

Nuevo puente de ferrocarril de Boca del Cerro en el Tren Maya. Concepción y proyecto

New Boca del Cerro railway bridge in the “Tren Maya”. Conception and design

Miguel Ortega Cornejo^a, Pedro Atanasio Utrilla^b, Jokin Ugarte González^c y Kevin Rincón Crespo^d

^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. pedro.atanasio@tylin.com

^c Máster Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin. Jefe de proyectos senior. jokin.ugarte@tylin.com

^d Máster Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin. Ingeniero estructural. kevin.rincon@tylin.com

RESUMEN

Ubicado en el sur de México, en una zona oficialmente protegida de extraordinaria belleza y junto a un puente arco histórico, el nuevo puente de Boca del Cerro se diseñó para fusionarse en el impresionante paisaje que lo rodea y no competir con el puente existente, pasando lo más desapercibido posible. La solución estructural seleccionada para cumplir estos condicionantes de diseño fue una celosía mixta de canto variable que salva el río mediante el empotramiento del vano principal de 160 metros en dos vanos laterales de compensación de hormigón.

ABSTRACT

Located in southern México, in an officially protected area of outstanding beauty and next to an historical Arch Bridge, the new Boca del Cerro bridge was designed to merge with the stunning landscape and not to compete with the historical bridge, remaining as unnoticeable as possible. The structural solution selected to effectively achieve these design factors was a variable depth composite truss spanning the entire river course by means of embedment of the 160 meter-main span in two lateral concrete compensation spans.

PALABRAS CLAVE: puente, ferrocarril, celosía, mixta, acero, hormigón, integración ambiental, Maya.

KEYWORDS: bridge, railway, truss, composite, steel, concrete, environmental integration, Maya.

1. Introducción

Con una longitud total de más de 1500 km, el Tren Maya atraviesa la península de Yucatán, en el sur de México, conectando puntos turísticos tradicionales del Caribe con zonas menos visitadas del interior (Figura 1).



Figura 1. Nueva línea ferroviaria del Tren Maya.

El nuevo puente de Boca del Cerro está situado al final del Cañón del río Usumacinta (estado de Tabasco), forma parte del Tramo 1 de la nueva línea ferroviaria y es la estructura de mayor luz de todo el Tren Maya (Figura 2). Como parte de la nueva infraestructura ferroviaria, el nuevo puente de Boca del Cerro cumple una gran función socioeconómica, contribuyendo al desarrollo económico de la zona a través de la promoción turística.



Figura 2. Ubicación del nuevo puente de Boca del Cerro.

La zona en la que se ubica el nuevo puente está oficialmente protegida y tiene un extraordinario valor medioambiental, además de ser un punto de cruce estratégico donde se construyó el puente de arco existente en 1950. La estructura histórica existente tiene un gran valor cultural y representa un hito de la ingeniería de su época.

2. Descripción del puente existente

El histórico puente de arco fue diseñado para dar cabida al tráfico rodado y a una línea de ferrocarril (actualmente fuera de servicio), así como a los peatones a través de una pequeña acera.

La estructura tiene unos 189 m de longitud y un vano principal metálico de 150 m (Figura 3). La estructura metálica consta de dos arcos paralelos situados por encima y a ambos lados del tablero. Cada arco se compone de dos cordones principales a diferentes alturas que se unen mediante una celosía Pratt. La celosía se eleva unos 24.8 m sobre el nivel de la calzada en

centro de vano, descendiendo bajo la plataforma unos 7 m localmente en los extremos del mismo.



Figura 3. Vista general del puente arco existente.

Ambos arcos están arriostrados entre sí por celosías horizontales y diafragmas verticales en K (Figura 4). Toda la estructura metálica del puente se ensambló mediante uniones roblonadas.



Figura 4. Vista interior del puente arco existente.

3. Diseño conceptual para el nuevo puente

Teniendo en cuenta el entorno paisajístico de especial belleza, realzado por el puente existente, el nuevo puente de Boca del Cerro se diseñó para conseguir, al mismo tiempo, elegancia y ser lo más invisible posible, con el objetivo de causar el mínimo impacto en el entorno.

