores o chapas auxiliares de montaje, simplificando su construcción y mejorando la durabilidad, ya que se impide la acumulación de agua que provoca los procesos de corrosión de las estructuras metálicas.

Los estribos son cerrados, con aletas en vuelta y cimentación directa. El estribo 1 tiene una altura de 3.60 m, mientras que la altura del estribo 2 es de 3.50 m. Para garantizar la

estabilidad de los estribos frente a las compresiones transmitidas por el arco se definen alzados de 2 m de espesor. La cimentación de ambos estribos se resuelve mediante una zapata de 0.60 m de espesor y 4 m de ancho. Adicionalmente, para la construcción del estribo 1 se define una pantalla de micropilotes para evitar el descalce de la cimentación del paso superior existente. Dichos micropilotes presentan un diámetro de perforación de Ø250 mm, una armadura tubular de Ø200 mm y una longitud de 5 m.

La unión entre el tablero y los estribos es rígida, con continuidad de armadura entre ambos, haciendo que la estructura sea integral.

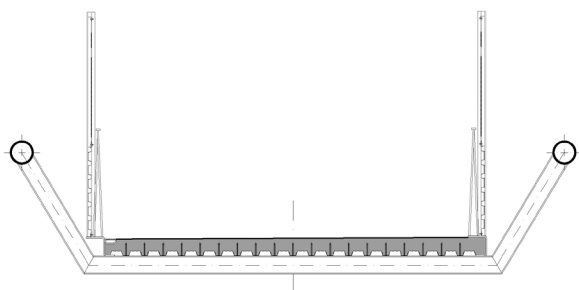


Figura 8. Secciones transversales tipo

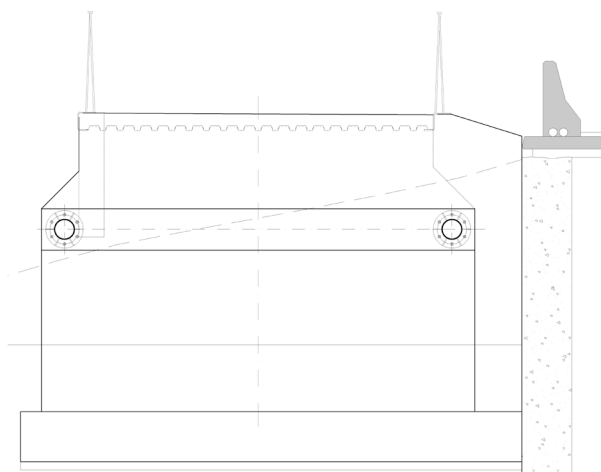


Figura 9. Sección transversal en el estribo

4. Obras complementarias, reposición de servicios y barandilla

Además de la pasarela, se define una rampa y escalera para permitir el acceso a la estructura desde el aparcamiento próximo en construcción. Los muros de dicha rampa se construyen en prolongación de las aletas del estribo 2, presentan una altura máxima de 3.60 m y una altura mínima de 0.70 m, y espesores que varían de 0.30 m a 0.20 m en función de la altura. La cimentación de toda la rampa es directa, con una zapata de 0.30 m de espesor.

Por otro lado, se definen los trabajos de rehabilitación de la barrera y de la losa del paso

superior existente. Para ello, se procede a retirar el firme de todo el tablero y a demoler y ranurar el hormigón del tablero existente en sus extremos, para descubrir la armadura. La armadura transversal, previsiblemente doblada en sus extremos, debe ser enderezada para facilitar la conexión con la nueva armadura.

Una vez completada esta fase se procede al relleno del ranurado con resina para colocación de nueva armadura transversal solapada con la existente y a colocar la nueva armadura del tablero y la armadura de la barrera, para posteriormente hormigonar la losa y la propia barrera rígida de contención. Esta nueva losa se extiende también a los accesos, garantizando una transición uniforme entre la estructura y el relleno del trasdós.

