

Pasarela en banda tesa sobre el río Cervol en Vinaroz

Stress ribbon footbridge over Cervol river in Vinaroz

Enrique Goberna ^a, Knut Stockhusen ^b, Pedro Peña ^c, Roberto Piñol ^c, Alberto Sánchez ^d

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. sbp ingenieros España. Director ejecutivo. e.goberna@sbp.de

^b Structural engineer. sbp SE. Managing Director.

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. sbp ingenieros España. Ingenieros de proyecto.

^d Arquitecto. sbp ingenieros España. BIM manager.

RESUMEN

Una nueva pasarela sobre el río Cervol ha entrado a formar parte en la trama urbana de Vinaroz, Castellón. El ayuntamiento de la localidad lanzó un concurso de proyecto y obra en la segunda mitad de 2020. La UTE formada por Levantina, Ingeniería y Construcción (LIC) y Pantallax, junto con el equipo técnico de schlaich bergermann partner en Madrid y la firma de los arquitectos paisajistas Burgos & Garrido Arquitectos, resultó ganadora. En el artículo se explican los fundamentos estructurales de la pasarela, los aspectos fundamentales de su diseño estático y dinámico, así como los retos abordados durante la construcción de la misma.

ABSTRACT

A new footbridge over the Cervol river has become part of Vinaroz, Castellón. The city council launched a tender for the project in the second half of 2020. The joint venture formed by Levantina, Ingeniería y Construcción (LIC) and Pantallax, together with the technical team of schlaich bergermann partner in Madrid and the firm of landscape architects Burgos & Garrido Arquitectos, was the awardee. This paper explains structural aspects of the footbridge, like the static and dynamic design, and the challenges faced during its construction.

PALABRAS CLAVE: pasarela, banda tesa, acero, hormigón pretensado, micropilotes, prefabricación, Vinaroz, Vinaròs.

KEYWORDS: footbridge, stress ribbon, steel, prestressed concrete, micropiles, prefabrication, Vinaroz, Vinaròs.