Para ello, el nuevo puente se ubicó en paralelo al existente, a una cota de tablero similar, con una disposición de la celosía que reproduce la configuración de la estructura existente y acabado en un color verde oscuro que asegura la fusión en el entorno natural. La solución estructural elegida para cumplir

eficazmente todos estos condicionantes de diseño fue una celosía de canto variable que salva el cauce del río mediante el empotramiento en dos vanos de compensación laterales (Figura 5). La distribución de vanos resultante es de 30+160+30 m.

Como resultado del cuidadoso diseño, la vista desde aguas abajo -el punto de vista típico- es la de un único puente (Figura 6), generando una intrusión mínima y sin competir con el puente existente, que se mantiene y mejora.



Figura 5. Nuevo puente de Boca del Cerro.



Figura 6. Vista del puente arco existente y el nuevo puente detrás de él.

4. Descripción de la superestructura

4.1. Vano principal en celosía mixta

El vano central de 160 m se diseñó como una celosía tipo Warren con doble acción mixta: una losa superior de hormigón, dos planos de celosía metálica -separados 4.50 m entre ejes- y una losa inferior de hormigón en las zonas de momentos negativos junto a las pilas. Esta solución se inspiró en el viaducto sobre el río Ulla [1] también diseñado por IDEAM (ahora TYLin), como adaptación a pequeña escala.

El cordón inferior tiene una disposición parabólica, variando el canto total de la celosía desde 6.30 m en centro de vano hasta 11.40 m sobre pilas. Estos valores proporcionan una relación de $L/25.39$ y $L/13.91$ respectivamente, adecuada para un puente ferroviario. Los nudos de la celosía se dispusieron cada 7.50 m para ajustarse a la configuración del puente existente, con un desfase de 3.75 m entre los nudos de los cordones superior e inferior (Figuras 7 y 8).



Figura 7. Vista lateral de la celosía.



Figura 8. Vista interior de la celosía.

La celosía tipo Warren utiliza únicamente elementos diagonales y es muy eficiente, ya que reduce a la mitad el número de uniones de cordones en comparación con la tipo Pratt. Aunque la celosía tipo Warren requiere que las diagonales de compresión tengan un área algo mayor, como el número de elementos se reduce a la mitad y el diseño está condicionado principalmente por la fatiga (al tratarse de un puente ferroviario), su uso reduce la cuantía total de acero.

La losa superior de hormigón (8.4 m de ancho de tablero) se conecta a los cordones metálicos superiores de la celosía, reduciendo los esfuerzos de compresión de dichos elementos metálicos en las zonas de momento positivo gracias a la colaboración del hormigón en la resistencia de las compresiones. Del mismo modo, a lo largo de las zonas de momento negativo, se dispone una losa inferior de hormigón que se conecta a los cordones metálicos inferiores de la celosía, reduciendo los esfuerzos de compresión de dichos elementos en las zonas de momentos negativos por el motivo antes indicado (Figura 13). La losa inferior se extiende hasta 46.25 m del eje de las pilas y su espesor varía entre 0.7 y 0.3 m.



Figura 9. Hormigón de fondo en zona de negativos.

El resultado del mecanismo resistente en doble acción mixta (hormigón-acero) es una solución más ligera y sostenible gracias a la eficiencia de los materiales, conseguida por la reducción de la capacidad necesaria de los elementos metálicos.

Todo ello resultó en un peso total de la estructura metálica de aproximadamente 1100 toneladas.

Los elementos principales de la celosía (diagonales y cordones superior e inferior) están hechos de chapas de acero Gr50 ($f_y=345\text{MPa}$). Los cordones superior e inferior se diseñaron con secciones cajón cuadradas de 0.8 m de lado (Figura 9) y las diagonales con secciones cajón rectangulares de 0.6x0.8 m.

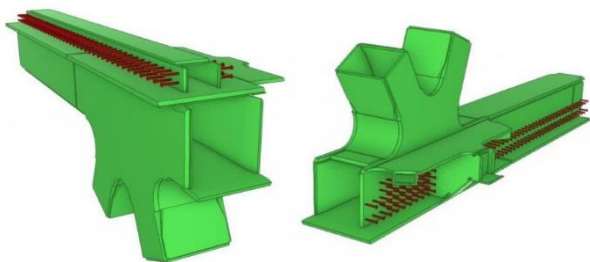


Figura 10. Cordón superior (izquierda) y cordón inferior (derecha) de la celosía.