Adicionalmente, se realiza una rehabilitación de los muros, reparando los daños visibles y limpiando la superficie mediante chorro de agua a alta presión, para posteriormente inyectar las fisuras con resina epoxi y regenerar los volúmenes con mortero de alta resistencia. Además, se realiza un tratamiento de anticarbonatación a las placas existentes.



Figura 10. Detalle de barandilla

Finalmente, tanto la pasarela como las rampas de acceso se rematan con una barandilla de protección, que busca de nuevo garantizar la transparencia de la estructura. Dicha barandilla está conformada por un pasamanos rectangular y dos familias de listones de acero liso pintado, cada una de ellas ligeramente inclinada en una dirección.

5. Detalles

Si bien como criterio general se plantea una estructura sencilla y fácil de ejecutar, cabe mencionar tres de los detalles más relevantes.

Primero, puesto que la chapa grecada se dispone sobre vigas resueltas mediante tubos de sección circular, fue necesario fijarla mediante unos pernos conectadores especiales, tipo CTF, que se fijan a la viga mediante unos clavos preensamblados que se disparan contra el tubo y que se insertan a través de la chapa, en vez de mediante el soldeo tradicional de este tipo de elementos.

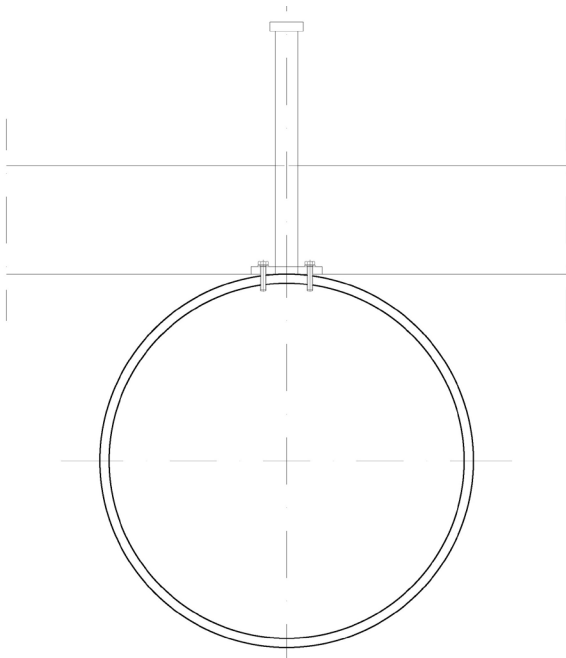


Figura 11. Conexión de la chapa grecada a las vigas transversales

Por otro lado, tras varias propuestas y cambios planteados por el cliente, se decidió

emplear una chapa plegada a modo de encofrado perdido lateral en ambos laterales del forjado mixto. Sobre esta chapa se instalan tanto la barandilla como la pantalla antivandálica requerida por ADIF. Su forma es distinta en ambos laterales, ya que en el lateral más próximo al paso superior existente es necesario que vuele más allá de la losa para no interferir con la canaleta longitudinal de recogida de aguas. Esta chapa se une provisionalmente a los tubos mediante punteos de soldadura y, de manera definitiva, al tablero por barras soldadas en prolongación.

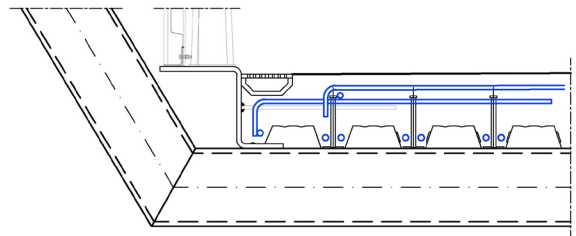


Figura 12. Chapa plegada como encofrado lateral

Finalmente, está la placa de anclaje de los arcos con los estribos, que se resuelve mediante barras GEWI roscadas.



Figura 13. Placa de anclaje del arco

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.

En este caso, para tener en cuenta el comportamiento del arco, y considerando que las vigas transversales y el tablero al que estas se unen 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 para obtener la amplificación de esfuerzos derivada de los efectos de 2º orden de la estructura.

