

Tablero ortótropo mixto y armadura de fibra de basalto. Una alternativa innovadora frente a los tableros convencionales.

Innovative development of an orthotropic composite slab for bridges

Rolf Jung^a, Tobias Mansperger^b, Stefan Burgard^b, Juan Bravo^d, Antonio Carnerero^c,
Michael Müller^{a*}.

^a Dipl. Ing. Leonhardt, Andrä und Partner Beratende Ingenieure VBI AG. Consejero Delegado.

^b Dipl. Ing. Leonhardt, Andrä und Partner Beratende Ingenieure VBI AG.

^c PhD. ICCP. Leonhardt, Andrä und Partner Beratende Ingenieure VBI AG.

^d MSc. ICCP. Leonhardt, Andrä und Partner Beratende Ingenieure VBI AG.

*Autor para correspondencia: michael.mueller@lap-consult.com

RESUMEN.

El aumento de las cargas de tráfico ha provocado grandes daños por fatiga en los tableros ortótropos metálicos existentes. Los tableros de hormigón y mixtos son menos susceptibles a la fatiga, pero son considerablemente más pesados. Con el llamado tablero ortótropo mixto se consigue una estructura ligera y robusta como alternativa a las tipologías de tableros existentes. El concepto de tablero ortótropo mixto ha existido desde la década de los 30, y es ahora redescubierto junto con la innovadora implementación del hormigón reforzado con barras corrugadas de fibra basáltica, cuya colaboración conjunta consiguen materializar tableros esbeltos, ligeros, y con alta resistencia a fatiga.

ABSTRACT.

The increasing traffic loads have caused extensive fatigue damage to existing orthotropic steel decks. Concrete and composite decks are less susceptible to fatigue, but are considerably heavier. The so-called orthotropic composite slab (Ortho-composite-slab) provides a lightweight and robust structure as an alternative to the existing deck types. The concept of orthotropic composite slabs has existed since the 1930s, and is now rediscovered alongside with the innovative implementation of reinforced concrete using basalt fibre rebar, whose combined contribution achieves slender, lightweight, and high fatigue strength decks.

PALABRAS CLAVE: puentes, tablero innovador ortótropo mixto, armadura de fibra basalto.

KEYWORDS: bridges, innovative orthotropic composite deck, non-metallic basaltic reinforcement

1. Introducción.

Los tableros metálicos ortótropos para puentes se caracterizan por una elevada relación resistencia peso. Los detalles de soldadura y el gran incremento en las sollicitaciones debidas al

tráfico han provocado grandes daños por fatiga en los puentes de tablero ortótropo [2].

Con el tablero ortótropo mixto -el cual consiste en añadir a la chapa ortótropa una fina

capa de hormigón armado colaborante cuya conexión se materializa mediante conectadores continuos dentados- se abre las puertas al desarrollo de puentes con tablero ligero y robusto como alternativa a las tipologías de tableros existentes.

En las décadas de 1940 y 1950 Leonhardt [3] y Robinson [4] emplearon por primera vez este tipo de tableros para puentes de carretera. Sin embargo, estos fueron perdiendo importancia debido al gran éxito del tablero ortótropo en las pasadas décadas.

Con la aparición de los problemas de fatiga (debido a unas exigencias de tráfico mayores), la investigación en detalle del comportamiento de los conectadores continuos, y el innovador desarrollo de refuerzos en fibra de basalto, se retoma la idea del tablero ortótropo mixto.

2. Tableros en puentes de grandes luces.

Existen diversas tipologías de tableros de puentes (figura 1). Estas se pueden agrupar en: tableros metálicos (tablero ortótropo, primera sección transversal de la figura 1), tableros de hormigón (segunda sección transversal de la figura 1), y tableros mixtos (tercera sección transversal de la figura 1).

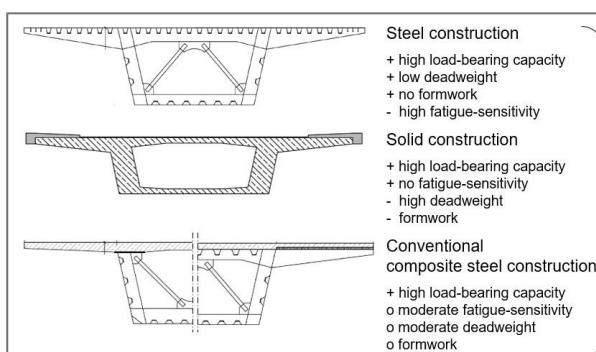


Figura 1. Resumen de las ventajas y desventajas de las diferentes tipologías de tablero [1].

