

Viaducto Ferroviario Mixto V3 del Nuevo Tren Interurbano México-Toluca. Concepción y proyecto

Composite Railway Viaduct V3 of the New Mexico-Toluca Interurban Train. Conception and project

Miguel Ortega Cornejo^a, Pablo Solera Pérez^b, Pedro Atanasio Utrilla^c,

^a Máster Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin. Director General. miguel.ortega@tylin.com

^b Máster Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin. Jefe de Proyectos Senior. pablo.solera@tylin.com

^c Máster Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin. Jefe de Proyectos Senior. pedro.atanasio@tylin.com

RESUMEN

El Viaducto Mixto 3 es uno de los viaductos ferroviarios más importantes del nuevo Tren Interurbano México-Toluca. Situado en la demarcación de Cuajimalpa de Morelos, al oeste de la Ciudad de México, permite el cruce elevado del carril derecho de la autopista México - Marquesa. La orografía de la zona, junto con la necesidad de realizar un cruce muy esviado y en curva sobre la autopista, han condicionado la solución planteada.

ABSTRACT

Viaducto Mixto 3 is one of the most important railway viaducts of the new Mexico-Toluca Interurban Train. Located in the Cuajimalpa de Morelos district, to the west of Mexico City, it allows for the elevated crossing of the right lane of the Mexico-Marquesa highway. The area's orography, combined with the need to make a sharp curve over the highway, has influenced the proposed solution.

PALABRAS CLAVE: puente ferroviario, doble acción mixta, acero, hormigón

KEYWORDS: railway bridge, double composite work, steel, concrete

1. Introducción

La Nueva Línea de Tren Interurbano México-Toluca tiene una longitud de 57.7 km entre la capital del Estado de México y la ciudad de Toluca de Lerdo (Figura 1). Debido a las exigencias de la orografía, las limitaciones impuestas por las características intrínsecas del ferrocarril así como las restricciones urbanas en la periferia de la gran urbe que es Ciudad de México requiere del proyecto de gran cantidad de viaductos en la traza, siendo algunos de ellos resueltos con estructuras de luces importantes.

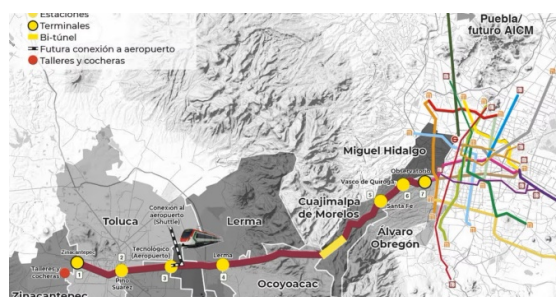


Figura 1. Nueva línea ferroviaria del Tren Interurbano México-Toluca.

Entre los viaductos más representativos se encuentra el Viaducto Mixto V3 situado en la

Demarcación de Cuajimalca de Morelos, a la salida de Ciudad de México.

El nuevo puente (Figura 2) cruza muy esviado sobre la autopista lo que condiciona principalmente su diseño.

El Proyecto de Construcción del tablero del tramo 3 del viaducto ha sido realizado por TYLin adecuando la solución del proyecto original a los medios de construcción del contratista que ha ejecutado la obra. Originalmente la sección metálica del tablero

estaba diseñada como sección cajón. TYLin no realizó el rediseño de la subestructura, sino que se mantuvo la subestructura del proyectista original, SENER. Como es conocido, la importancia de la acción sísmica en México es muy elevada, no obstante, el tablero modificado no varía apenas respecto del proyecto original, por lo que el dimensionamiento de la subestructura no se ve afectado por la modificación del tablero.



Figura 2. Vista general del Viaducto 3 de la línea México-Toluca

2. Descripción general del tablero

El tablero del tramo 3 consiste en una viga continua de canto variable con 4 vanos de luces $44.0+47.5+95.0+56.5$ m, siendo por tanto la longitud total del tramo 243 m. La distribución de luces viene determinada por la necesidad de salvar con el vano principal la autovía con un esviaje muy grande.