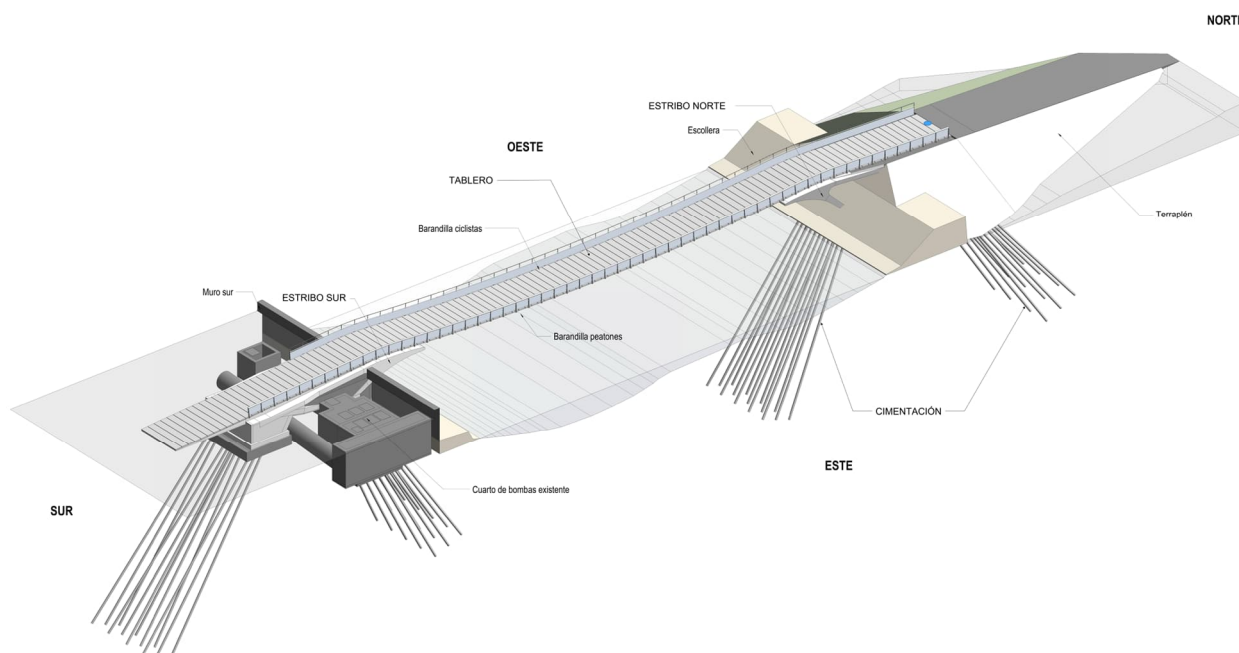


Imagen 1. Volumetría 3D de la pasarela © sbp

1. Antecedentes

El ayuntamiento de Vinaròs lanzó en octubre de 2020 un concurso de proyecto y obra (*design & build*, en inglés) de una nueva pasarela ciclopeatonal sobre la desembocadura del río Cervol. A este concurso se presentaron varios equipos, pero finalmente resultó adjudicataria la Unión Temporal de Empresas formada por Levantina, Ingeniería y Construcción S.L. (LIC) y Pantallax S.L.

Para la redacción del proyecto, la UTE contó con el compromiso de un equipo redactor técnico formado por schlaich bergemann partner (sbp), desde su base en Madrid, y la oficina de arquitectura y paisajismo Burgos & Garrido Arquitectos.

El río Cervol tiene en su desembocadura unos 63 m de ancho y está flanqueado por un muro de contención en su lado Sur y por una escollera en el flanco norte. El reto no era solo hacer una pasarela para cruzar el río, sino plantear una solución que fuera mínimamente invasiva a la vez que totalmente respetuosa con el entorno. Se hizo un estudio de soluciones en

el que se pusieron en juego diversas variables tales como, el coste, la estética, el impacto ambiental, el impacto visual, el encaje urbanístico y paisajístico, la constructibilidad y el grado de prefabricación.

Por motivos hidráulicos y medioambientales la solución debía ser poco invasiva, por lo que lo mejor era hacer una estructura sin apoyos en el cauce del río, lo cual, por la moderada distancia a salvar, se podía conseguir. Entre las soluciones que se plantearon estaban desde luego las clásicas, tales como una pasarela atirantada asimétrica, una celosía o una pasarela en arco de tablero inferior. Fue sin embargo la tipología en banda tesa la que mayor valoración alcanzó en el análisis de todas las variables antes descritas. Además, en su favor estaba el hecho de que era una tipología estructural que no se encontraba aguas arriba del río, cosa que sí pasaba con las otras tipologías. Esto sin duda contribuía a su originalidad, lo cual considerábamos que también sería valorado positivamente por el ayuntamiento.

Una pasarela en banda tesa trabaja estructuralmente por la forma, lo que la hace muy expresiva, esbelta y muy respetuosa con el entorno. En su favor también el alto grado de prefabricación que permitía la solución.

2. Diseño de la pasarela

Desde el punto de vista estructural, la pasarela de Vinaroz se puede dividir en tres partes bien diferenciadas, que son, de arriba abajo, el tablero, los estribos y la cimentación [imagen 1].

La pasarela de Vinaroz tiene una longitud total de 84 metros y una luz de 60 metros, de los cuales 50 corresponden a la luz estricta de la banda tesa (distancia entre puntos de inflexión).

El tablero es la parte funcional de la pasarela y tiene poco más de 5 metros de ancho, de los cuales 3 m están destinados para ciclistas y 2 m para peatones. Los usuarios transitan por placas prefabricadas de hormigón armado de 5.12 m de ancho, 75 cm de largo y 12 cm de canto, de acabado superior rugoso para mejorar las propiedades frente a deslizamiento. Las placas trabajan como elementos viga unidireccionales apoyadas en dos bandas de acero de alta resistencia (S690QL) de 700 mm de ancho y 30 mm de espesor con tratamiento contra la corrosión en medio marino [C5-VH]. La distancia entre bandas tesas es tal que los momentos de flexión de las placas, tanto positivos como negativos, bajo cargas permanentes, son mínimos. De esta manera se consigue un diseño estructural óptimo para las mismas.