Los tableros mixtos se pueden diferenciar a su vez en dos variantes: tableros en sección cajón metálico abierto y losa de compresión

(lado izquierdo de la sección transversal inferior mostrada en la figura 1), y el tablero en sección cajón cerrado metálico y losa de compresión ejecutada sobre prelosas prefabricadas (lado derecho de la sección transversal inferior mostrada en la figura 1).

Los tableros ortótropos metálicos son caracterizados por su gran resistencia y ligero peso. Además, no requieren de encofrados. Sin embargo, el incremento de las cargas de tráfico ha generado grandes daños por fatiga a esta tipología.

La conexión de los rigidizadores a la platabanda superior es la más afectada. De acuerdo a la DIN EN 1993-2/NA [7], no se requiere comprobación a fatiga, si tanto la platabanda superior como los rigidizadores son diseñados de acuerdo a las recomendaciones recogidas en el Anexo C del EN 1993-2 [8].

La recomendación requiere como mínimo una platabanda superior de 14mm. Sin embargo, si esté espesor fuera verificado a fatiga resultaría que el periodo de vida real se encontraría entre 30 y 50 años, requiriéndose reparaciones mayores antes de haber finalizado su periodo de vida útil. Para evitar esto último, los nuevos tableros ortótropos están siendo proyectados con mayores espesores de chapa [6].

Los tableros de hormigón y tableros mixtos convencionales son menos susceptibles a la fatiga, pero son considerablemente más pesados. Tienen también altas capacidades resistentes, pero los tiempos de ejecución son mayores al necesitar encofrados.

En los tableros mixtos de sección cajón cerrada, el encofrado se elimina, pero en contrapartida, se requiere de elementos prefabricados adicionales.

Con el tablero ortótropo mixto, se consigue una estructura muy ligera similar al tablero ortótropo común, y al mismo tiempo igual de resistente que los otros tableros antes mencionados. Además, debido a la capa de compresión se aumenta considerablemente la resistencia a fatiga sin requerir de elementos

auxiliares (encontrados o prelosas) para la ejecución de esta última.

La figura 2 muestra las diferencias de pesos de las tipologías de tablero para puentes de carretera antes mencionadas.

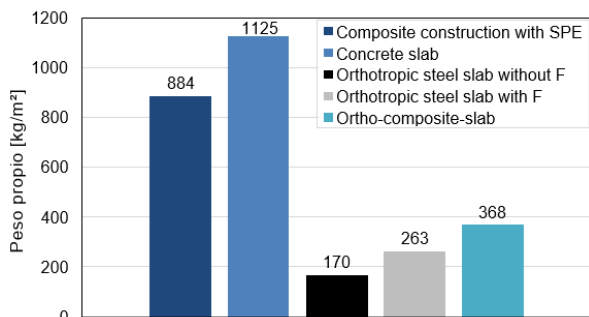


Figura 2. Peso propio de losas para puentes de carreteras [1].

El tablero mixto y el tablero de hormigón son de lejos los más pesados, 900 y 1100 kg/m² respectivamente. El más ligero es la losa ortótropa convencional, pero como ya se ha mencionado anteriormente no está adaptada a las solicitaciones de tráfico actuales. Los tableros ortótropos con espesores de chapa adaptados al tráfico actual tienen un peso mayor del orden de 260 kg/m². El tablero ortótropo mixto se encuentra en una posición próxima a este último, y muy alejada de los tableros convencionales mixto y de hormigón, con un peso del orden de 370 kg/m² (sin contabilizar la reducción de espesores de losa por empleo de barras no-metálicas).

3. El concepto y construcción del tablero ortótropo mixto.

3.1. Esquema del tablero ortótropo mixto.

El tablero ortótropo mixto consiste en añadir una fina capa de hormigón armado sobre la platabanda superior. La capa de hormigón cuenta con una única fila de refuerzo, y la colaboración mixta se materializa gracias a unos conectores continuos dentados (Figura 3).