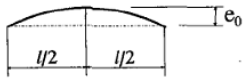
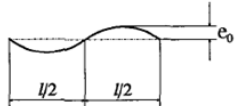
	Forma de las imperfecciones geométricas equivalentes fuera del plano del arco (parábola)
Arco triarticulado Arco biarticulado Arco empotrado	
Arco biarticulado, empotrado, triarticulado con pandeo asimétrico	

Figura 14. Imperfecciones consideradas

Tras dicho análisis se pudo observar que, de los esfuerzos totales solicitantes en el arco superior, un 30% correspondía a los efectos de 2º orden, para las combinaciones más desfavorables.

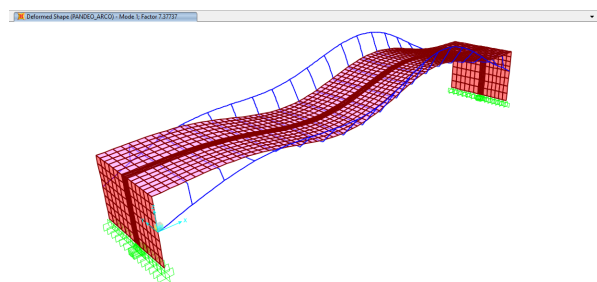


Figura 15. Modo del pandeo del arco fuera de su plano

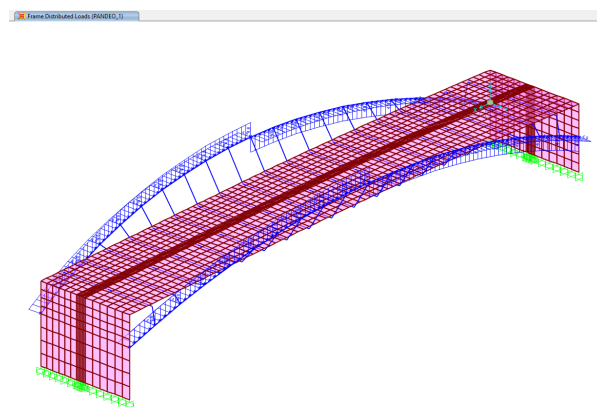


Figura 16. Carga equivalente equilibrada asociada al modo de pandeo del arco fuera del plano

6.2 Vibraciones

Dada la configuración estructural de la pasarela, las reducidas dimensiones de los arcos y del tablero, se procedió al estudio del comportamiento dinámico de la pasarela en proyecto, para el cual 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 tráficos 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 2 modos susceptibles de generar problemas dinámicos, con frecuencias comprendidas de 4.2 Hz y 4.3 Hz, respectivamente.

Las máximas aceleraciones teóricas obtenidas resultaron de 0.05 m/s², siendo inferiores en ambos casos a los límites aceptables.

En lo referente a la prueba de carga dinámica, se definieron hasta 6 fases, empleando de 1 a 8 personas, moviéndose en diferentes ubicaciones y a diferentes velocidades, analizándose posteriormente los resultados y verificándose su validez.

7. Proceso constructivo

El proceso constructivo consistió, en primer lugar, en la ejecución de la pantalla de micropilotes y de los dos estribos de hormigón armado.

Posteriormente se procedió al montaje de la estructura metálica, con la chapa grecada y la chapa plegada previamente colocadas (salvo los dos tramos extremos), mediante grúa. Antes de la retirada de la grúa se realizó la unión de los arcos de la estructura a los estribos. Una vez hecho esto, se pudieron colocar los tramos extremos de la chapa grecada y chapa plegada.

A continuación, se dispuso la armadura del tablero y se realizó su hormigonado.

Finalmente, se remataron los acabados, disponiendo la pintura de la estructura, los pavimentos y la colocación de las barandillas.

La pantalla antivandálica se colocó en una fase posterior, una vez acabada la obra (tal y como se puede observar, en muchas de las fotografías de la obra acabada no aparece dicha pantalla).