La placa superior del cordón superior es más ancha (1.1 m). para permitir el correcto apoyo de las prelasas superiores. Adicionalmente, el cordón superior tiene un cajoncito superior metálico con dos objetivos: mejorar la conexión entre el cordón y la losa superior, al garantizar que los pernos conectadores siempre trabajan a rasante incluso cuando aparezcan posibles desequilibrios de fuerzas verticales en los nudos, caso en el que los pernos podrían verse solicitados a tracción si se hubiesen soldado en posición vertical directamente sobre el ala superior del cordón; y permitir el deslizamiento de los carros móviles de izado (Figura 10). La geometría de las prelasas de hormigón superiores se eleva y se adapta para superar dicho cajoncito superior y el arriostramiento (Figura 11).



Figura 11. Deslizamiento del carro de izado móvil sobre el cajoncito superior del cordón superior.



Figura 12. Geometría de las prelasas superiores adaptada al cajoncito superior.

En el caso del cordón inferior, la chapa inferior sólo se prolonga hacia el interior para la disposición de las prelasas metálicas inferiores (en zonas de momentos negativos) o las rejillas tipo tramex (en zonas de momentos positivos), quedando el tablero accesible en su interior para futuras labores de mantenimiento e inspección.

La unión entre diagonales y cordones se realizó mediante soldadura a tope de las almas y prolongando las alas en el interior del nudo, lo que aporta gran simplicidad a la unión.

Dado que la fatiga de la estructura metálica era un factor de diseño crucial, se prestó mucha atención a los detalles de las uniones, como las transiciones suaves de dimensiones y espesores, el acabado circular y tangente de las chapas, el amolado en los extremos de las soldaduras, etc. Para ello, se realizó un importante trabajo de creación de planos de taller y montaje, que definían con absoluta precisión cada una de las chapas, juntas, soldaduras, transiciones y detalles específicos del puente sin utilizar detalles generales.

Además, la estructura metálica del puente se modeló con un software BIM para garantizar la calidad de la fabricación, modelando cada

elemento y cada unión de taller y de obra (Figura 12). Este modelo evitó la aparición de problemas imprevistos durante la construcción cuya solución habría supuesto un tiempo y unos costes económicos considerables.

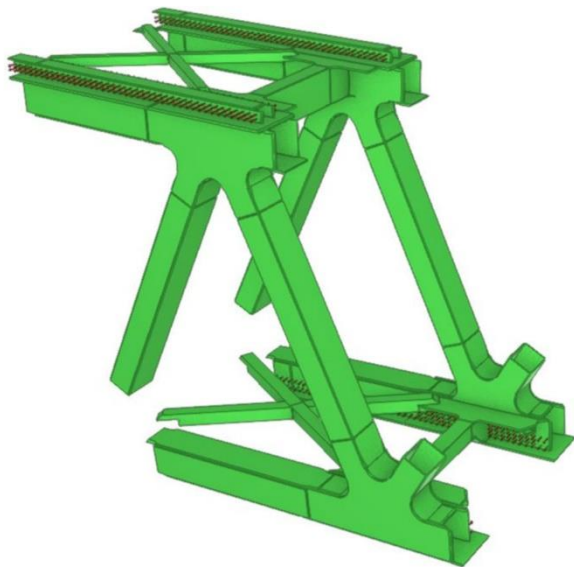


Figura 13. Vista de una dovela del modelo BIM de la estructura metálica.

La atención a los detalles no sólo se centró en los aspectos técnicos, sino también en la elegancia de la solución, como es el caso de las chapas de transición curvas que embellecen la conexión de los elementos en los nudos, y que también contribuyen a la durabilidad.