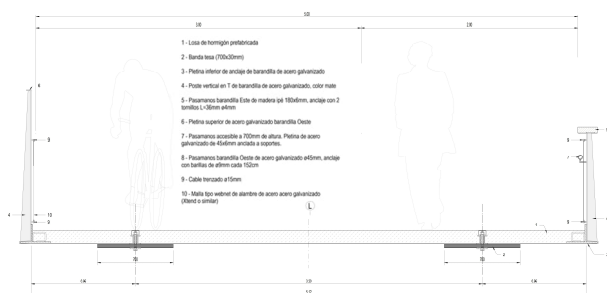


Imagen 2. Sección transversal del tablero. © sbp

La pendiente longitudinal del tablero es variable y conforme a la normativa aplicable alcanzando un máximo de 7.8 % en la cúspide de los estribos, llegando al 6 % en no más 6.8 m de recorrido, para luego tender a 0 % en el centro de la pasarela.

La pasarela se diseñó para que el tablero quedara a algo más de 40 cm de la avenida de 100 años de periodo de retorno.

Los bordes longitudinales del tablero están protegidos por barandillas. La del lado Oeste de 130 cm de altura para salvaguardar a los ciclistas, y la del lado Este, peatonal, de 96 cm de altura. Ambas se rematan con un pasamanos de madera con iluminación lineal integrada.

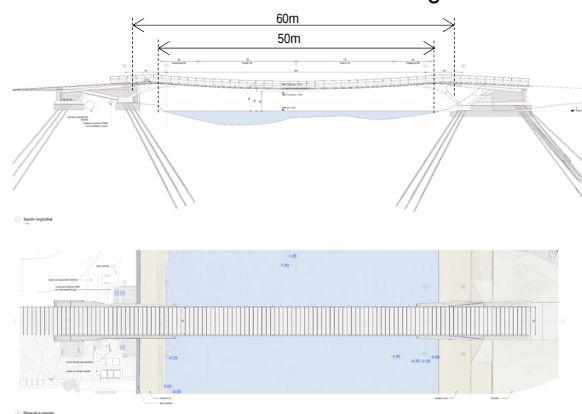


Imagen 3. Sección longitudinal y planta. © sbp

Las bandas de acero se apoyan en sillas de montar de 22 metros de radio, fijadas a los estribos. Este radio mínimo se ha determinado para que, al sumar las tensiones de encorvadura (flexión forzada por la curvatura) a las propias de la tracción debidas al mecanismo funicular de la banda tesa, no se rebase el límite elástico de diseño del material.

Las bandas tesas terminan en yunques de acero en cada extremo también en acero de alta resistencia. Estos dispositivos tienen la misión de transmitir a los estribos las tracciones desarrolladas en las bandas tesas.

Los estribos son las estructuras de hormigón cuya función principal es trasladar las cargas del tablero hasta cimentación. Lo habitual en puentes es que los estribos se hagan cargo, bajo carga permanente, mayoritariamente de cargas verticales. En los puentes tipo banda tesa,

las cargas horizontales bajo carga permanente son muy elevadas (del orden de 4 a 6 veces la carga gravitatoria del tablero), lo que obliga a que los estribos sean estructuras muy robustas.

En Vinaroz existían unos condicionantes que hacían que ambos estribos no pudieran ser idénticos, lo cual implicó una gran inversión de horas de diseño en los mismos. El condicionante principal, y que supuso muchos retos de diseño y constructivos, fue que en el flanco sur (margen derecho del río) había una estación de bombeo con conductos de saneamiento e impulsión que era imposible de tocar y/o desviar. Pese a que ambos estribos siguen el mismo fundamento estructural, este condicionante sin duda constriñó mucho del diseño del estribo sur, frente a un estribo norte mucho más holgado.

La idea fue anclar las bandas tesas en los puntales delanteros de estos y trasladar la tensión de estas a la parte posterior de los estribos mediante un tirante trasero de hormigón pretensado [Imagen 4]. Con esto se minimizaba al máximo la longitud de las bandas, que eran sin duda la partida más cara del puente.