Estos conectores transmiten el esfuerzo rasante entre hormigón y platabanda superior.

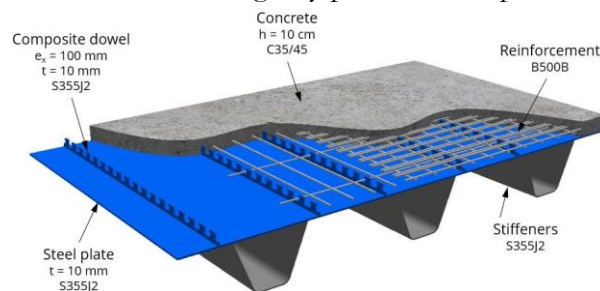


Figura 3. Esquema de tablero ortótropo mixto.

Los conectores están soldados a la platabanda superior con la zona dentada embebida en el hormigón. Actualmente están regulados por la homologación general (aBG) Z-26.4-56 en Alemania [9].

Gracias a la colaboración de la fina capa de hormigón, los esfuerzos en la conexión de los rigidizadores son significativamente menores. Esto conlleva a un aumento drástico en la capacidad resistente frente a fatiga. La Figura 4 muestra los esfuerzos debidos a la carga puntual de tráfico en la chapa de acero de un tablero ortótropo común frente al tablero ortótropo mixto.

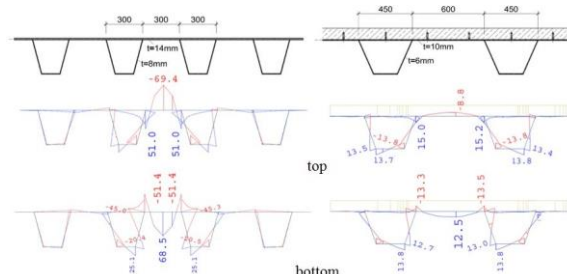


Figura 4. Comparación de tensiones [N/mm²] en chapas metálicas de una losa ortótropa convencional frente a una losa ortótropa mixta.

Además de la significativa mayor capacidad frente a fatiga, su alta prestación en términos de resistencia-peso es un factor también a destacar (Figura 2). Esto no sólo afecta al tablero, sino que también permite reducir costes en la subestructura de un puente.

El uso de conectores continuos dentados en lugar de los pernos comunes da lugar a una construcción con menores entallas; estos conectores pueden ser ejecutados con

sistemas de soldadura automatizada. El pequeño espesor de chapa y el gran espacio entre conectadores reduce el volumen de soldadura.

La platabanda superior sirve de encofrado para la losa de hormigón, por lo que con la eliminación del encofrado común se eliminan las cimbras, y con ello las limitaciones para hormigonar mayores longitudes de losa. Además, al necesitar sólo una única capa de armadura, se reducen los costes y tiempos de ejecución.

Otra ventaja es el bajo riesgo de congelación del asfalto. En climas muy fríos, con temperaturas que pueden oscilar rápidamente de valores considerablemente por debajo del punto de congelación a valores por encima del mismo, el agua de las precipitaciones se convierte instantáneamente en hielo nada más tocar el asfalto, esto es debido a la escasa capacidad de aislamiento del tablero ortótropo (sólo tiene la capa de impermeabilización y el espesor de asfalto). Sin embargo, este efecto se mitiga sustancialmente con el tablero ortótropo mixto gracias al espesor adicional de hormigón.

Relacionado con el punto anterior, las limitaciones relacionadas con la temperatura de asfaltado son también significativamente inferiores.

3.2. Comportamiento estructural.

El comportamiento principal del tablero ortótropo consiste en la distribución de las cargas locales de las ruedas de los vehículos hacia los rigidizadores longitudinales y respectivamente a las vigas transversales. La losa de hormigón, aun siendo relativamente esbelta, forma en conjunto con la platabanda superior una estructura mixta.

Los esfuerzos de rasante en sentido longitudinal y transversal, tanto de cargas locales como globales, son relativamente pequeños, en comparación con los tableros mixtos, donde se introducen esfuerzos de rasante de forma concentrada sobre las alas superiores conectadas a la losa de hormigón. En los tableros ortótropos

mixtos la transmisión de esfuerzos rasantes se realiza en un área más grande.