8. Exposición al fuego y sus efectos

8.1 Acto vandálico

Un año después de la inauguración de la obra, en el marco de una inspección rutinaria, se detectó que, debido a un acto vandálico, se había producido un incendio bajo la pasarela, en la plataforma del estribo 2, el más próximo a la ciudad. Visiblemente, habían estado expuestos al fuego la zona de arranque de uno de los arcos y el fondo del tablero, incluidas las dos vigas transversales más próximas al estribo, los montantes correspondientes, así como las uniones soldadas entre estos elementos.



Figura 17. Vista parcial de los elementos afectados por el incendio

Como se desconocía tanto el tiempo de exposición al fuego como las temperaturas alcanzadas, fue necesario realizar un estudio mediante ensayos mecánicos para determinar si la situación accidental descrita pudo disminuir la fiabilidad estructural de la pasarela.

8.2 Programa de investigación

Se definió un programa experimental comparativo, consistente en ensayos y pruebas realizados con muestras extraídas de la parte de la pasarela expuesta al fuego y de la parte análoga situada en el lado y estribo opuestos a los del incendio. La necesidad de asegurar la plena reparación de ambas zonas tras la extracción,

unida a la dificultad de la toma de muestras por la complejidad geométrica de la estructura de la pasarela y por la limitada accesibilidad de las zonas de interés, condicionó fuertemente el diseño del programa. Fue preciso recurrir a probetas de muy pequeño tamaño para realizar, respectivamente:

- análisis microestructurales del acero mediante microscopías óptica y electrónica de barrido;
- ensayos de tracción;
- medidas de campos de microdureza en las uniones soldadas.

Para la mecanización de las probetas necesarias a estos efectos, se estableció la extracción de tres parejas de probetas mediante una broca hueca de 70 mm de diámetro. Cada una de estas parejas incluía, respectivamente, una muestra expuesta al fuego y una no expuesta, abarcando a los elementos y detalles relevantes:

- arcos;
- vigas transversales;
- uniones soldadas entre montantes y arcos.

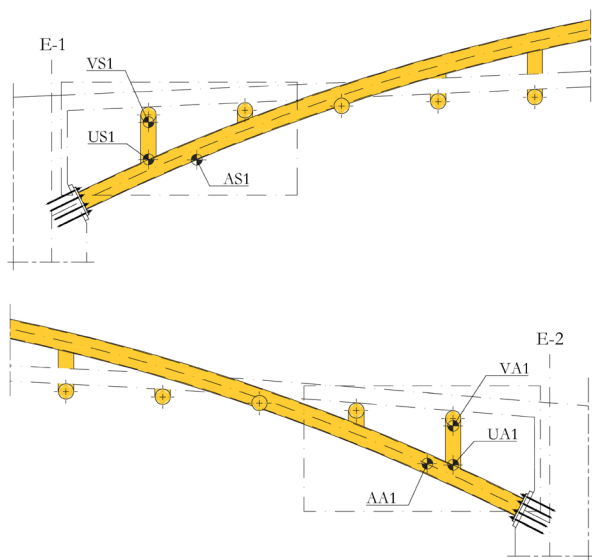


Figura 18. Ubicación de las muestras extraídas

8.3 Resultados obtenidos

Las microestructuras de los dos aceros con que habían sido fabricados los elementos estructurales afectados por el fuego (arco y vigas

transversales) se determinaron como ferrítico-perlíticas de grano fino, propias de las calidades de proyecto especificadas (S-275 y S-355), sin más diferencias que las atribuibles al espesor de los perfiles y, por tanto, sin alteraciones en las muestras expuestas al fuego, en particular la presencia de fases inducidas térmicamente.

Los ensayos de tracción realizados con las muestras expuestas al fuego no arrojaron ningún resultado en desacuerdo con las especificaciones de la normativa vigente en materia de resistencia y de ductilidad correspondientes a los tipos de acero contemplados en el proyecto.

Los campos de microdureza medidos en dos muestras incompletas de uniones soldadas arco-travesaño, respectivamente ilesa y expuesta al fuego, resultaron muy similares y propios de una soldadura correcta entre aceros con las calidades de diseño.