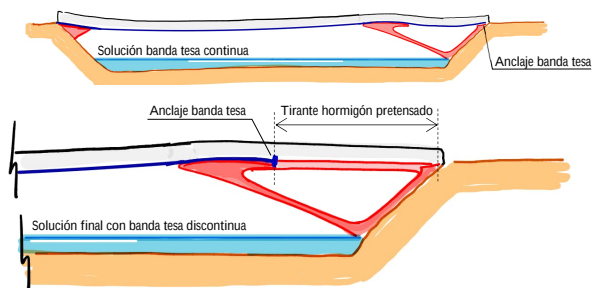


Imagen 4. Soluciones en banda tesa de dos vanos asimétricos. © E. Goberna

La cimentación se realizó con 54 micropilotes de 22 a 24 metros de longitud y 200 mm de diámetro, fijados en la parte superior a los encepados delanteros y traseros de los estribos. Los micropilotes se encamisaron en su parte superior para hacer frente a esfuerzos de corte y momento localizados en el encuentro con el encepado. Cada estribo tiene dos familias de micropilotes. Los delanteros (más cercanos al río) están siempre comprimidos, y los traseros siempre traccionados. Esto se debe al momento

que produce el tiro excéntrico de las bandas tesas hasta el plano de cimentación.

3. Comportamiento estático y dinámico de la pasarela.

La pasarela de Vinaroz es una estructura muy esbelta y por lo tanto flexible. Su geometría bajo cargas variables puede cambiar tanto que no son válidas las superposiciones lineales de casos de carga para obtener los esfuerzos de las combinaciones de cargas. Esta estructura sólo se puede diseñar por tanto con programas de cálculo que admitan la teoría no lineal de tercer orden, es decir, que actualicen la matriz de rigidez bajo la deformada de las cargas que se apliquen.

Además, el contacto de la banda tesa con la silla de montar (el punto de despegue) puede variar dependiendo del grado de carga. Para caracterizar esta propiedad de la pasarela, se dispusieron muelles de contacto no-lineales (que sólo permiten compresiones) en el modelo de elementos finitos. En esa zona, además, los momentos flectores en las bandas de acero crecen abruptamente, por lo que un buen control del punto de despegue de las bandas es fundamental.

En Estado Límite Último (ELU), se consiguió sin duda una estructura en la que, en ningún escenario de carga, se sobrepasaran las resistencias elásticas de diseño de los materiales constructivos. Esto se hizo tanto a nivel global como a nivel local. Los puntos más relevantes, aunque no los únicos, en el diseño en Estado Límite Último fueron:

- 1- Comprobación de que en ningún caso se sobrepasara el límite elástico del acero de las bandas tesas, aun sumando las tensiones de doblado resultantes de posar las bandas sobre las sillas de montar.
- 2- Tensiones controladas en el hormigón en la zona de apoyo de los yunques de las bandas tesas, donde la presión localizada

es muy alta [imagen 5].

- 3- Diseño de detalle de los yunques mediante modelos de elementos finitos [imagen 5].
- 4- Correcta transferencia de las cargas de las bandas a los tendones de pretensado de los tirantes traseros mediante análisis de bielas y tirantes [imagen 5].
- 5- Capacidad resistente suficiente para los tendones de pretensado de los tirantes traseros, capaces de resistir el tiro de las bandas tesa y las flexiones de cargas exteriores.
- 6- Capacidad resistente de todos los elementos de hormigón de los estribos, utilizando como apoyo modelos de elementos finitos y modelos de bielas y tirantes.
- 7- Capacidad resistente de los micropilotes tanto estructural como geotécnicamente.
- 8- Correcta transferencia de la carga de los micropilotes a los encepados correspondientes mediante análisis de bielas y tirantes.