El vano principal (vano 3) tiene una luz muy elevada frente a los vanos de compensación, por lo que dichos vanos (vanos 2 y 4) se encuentran

sometidos a flexión negativa en casi la totalidad del vano para la mayoría de combinaciones de cargas. Además, en el caso del vano 4, al ser extremo, es necesario la disposición de un contrapeso mediante el relleno de la sección con hormigón para evitar la reacción ascendente en los apoyos. Este contrapeso tiene una longitud de 12 m. El problema estructural de la longitud insuficiente en los vanos de compensación se presenta en otras realizaciones de carretera tales como el Puente sobre el Río Nalón [2] o el Puente sobre el Río Tajo en Talavera de la Reina

[3], o en el Puente ferroviario sobre el Río Grande en Brasil [4].

El canto de la viga en la zona de canto constante es de 3.05 m (sin contar el bombeo de la losa), siendo el canto de la sección metálica de 2.70 m. El canto es constante en el vano 1 y el final del vano 4. En los vanos 2 y 3 y parte del vano 4 la viga es de canto variable alcanzando un máximo de 7.05 m total (6.70 metal) en las secciones de apoyo en pilas y el mínimo en centro de vano de 3.05 m. Las relaciones canto/luz en el vano principal son de $L/31.1$ en centro de vano y $L/13.5$ en apoyos, lo que supone un tablero esbelto para la tipología en ferrocarril.

El ancho del tablero es de 11.50 m, dando cabida a dos vías de la línea de tren interurbano. La sección está formada por la viga metálica de canto variable y la losa de hormigón de 0.35 m de espesor en el voladizo y 0.408 m en el eje del tablero con un bombeo del 1%. La sección metálica consiste en una sección bijácena (Figura 3). La separación entre las vigas doble T que conforman la bijácena es de 6 m, quedando los voladizos de la losa en 2.5 m. Esta separación junto a las dimensiones elevadas del canto en la zona de canto variable determina la dificultad de transporte de las piezas con la sección completa por tamaño. La tipología bijácena en puentes de ferrocarril sigue la tradición de la empleada por primera vez en España en el Viaducto sobre el Arroyo las Piedras [1].

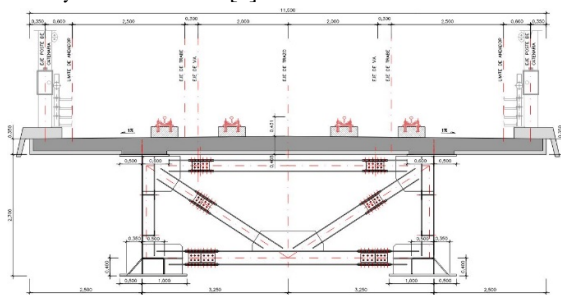


Figura 3. Sección del tablero en zona canto constante.

3. Criterios de diseño del tablero

Para mejorar el transporte y ensamblaje de las vigas metálicas se han diseñado las uniones de los arriostramientos y mamparos atornilladas (Figuras 4 y 5), de manera que se puedan transportar las vigas doble T individualmente y se monte la sección completa en obra de manera rápida con el uso de uniones atornilladas, dejando así la necesidad de soldadura en obra únicamente para las uniones entre tramos de vigas en longitudinal (juntas transversales de las vigas principales).



Figura 4. Jácenas transportadas individualmente a obra.



Figura 5. Uniones atornilladas en celosías transversales para unión en obra.