4. Ejemplos de aplicación. Proyectos actuales.

4.1. Viaducto Wittenberge sobre el Río Elba.

El Viaducto de carretera Elbebridge Wittenberge de una longitud total de 1110.5 metros está conformado por un puente de aproximación de 696 metros en hormigón pretensado, y un puente principal metálico de 412 metros sobre el río Elba.

El puente principal tiene una distribución de vanos 126-160-126m, y una esbeltez 1/32, la superestructura requiere ser ligera, pero a la vez resistente a la fatiga.

El puente es el resultado de un concurso de diseño que se celebró en 2008. El proyecto ganador fue diseñado por Leonhardt, Andrä und Partner, Dresden y Jean-Jacques Zimmermann, Darmstadt, Alemania. El diseño preliminar fue finalizado en 2012, y la construcción comenzará ahora en 2022.

La solución adoptada para el puente principal es un tablero ortótropo mixto de sección multicelular que ayudada mediante costillas metálicas consigue alcanzar los 30.4 metros de anchura requeridos. Además, esta sección cuenta con un recrido superior ondulado ubicado en la mitad de la sección, entre las dos calzadas.

El tablero ortótropo mixto está constituido por fina capa de hormigón armado con refuerzo en una sola capa.



Figura 5. Visualización del Puente Wittenberge. Proyecto de Leonhardt, Andrä und Partner

El recrecido de la célula central tiene un canto con un máximo de 4,60m sobre las pilas. En la dirección transversal, las cargas de los voladizos son transmitidas al cajón central a través de las costillas metálicas, y de ahí al recrecido.

El puente se ejecutará por empuje, para lo cual se prevé que la primera parte a empujar del tablero sea aligerada con la intención de que la viga central de la sección transversal haga de nariz de lanzamiento.

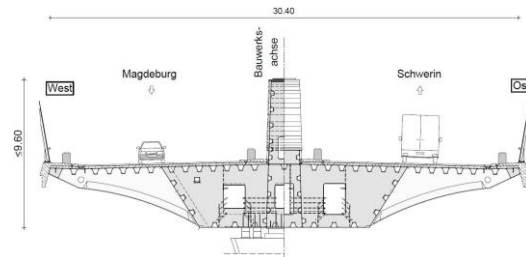


Figura 6. Sección transversal tipo sobre pilas.

El diseño preliminar del puente, que ganó el concurso de diseño inicial en 2008, incluía una losa de hormigón armado de 30 cm de espesor. Debido a la existencia de la viga central de canto