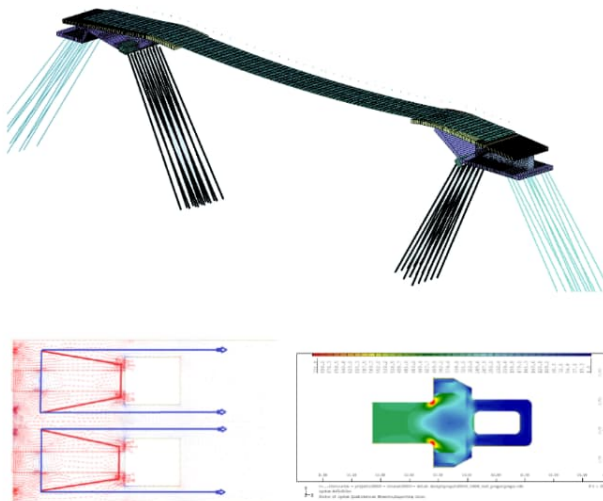


Imagen 5. Modelo de cálculo global y modelos de cálculo locales. © sbp

Los Estados Límite de Servicio (ELS) han sido sin duda un aspecto muy relevante en el diseño de la estructura. De hecho, y comparativamente, verificar los ELS conllevó mucho más esfuerzo que verificar los aspectos

relativos a estados límite últimos. Pasamos a enumerar los puntos más relevantes.

9. Se controló la apertura de fisura en las piezas prefabricadas de hormigón y la descompresión en el tirante pretensado trasero de ambos estribos.
10. Se comprobó que la flecha del tablero para la carga frecuente estuviera por debajo de $L/350$ siendo L la luz de la banda tesa (distancia entre puntos de despegue). Este aspecto se corroboró mediante las pruebas de carga estáticas que se emprendieron [Imagen 6].

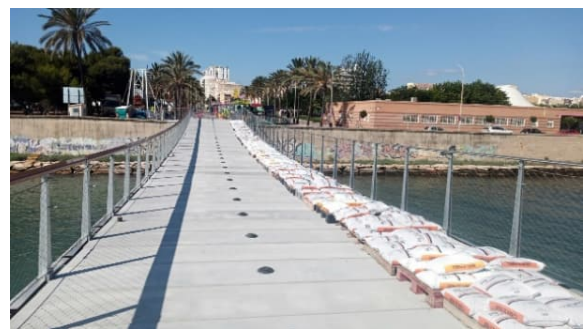


Imagen 6. Pruebas de carga estática. © Ayto de Vinaroz

11. Para el análisis del confort, se hizo un análisis modal en el que se pudo comprobar que algunas frecuencias propias estaban dentro del rango de la excitación que podían producir los usuarios. Se obtuvieron analíticamente las aceleraciones para diferentes casos de carga en resonancia con la frecuencia propia del sistema y se comprobó que estaban dentro del rango mínimo aceptable de confort según HIVOSS [1]. Además, los resultados se corroboraron con la correspondiente prueba dinámica que se materializó con un grupo de 10 a 15 personas andando y corriendo a diferentes velocidades. Las frecuencias propias registradas en la prueba dinámica se correspondían perfectamente a las que el modelo de cálculo predecía.
12. El puente tiene una baja rigidez torsional y la frecuencia propia correspondiente

no está lo suficientemente alejada de la frecuencia propia de flexión [2], por lo que existía riesgo de inestabilidad aeroelástica (en concreto de flameo). Para salir de dudas, se realizó un estudio de túnel con modelo a escala seccional y elástico en túnel de viento. De este estudio se derivó que hacía falta unos perfiladores de borde del tablero para evitar cualquier tipo de inestabilidad.

4. Proceso constructivo

El proceso constructivo de la pasarela supuso hacer frente a no pocos retos. Este empezó con los movimientos de tierras y demoliciones parciales en el lado sur. Acto seguido se instalaron los micropilotes autoperforantes formados por barras roscadas TITAN 73/35 con lechada de cemento de 200 mm de diámetro, con encamisado de acero en el metro y medio superior, tras lo que se construyeron los encepados delantero y trasero de ambos estribos. Con esto se tenía una base para instalar los encofrados de los puntales delanteros que, al volar sobre el río, tenían que ser soportados por cerchas auxiliares.

Tras el hormigonado del puntal delantero, se procedió a la construcción del cabezal del tirante delantero (en cuya parte superior se asienta la silla de montar) y tirante trasero pretensado.

Cuando el hormigón adquirió una resistencia suficiente se procedió al tesado de los tendones de pretensado de los tirantes traseros en dos fases y siguiendo un orden preestablecido.