Las uniones atornilladas diseñadas son pretensadas. Este tipo de unión es indicado para viaductos de ferrocarril, como es nuestro caso. En las uniones con tornillos pretensados la transmisión de los esfuerzos a un lado y otro de la unión no se produce por la resistencia a corte propia del tornillo (sometido a esfuerzo por contacto entre espiga y pared del agujero), sino que la transmisión del esfuerzo se debe a la fricción entre superficies de contacto sometidas a la compresión inducida entre superficies al traccionar los tornillos. La normativa considerada en la caracterización de los tornillos, tipo de tratamiento superficial, dimensiones, procedimiento de homologación del tesado es AASHTO (LFRD 2014 [6] y LFRD Bridge Construction Specifications [7]). No obstante, las uniones con tornillos pretensados según dicha normativa son llamadas ‘slip-critical connections’ y se diseñan para evitar el deslizamiento para la combinación de Servicio II. Hay que tener en cuenta que la normativa AASHTO es para puentes de carretera, cuyas limitaciones deformacionales y de fatiga son menos restrictivas que en los puentes de ferrocarril como el que nos ocupa, es por ello que en el diseño de las uniones atornilladas empleadas se ha considerado como criterio de dimensionamiento que no se produzca deslizamiento para cargas mayoradas. El comportamiento fuerza-deformación de una unión con tornillos pretensados presenta 3 ramas (Figura 6): inicialmente la curva es casi vertical como corresponde a que no existe desplazamiento entre superficies, cuando llega al límite de fricción las superficies de contacto deslizan y posteriormente el tornillo se comporta como un tornillo ordinario, aumentando la fuerza y deformándose de manera no lineal según la ductilidad del tornillo. El criterio adoptado en proyecto asegura que el comportamiento de la unión es rígido en todo el rango de esfuerzos a los que está sometido, requerimiento que impone el ferrocarril.

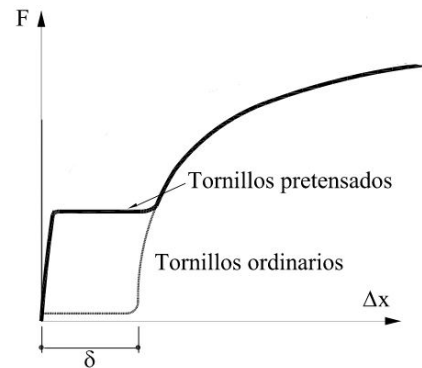


Figura 6. Curva Fuerza-desplazamiento en unión atornillada.

Los tornillos empleados en las uniones pretensadas son de alta resistencia, concretamente los empleados en el proyecto son A325 Tipo 1 galvanizados. El tratamiento superficial exigido es Tipo B (según AASHTO LFRD 2014: 6.13.2.8), es decir, el tratamiento que proporciona mayor rozamiento mediante el chorreado con arena de la superficie ($K_s=0.5$). Para mejorar la eficacia de la sección en la zona de momentos negativos elevados se ha empleado la doble acción mixta disponiendo hormigón de fondo a ambos lados de las pilas P2 y P3 en una longitud de 16 m a cada lado de la pila con un espesor variable entre 50 y 65 cm (Figura 7).



Figura 7. Sección de la viga metálica en zona de pilas P3 y P4.

Una de las características relevantes del tablero es su trazado en planta, pues el viaducto se encuentra en una curva de radio de 302 m, lo que supone una exigencia importante en cuanto al comportamiento a torsión de la viga. No obstante, aunque pudiera pensarse que la sección cajón es la más idónea para trazados tan curvos, en el caso que nos ocupa, como ya se ha comentado, el gran tamaño de la sección (ancho y canto) impide el transporte de la sección completa en tramos de longitudes razonables. Es por ello, que el uso de la sección cajón, cuyo comportamiento resulta óptimo a torsión, conlleva problemas ejecutivos relativos al ensamblaje de la viga en obra (necesidad de soldadura longitudinal en el fondo de cajón en toda la longitud) y por tanto presenta inconvenientes importantes frente a la solución bijácena, que por otra parte tiene un comportamiento peor a torsión. No obstante, la viga bijácena diseñada tiene la capacidad torsional suficiente al configurarse junto a hormigón de losa de fondo y arriostramientos inferiores en una ‘sección cajón’ en cuanto a comportamiento torsional se refiere, pues la losa de fondo cierra la sección en la zona próxima a pilas y en las zonas donde no se dispone hormigón de fondo se dispone una celosía horizontal en K (Figura 8) en el plano inferior de la sección que cierra el circuito de torsión de la sección cerrada con la rigidez suficiente incluso para las exigencias deformacionales del viaducto de ferrocarril.