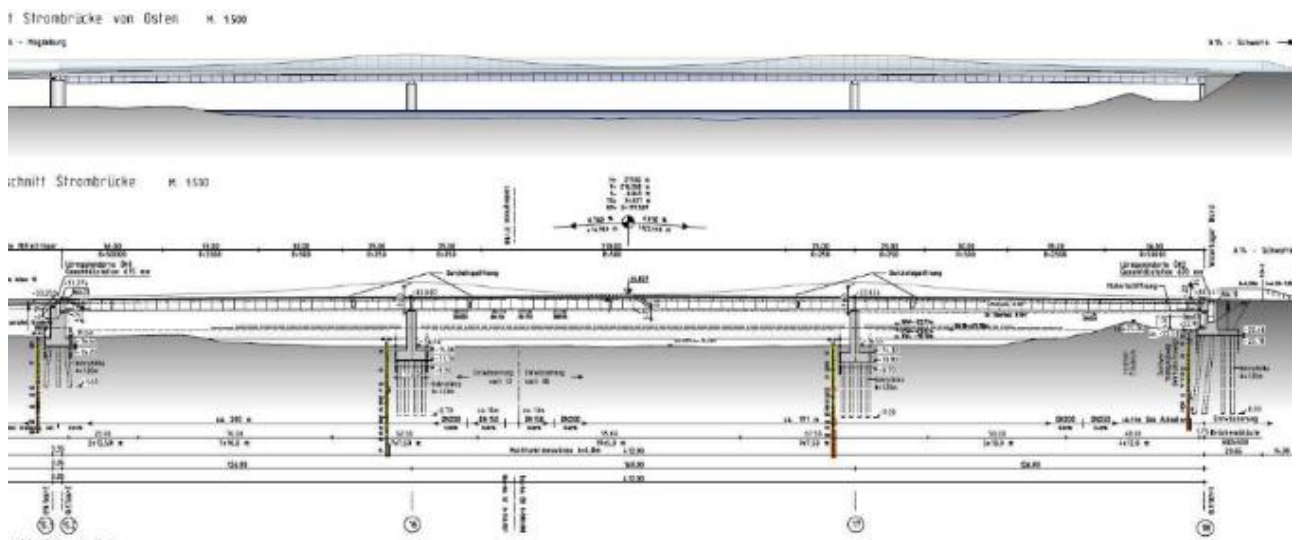


Figura 7. Alzado Puente Wittenberge

variable la cual sobresale por encima de la calzada, la losa de compresión está apenas solicitada por flexión longitudinal.

Todo esto sumado a la exigencia al tablero de una rigidez suficiente para poder ser este empujado, surgió la necesidad de reducir la losa de hormigón en un 50%.

Este tipo de construcción es conocido internacionalmente, pero nunca antes se había realizado en un puente de nuevo diseño en Alemania.

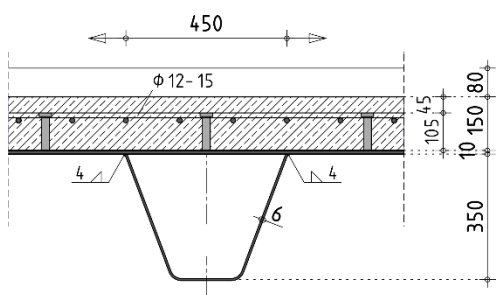


Figura 8. Esquema de la losa ortótropa mixta

El tablero del Puente Wittenberge consiste en una platabanda superior de 10 mm, rigidizada longitudinalmente por rigidizadores en forma de bulbo de 450mm de ancho separados entre si a 900 mm. Sobre la platabanda se ejecuta in-situ una losa de hormigón armado colaborante de 15 cm de espesor, con una única capa de armadura en su parte superior.

La losa de hormigón está conectada a la platabanda superior mediante pernos separados 300 mm longitudinalmente, y 450 mm transversalmente.

El puente Wittenberge es considerablemente grande, aproximadamente 12.500 m². Por lo que se ha decidido optar por espesores conservadores de la losa, en vez de buscar la optimización de los mismos.

4.2. Paso Superior A400 sobre la Autopista A3 – Innovación con armadura no-metálica basáltica.

Cerca de la ciudad de Núremberg se está construyendo una pasarela innovadora para los

ciclistas, que cruza la autopista A3. La estructura sigue los criterios de la guía de diseño establecida para la autopista A3 entre Núremberg y Würzburg, correspondiente a la tipología de construcción 2 para carreteras secundarias. El primer puente de este tipo se construyó con anterioridad en la parte más larga de la A3 en el segmento 400c.

Se trata de un puente pórtico con pilas arqueadas y tablero ortótropo mixto. La materialización de la conexión hormigón-acero se realiza mediante conectadores continuos dentados. La losa de hormigón cuenta con una armadura no-metálica en base a barras corrugadas de fibra de basalto fabricadas por la empresa DBS.



Figura 9. Vista del paso superior A400c.

La estructura es una adaptación de la incluida en guía de diseño de la administración de carreteras, la cual se ha adaptado para este proyecto con varios elementos innovadores: el uso de un tablero ortótropo mixto, una chapa perfilada como medio de conexión entre chapa metálica y losa hormigón, y una armadura no-metálica de fibra de basalto.

El paso superior sobre la Autopista A3 tiene un ancho de 3.50m. El canto es variable con una altura de 0.86m en el centro de vano y 3.50m en el arranque de los estribos. La luz principal es de 54.20m con una esbeltez 1/63.

La sección transversal es un cajón mixto que cuenta con costillas metálicas y unos diafragmas dentro del cajón con una separación longitudinal de 3.00m. La anchura del cajón en

la cara superior es de 1.70m. Al tener almas inclinadas 11° la cara inferior resulta de ancho variable con 1.55m en el centro de vano, y 1.10m en los estribos.