Los tramos de banda tesa, de hasta 12 metros de longitud, se transportaron en un solo envío por carretera hasta la obra. El ensamblado por soldadura homologada de todas las piezas se hizo in situ sobre cimbra continúa tomando

todas las precauciones necesarias para que la longitud de las bandas de acero fueran las prescritas por el cálculo. La determinación de la longitud de las bandas es sin duda un parámetro crucial para que la pasarela tuviera la geometría deseada en condiciones finales (estado G+P). En la determinación de ésta se tuvieron en cuenta tres factores:

- Las bandas tensas se ensamblaban en condiciones sin tensión (*stressfree*), por lo que hay que corregir en forma de preacortamiento el alargamiento elástico que las bandas tendrán en estado permanente.
- posibles diferencias entre la temperatura ambiente en el momento de anclar las bandas a los estribos y la temperatura en la que se ensambló.
- Posibles errores de tolerancias tanto en la longitud finalmente ensamblada como en la distancia entre puntos de apoyo de los yunques en los estribos.

Una vez calculada la longitud total de cada banda y ensambladas todas las piezas de la misma, se procedió a izar las bandas de acero hasta dejarlas posadas sobre las sillas de montar de los estribos.

Para el izado de las bandas tesas se usó una celosía auxiliar de la que colgaban ambas bandas tesas. La constructora, con gran experiencia en cimbrados, tenía esta celosía en stock. La operación se llevó a cabo con sendas grúas a ambos márgenes del río. La grúa norte sostenía el extremo sur de la cercha en tanto el extremo norte era sostenido por un camión que se desplazaba sincronizadamente hacia el sur. En el momento de máxima aproximación del camión a la margen izquierda del río, se transfería el apoyo del extremo sur de la grúa norte a la grúa sur, en tanto la grúa norte se hacía cargo del extremo norte de la celosía. [Imagen 7]. Tras esta operación, que creó bastante expectación en el pueblo, la cercha se posó sobre ambos estribos.



Imagen 7. Vista aérea durante el izado de las bandas tesa. © GeoDroneAir

Una vez posada la cercha, las bandas se fueron descendiendo de forma progresiva hasta quedar finalmente apoyadas sobre las respectivas sillas de montar. Tras la instalación de las respectivas sillas de tesado, se procedió a la puesta en carga de las bandas mediante gatos hidráulicos [imagen 8].



Imagen 8. Banda tesada mediante gato hidráulico (dcha.) © sbp

Se hizo un control, no solo de la fuerza de tesado, sino también de la geometría que adquirió la banda tesa bajo su propio peso, así como de la temperatura ambiente. De esta manera, podíamos asegurarnos de que, tras colocar las placas prefabricadas, la fuerza y la geometría en las bandas sería la proyectada. Finalmente se colocaron una a una todas las losas prefabricadas y las barandillas. Al finalizar dicha colocación, teníamos la pasarela lista para ser usada a falta de las preceptivas pruebas de carga.