Figura 8. Vista inferior. Celosía en K.

4. Detalles constructivos del tablero

Debido al gran canto de la sección en la zona de canto variable se han dispuesto rigidizadores longitudinales ‘cortando’ la altura del alma de la viga y mejorando su eficiencia. El empleo de rigidizadores longitudinales implica un gran número de cruces con los rigidizadores transversales, diafragmas y mamparos cuyo diseño debe cuidarse especialmente para optimizar el comportamiento a fatiga de los mismos, de gran importancia en todos los puentes metálicos, especialmente ferroviarios. Se han diseñado los detalles óptimos de fatiga según UNE-EN 1993-1-9 [5].

Como se ha comentado anteriormente para evitar reacciones en la pila estribo P5 se dispone de un contrapeso materializado mediante el relleno de la sección con hormigón. Para ello, se disponen prelosas entre los montantes inferiores de los arriostramientos y chapas grecadas apoyadas en los rigidizadores transversales, dado que el hormigonado directo sobre las almas supone flexiones y deformaciones no admisibles en las almas (Figura 9).

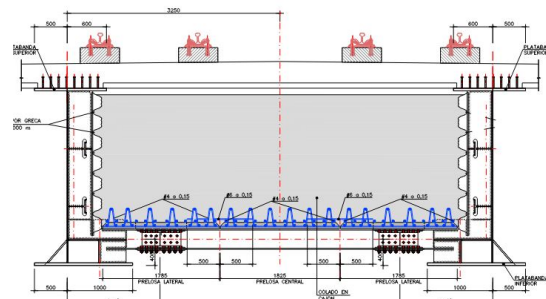


Figura 9. Hormigón de contrapeso en la sección.

Como es sabido, Ciudad de México está en una zona de alta sismicidad por lo que el diseño sísmico y las fuerzas sísmicas son de gran relevancia en las estructuras. Para llevar las fuerzas longitudinales sísmicas a la subestructura se disponen topes longitudinales materializados por unas ménsulas inferiores a cada lado de la cabeza o dintel de la pila (Figura 10). En transversal se disponen rigidizadores transversales en la zona inferior de los mamparos que conforman una viga en la que

topa contra los topes transversales de la subestructura para las fuerzas sísmicas. De modo que los apoyos del viaducto no se implican en la resistencia de las acciones sísmicas, siendo apoyos de neopreno zunchado.

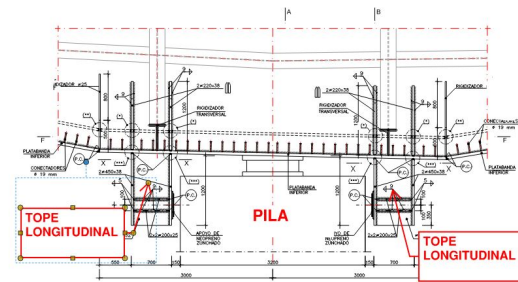


Figura 10. Topes longitudinales en pilas intermedias.



Figura 11. Dovelas montadas y preparadas para el izado.

5. Descripción del proceso constructivo

Como se ha comentado anteriormente el proceso constructivo ha sido un condicionante muy importante en el diseño del tablero del viaducto, como corresponde a la magnitud de la luz principal del viaducto.