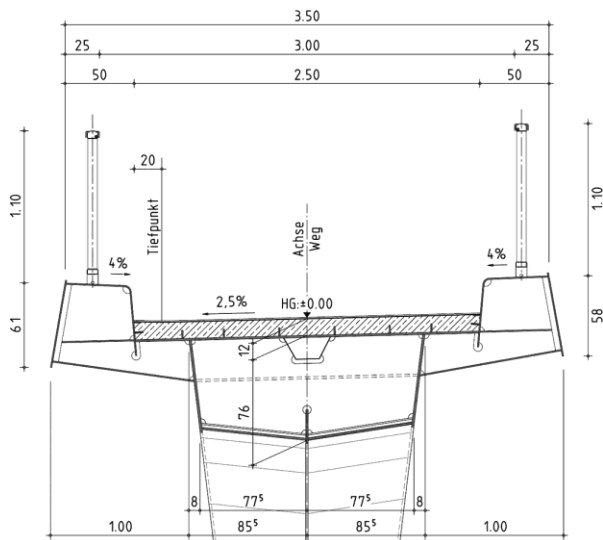


Figura 10. Sección transversal del paso superior A400

En los estribos las chapas de las alas y almas de cajón se prolongan dentro del estribo macizo de hormigón y se conecta con pernos conectores en una longitud de unos 2.0m.



Figura 11. Sección transversal del paso superior A400

La losa superior cuenta con una chapa rigidizada y una losa de hormigón de 10cm de espesor con un hormigón de calidad C35/45.

Está limitada en ambos lados por una imposta metálica, por lo que no se requería de ningún encofrado para hormigonar la losa.



Figura 12. Vista del paso superior A400

La armadura de la losa está realizada con barras de fibra de basalto de alta resistencia en vez de barras de armadura metálica, que permiten un recubrimiento mucho menor, un comportamiento de resistencia más eficaz y una durabilidad más larga. El revestimiento consiste en una impermeabilización de 2 capas con una base EP-/PUR con un espesor de solo 4mm cada una a la que final se entremezcla una arena de cuarzo.

El diseño de la estructura se ha realizado según Eurocódigo y los manuales para puentes peatonales y puentes integrales según RE-Ing.

5. Armadura no-metálica en base a barras corrugadas de fibra de basalto.

Para poder reducir el espesor de la losa de hormigón, y a la vez diseñar una estructura con una durabilidad elevada, se ha decidido utilizar una armadura no-metálica en base a barras de fibra de basalto de la empresa DBS GmbH (Deutsche Basaltstab GmbH).



Figura 13. Barras corrugadas de fibra de basalto.

El material es un compuesto de fibras de basalto y viniléster, cuyo comportamiento en conjunto con el hormigón es principalmente igual al de un hormigón armado convencional.

La geometría es distinta a la de una barra corrugada de acero debido a las características del proceso de fabricación. Tal y como se puede apreciar en la figura 13, estas barras cuentan con dos caras planas y dos caras corrugadas. A pesar de esto, la conexión con el hormigón es muy buena. Además, las corrugas son el resultado directo del proceso de fabricación por lo que se evitan las operaciones posteriores de fresado de las corrugas, característica que diferencia este producto de otros similares.

Se emplean, principalmente, barras conformadas por 18 rovings (haces de fibras) de basalto, tipo T18-B. La resistencia última a tracción es de 75kN, que es equivalente a una resistencia a tracción de 2300N/mm², referido al área de la fibra de unos 18*1,8mm = 32,4mm². Con un módulo de deformación de E=85000 N/mm² resulta una elongación de resistencia de $2300/85.000 = 27\%$.

Estas armaduras son inertes a la corrosión por lo que el único recubrimiento a disponer será el requerido para la transmisión de esfuerzos hormigón-refuerzo. Esto se traduce en espesores de losa más reducidos y en un aumento del brazo mecánico de las armaduras.

El engranaje hormigón-barras localizado a dos caras permite focalizar los esfuerzos de adherencia en el sentido horizontal, liberando de esfuerzos el sentido vertical, por lo que se evitan

los problemas de adherencia de un reducido recubrimiento.