Las diferencias de las propiedades mecánicas medidas en las muestras comparadas no dieron lugar a que las expuestas al fuego sobrepasaran los límites admitidos por la normativa técnica. Las observaciones y pruebas realizadas a escala microestructural no sustentaron la existencia de alteraciones entre los aceros y las uniones soldadas comparadas, capaces de deteriorar el comportamiento mecánico por la exposición al fuego.

8.4 Reparación

A la vista de los resultados obtenidos en los ensayos realizados, no se hizo necesaria ninguna operación específica de refuerzo o sustitución de los elementos de acero de la pasarela afectados por el incendio. Por tanto, las intervenciones que se definieron se limitaron a la reparación de las zonas de toma de muestras, la sustitución del sistema de protección anticorrosivo tanto del acero estructural como de la chapa grecada, así como a la adopción de las medidas necesarias para impedir que puedan volver a repetirse actos vandálicos similares.

A efectos de la reparación de las zonas de las uniones entre los montantes y los arcos afectadas por la extracción de las correspondientes muestras, se definieron unas abrazaderas, formadas cada una de ellas por dos mitades. Para su montaje se posicionaron sucesivamente cada una de las dos mitades de la abrazadera, soldando a continuación ambas piezas entre ellas y el conjunto con el arco.

Para impedir, en la medida de lo posible, futuros actos vandálicos, se modificó el trazado de la valla que protege la vía del ferrocarril dificultando el paso hacia el estribo desde el terraplén. Además, en la plataforma existente se dispuso una escollera inclinada, de formas irregulares y hormigonada, con el fin de disuadir de la estancia en esta zona.

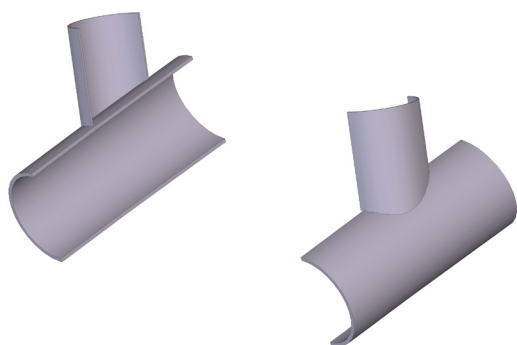


Figura 19. Abrazaderas para reparación

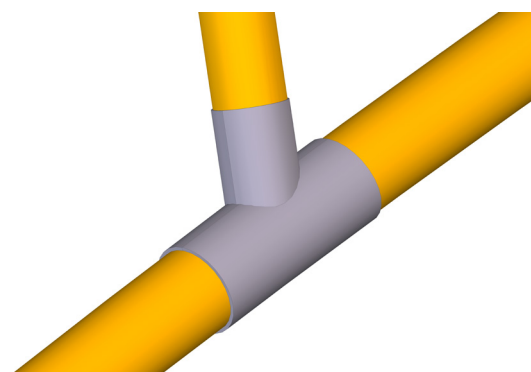


Figura 20. Reparación de la zona de extracción

Agradecimientos

Al Departamento de Ciencias de los Materiales de la UPM, por su colaboración en la campaña de ensayos y posterior estudio realizado tras la exposición al fuego sufrida por la pasarela.

Referencias

- [1] Design of Lightweight footbridges for human induced vibrations
- [2] UNE-EN 1993. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero
- [3] UNE-EN 1994. Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón

Ficha técnica de la estructura

Datos de la obra	
Ubicación	Salamanca
Año de Ejecución	2021
Propiedad	Ayuntamiento de Salamanca
Proyecto constructivo y dirección de obra	CESMA Ingenieros
Empresa constructora	Obras Civiles de Castilla y León
Datos técnicos	
Longitud total	25 m
Flecha del arco sobre el tablero	1.25 m
Ancho del tablero	4.75 m
Ancho libre	4.25 m
Canto del tablero	0.40 m
Espesor medio de hormigón en situ	0.16 m
Cuantía de acero estructural en tablero	87 kg/m ²
Cuantía de acero de armar en tablero	30 kg/m ²
Presupuesto de ejecución material	123 839 €