El montaje se ha realizado mediante grúas de gran tonelaje y la capacidad de éstas, así como las

posibilidades de apoyo de las grúas han determinado las maniobras de izado definitivas. Inicialmente, se había previsto el izado de la viga metálica completa en 4 tramos, uno por vano: izado de los vanos 1 y 4 con un pequeño voladizo sobre los vanos siguientes, posteriormente el vano 2 y finalmente el tramo central de 77.8 m del vano principal. Además, para mejorar la facilidad constructiva de la losa de hormigón de fondo se había previsto la

elevación de los vanos con las prelosas y sin apeos intermedios (Figura 11).

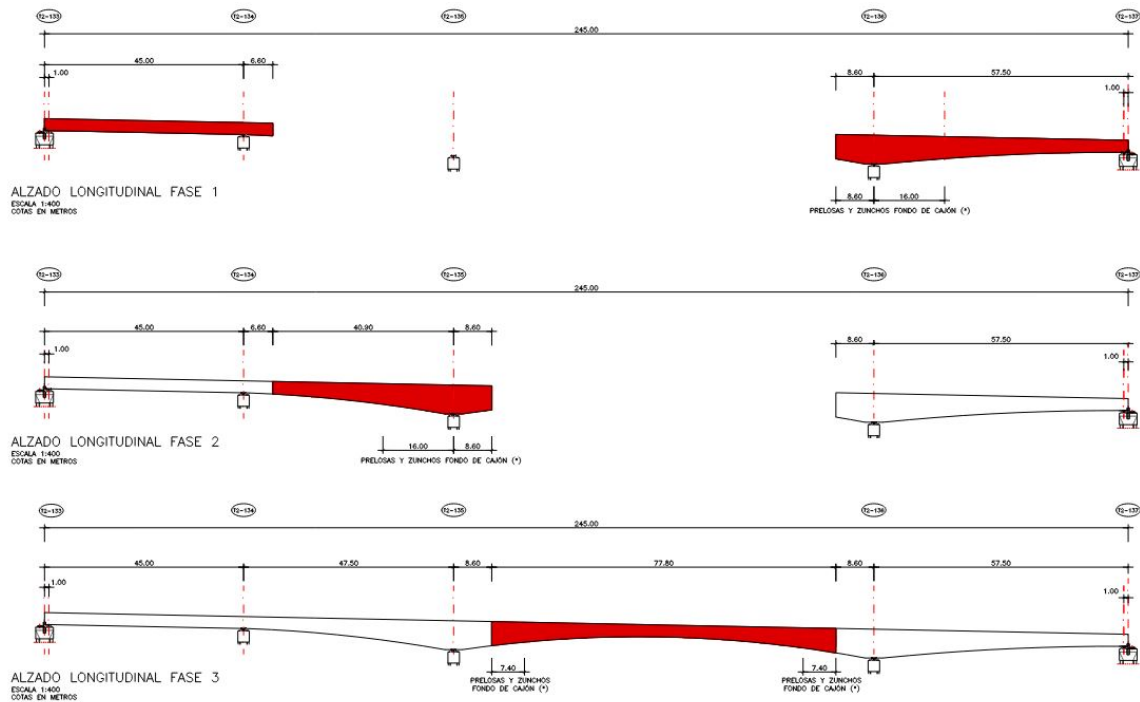


Figura 12. Proceso constructivo inicial de proyecto.

No obstante, las posibilidades de ejecución definitivas en la obra fueron más restrictivas, y finalmente se realizó el izado en 7 tramos (Figura 12) sin prelosas en la zona de hormigón de fondo

con necesidad de un apeo en el vano 4, quedando las fases de izado de la siguiente manera (Figura 13):