El corte de las barras en obra se puede realizar con equipos simples, como: sierras, discos de corte o cizallas.

El procedimiento de fabricación permite la conformación de barras dobladas, como cercos y horquillas, por lo que son de aplicación los procesos usuales de diseño y montaje de armadura de acero.



Figura 14. Jaula de armado con armadura en cercos en base a barras de fibra de basalto.



Figura 15. Mallas de armadura en base a barras de fibra de basalto.

6. Conclusiones.

La construcción de tableros mixtos ortótropos ya ha demostrado ser una solución muy económica y competitiva para puentes de carretera. Combinando la ligereza de los tableros ortótropos con la robustez de los tableros mixtos, hacen de esta tipología una solución muy eficaz para puentes esbeltos de grandes luces, donde la optimización del peso es esencial.

La combinación de esta tipología con la armadura no-metálica en base a barras corrugadas de fibra de basalto, da como resultado una sinergia de efectos, por la cual se pueden conseguir construcciones optimizadas al máximo en cuanto a uso de material, ajuste geométrico, y transmisión de cargas.

Además del ventajoso comportamiento estructural, la construcción y ejecución en obra están facilitadas por el alto grado de prefabricación, ahorro de encofrados, y escasas juntas de hormigonado.

Finalmente, hay que destacar que la construcción no es sólo muy económica, sino que también, los costes económicos derivados del mantenimiento son sustancialmente reducidos al no tener corrosión de armaduras e incluso al no requerir de sistemas de impermeabilización complejos.

Referencias

- [1] Stroetmann R., Karge C., Mansperger T. Wirtschaftliche und dauerhafte Ortho-verbundfahrbahnplatten mit Dübelleisten für Straßenbrücken (Losas ortótropas mixtas, económicas y duraderas con conectadores continuos dentados para puentes de carretera) FOSTA- Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Research Project P 1265. Technische Universität Dresden, Institut für Stahl- und Holzbau, 2022 (en proceso).
- [2] Bundesanstalt für Straßenwesen (editor). Expertengespräch zur Instandsetzung orthotroper Fahrbahnplatten (Debate de expertos sobre la rehabilitación de tableros ortótropos). Bast Bundesanstalt für Straßenwesen. Bergisch Gladbach, Oktober 2005 (www.bast.de).
- [3] Leonhardt F. Die neue Straßenbrücke über den Rhein von Köln nach Deutz. Die Bautechnik. Jahrgang 26 (1949) Heft 7, S. 193-199.
- [4] Fauchart J., Sfintesco D. Desarrollo y aplicación del tablero mixto de Robinson en Francia. IABSE Rep. Work. Commissions 2, 1968, S. 155-164.
- [5] Mansperger T., Jung R. Neue Wege im Verbundbrückenbau. Stahlbau 87 (2018), Heft 8, S. 752-758.
- [6] Jung, R., Mansperger, T. (2020) Die Ortho-verbund-Fahrbahnplatte. Stahlbau 89 (2020), Heft 2, S. 129-137.
- [7] DIN EN 1993-2/NA Eurocódigo 3 Proyecto de estructuras de acero. Parte 2: Puentes. Anejo Nacional Alemán, 2014.
- [8] EN 1993-2 Eurocódigo 3 Proyecto de estructuras de acero. Parte 2: Puentes, 2010.
- [9] Deutsches Institut für Bautechnik, Allgemeine Bauartgenehmigung für Stahlverbundträger mit Verbunddübelleisten in Klothoiden- und Puzzleform, Z-26.4-56, 2018.
- [10] EN 1994-1-1 Eurocódigo 4: Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón. Parte 1-1: Reglas generales y reglas para edificación.
- [11] Vayas I. Verbundkonstruktionen auf der Grundlage des Eurocode 4. Verlag Ernst & Sohn, 1999.
- [12] Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA), Forschungsprojekt P 804 Neue Systeme für Stahlverbundbrücken. Verbundfertigteilträger aus hochfesten Werkstoffen und innovativen Verbundmitteln. Endbericht, 2014.
- [13] Lungershausen H. Zur Schubtragfähigkeit von Kopfbolzendübeln. Technisch wissenschaftliche Mitteilungen des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau, Ruhr-Universität Bochum, 1988.