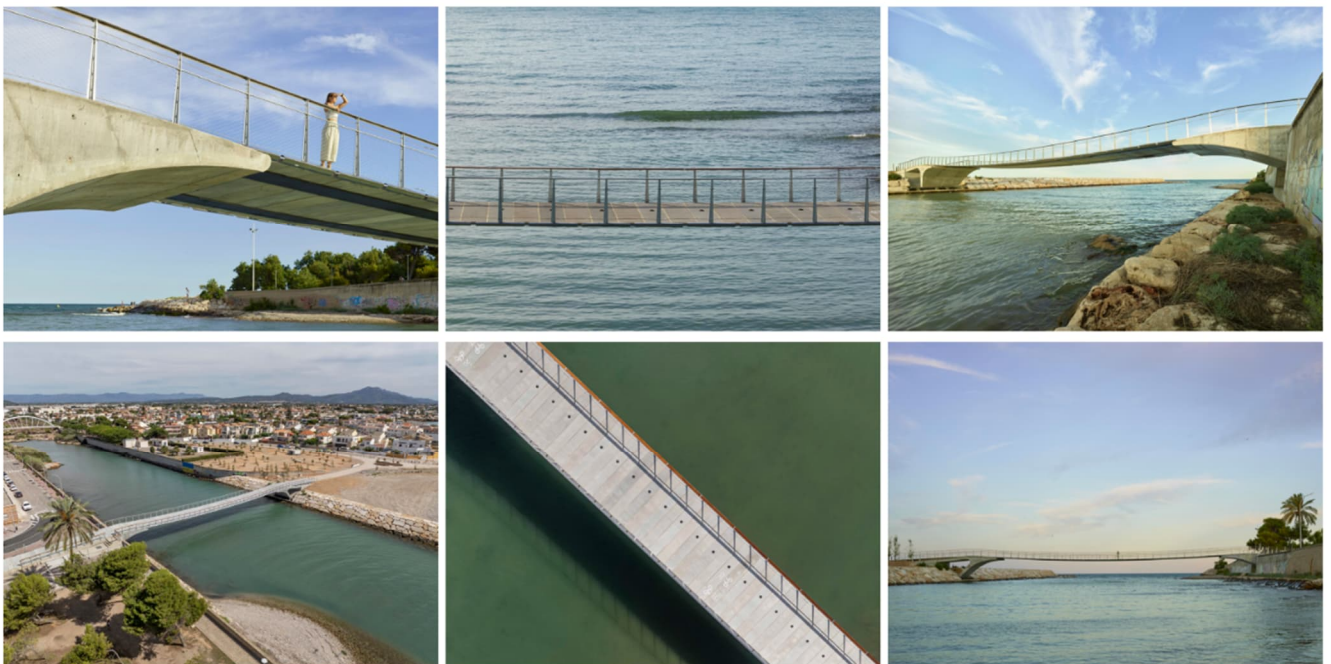


Imagen 9. La pasarela de Vinaroz construida. © Roland Halbe

Pablo Kubicki

4. Conclusiones

La pasarela de Vinaroz es una estructura muy singular que forma ya parte de la imagen de la ciudad. Era una infraestructura muy necesaria, y tuvo una gran acogida por el público.

Esta pasarela es un buen ejemplo de que un método racional de concepción y diseño radica en un resultado coherente, ligero, minimalista y moderno. La tipología en banda tesa ha permitido alcanzar todas estas metas.

Su diseño y construcción supusieron una gran variedad de retos, los cuales se han presentado en su mayoría en este artículo.

Mediciones básicas de la pasarela:

- Acero en bandas tesas: 20650 kg
- Hormigón en estribos: 353 m³
- Hormigón en placas prefabricadas: 56.2 m³
- Micropilotes: 1224 m
- Tendones de pretensado: 3983 kg

Agradecimientos

En un proyecto como este hay mucha gente implicada a la que hay que agradecerles su esfuerzo en conseguir para que este proyecto haya sido una realidad. Como no queremos quedarnos en un “gracias al equipo”, creemos que es de merecida justicia intentar nombrarlos a todos, aún a riesgo de dejarnos a alguien.

- Cliente: Ayuntamiento de Vinaròs, Castellón
- Diseño e ingeniería estructural: schlaich bergermann partner (sbp) en Madrid.

Enrique Goberna

Knut Stockhusen

Pedro Peña

Roberto Piñol

Alberto Sánchez

Carlos Canella

Fernando Escamilla

Carlos Nieto

- Arquitectura y Paisajismo: Burgos & Garrido Arquitectos
- Dirección de obra: Josep Miguel Forner y Javier Ayza Ferreres
Arquitectos y técnicos municipales: Carla Miralles, Ana N. Arnau, M^a Feli Cruz Beltrán
- Constructor: Levantina, Ingeniería y Construcción (LIC) en UTE con PANTALLAX
Jaume Lanzas y Jose María Briz en la gerencia y construcción.
- Taller de acero: Solmecta
- Ingeniería hidrológica: Pedro Arévalo Rey
- Tecnología medioambiental: María Ángeles Ceñal

Referencias

- [1] Hivoss (2008). *Design of Footbridges. Guideline. Human Induced Vibrations of Steel Structure* (Hivoss-RFS2-CT-2007-00033).
- [2] Strasky, J. (2005) *Stress ribbon and cable-supported pedestrian bridges*, London, Thomas Telford.