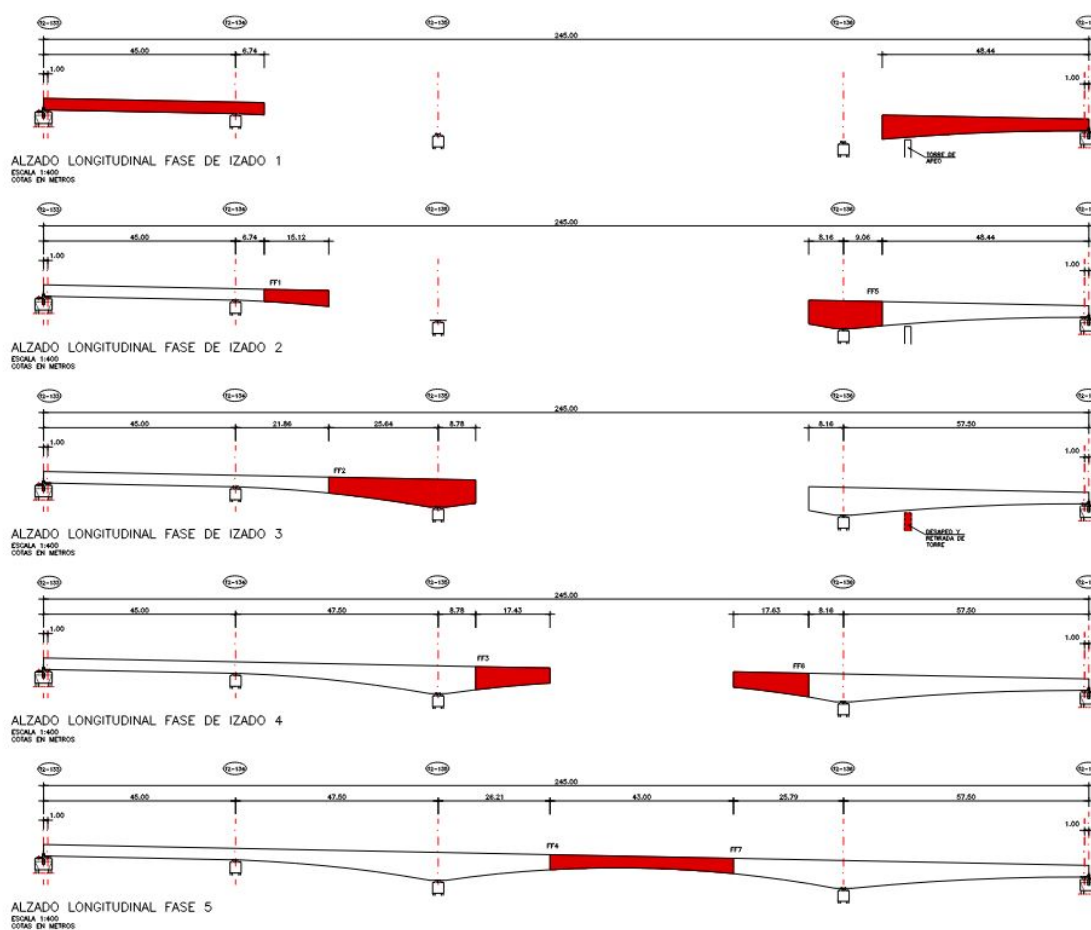


Figura 13. Proyecto constructivo definitivo condicionado por las restricciones de apoyo y capacidad de grúas.

- Fase 1: Vano 1 más voladizo de 6.74 m del vano 2, e izado de 48.44 m del vano 4 sobre pila P4 y apeo provisional (Figura 14).

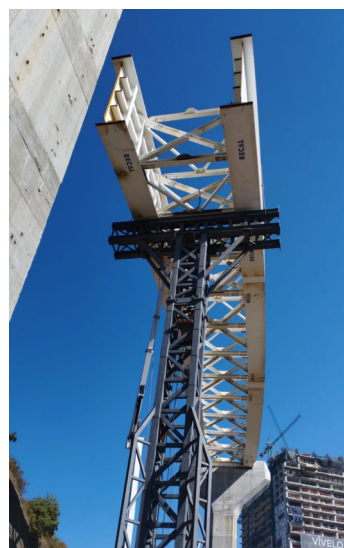


Figura 14. Montaje viga metálica en vano 4 con apeo provisional (Fase 1).

- Fase 2: dovela de 15.12 m en voladizo del vano 2 y dovela de 17.22 m sobre pila P3. (Figuras 15 y 19).



Figura 15. Izado de dovela sobre pila P4 (Fase 2).

- Fase 3: dovela de 34.42 m sobre la pila P2.
- Fase 4: Voladizos de unos 17.5 m a cada lado en el vano principal (Fase 16).



Figura 16. Montaje dovela de voladizo del vano principal (Fase 4).

- Fase 5: Tramo central del vano principal de 43.0 m (Figuras 17 y 18).

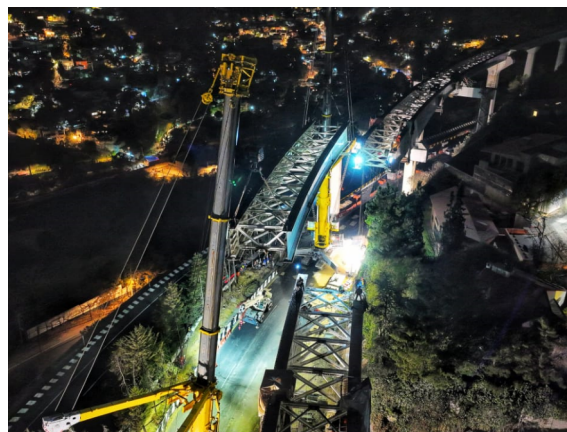


Figura 17. Izado de tramo central del vano principal durante corte nocturno (Fase 5).



Figura 18. Finalización de la operación de izado de vigas metálicas (Fase 5).

El cambio en las fases del proceso constructivo conllevó el recálculo del dimensionamiento del viaducto, así como la adecuación de la geometría de las vigas parcialmente fabricadas con las contraflechas iniciales. En cualquier caso, tras la disposición de algunos pequeños refuerzos mediante rigidizadores y células, así como la adopción de medidas correctoras en el ensamblaje de la viga (ángulos de empate de tramos) el resultado es correcto y adecuado a las necesidades de la obra.



Figura 19. Vista aérea del montaje con grúas de la viga metálica (tras la fase 3 de montaje).

6. Conclusiones

El resultado final del cuidadoso diseño y construcción es una estructura de gran calidad técnica que satisface con éxito las necesidades y expectativas del cliente.

Agradecimientos

Queremos agradecer a la empresa RECAL, contratista principal y taller metálico encargado de la realización de los elementos de acero estructural del viaducto, por su confianza en el equipo de IDEAM (actualmente TYLin España) para llevar a cabo este proyecto.

Referencias

- [1] Millanes, F.; Ortega, M.; Pascual, J. (2007). "Arroyo las Piedras" viaduct. The first Composite Steel-Concrete High Speed Railway Bridge in Spain. Revista Hormigón y Acero; Volumen 58, nº 243.
- [2] Millanes, F.; Ortega, M.; Pascual, J. El viaducto sobre el Río Nalón, un puente mixto de carretera con un vano principal de 110 m de luz. Hormigón y Acero. 2009.
- [3] Millanes, F.; Matute, L.; Ortega, M.; Martínez, D.; Solera P.; Mansilla J. El viaducto mixto sobre el Río Tajo en Talavera de la Reina. VII Congreso ACHE de la Asociación Española de Ingeniería Estructural. A Coruña. Junio 2017.
- [4] Millanes, F.; Martínez, D.; Solera P.; Zhou, F.; Morujão, P. Puente ferroviario sobre el Río Grande en Brasil. VIII Congreso ACHE de la Asociación Española de Ingeniería Estructural. Santander. Junio 2022.
- [5] UNE-EN 1993-1-9. Eurocódigo3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-9: Fatiga. AENOR.
- [6] AASHTO LFRD Bridge Design Specifications. 7th Edition, 2014
- [7] AASHTO LFRD Bridge Construction Specifications. 3rd Edition, 2010