4.2. Vanos de compensación de hormigón

Como ya se ha indicado, el vano central (de 160 m) está equilibrado por dos vanos laterales de compensación (de 30 m cada uno). En este equilibrio, la ligereza del vano central mixto permitió reducir la longitud de esos vanos a tan solo 0.1875 veces el vano central. Esta solución para la compensación de un vano principal de gran luz había sido desarrollada anteriormente por IDEAM (actualmente TYLin) para el viaducto sobre el río Nalón [2] y el puente de La Concordia [3].

Los vanos laterales son cajones de hormigón pretensado con un perímetro exterior similar al de la celosía mixta (Figura 14).



Figura 14. Vano de compensación de hormigón.

Los esfuerzos de la celosía en el empotramiento se transmiten a los vanos laterales de hormigón mediante tres mecanismos:

- Pretensado anclado a la losa superior de la celosía mixta y a las diagonales extremas (Figura 15), para transmitir las fuerzas de tracción.
- Pernos conectadores en las secciones finales de los cordones superiores e inferiores y en las diagonales extremas (Figura 16), para transmitir las fuerzas de tracción y de compresión.
- Baza metálica en el extremo de los cordones inferiores y conexión de la losa inferior (Figura 16), para transmitir las fuerzas de compresión.

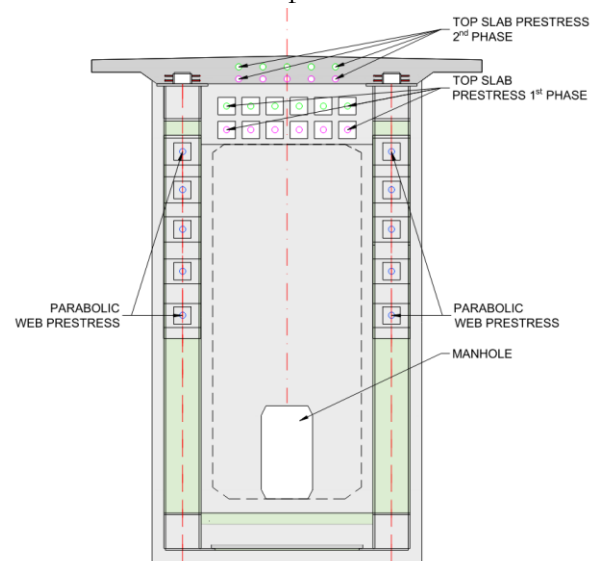


Figura 15. Conexión de la celosía al vano de hormigón mediante pretensado.

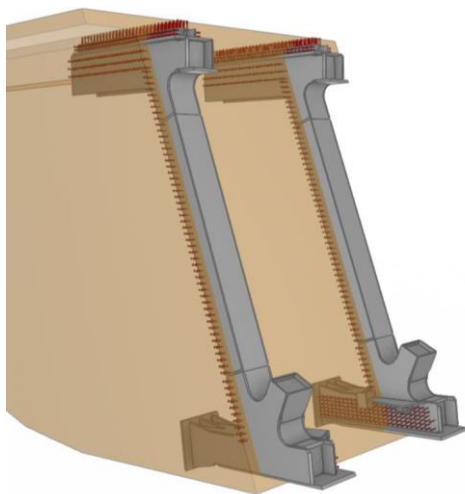


Figura 16. Empotramiento de la celosía en el vano de hormigón.

5. Descripción de la subestructura

5.1. Pilas

Las pilas son de sección rectangular maciza de hormigón. El tablero se apoya sobre dos apoyos esféricos deslizantes en cada pila (Figura 17). El tablero está fijado frente a fuerzas horizontales transversales mediante topes transversales con un tetón que se introduce en la pila y que dispone de apoyos elastoméricos. El punto fijo frente a fuerzas horizontales longitudinales está situado en los estribos, como se detalla en el apartado 5.2 de este artículo.



Figura 17. Pilas.

Debido a la proximidad de las pilas del nuevo puente a las del puente existente, fue necesario prestar especial atención a las cimentaciones durante el proyecto. Para ello, la mejor solución fue utilizar cimentaciones superficiales con la cota inferior al mismo nivel que las del puente existente, evitando cualquier impacto en el puente histórico.

Además, debido a la proximidad de las cimentaciones de las pilas a los taludes de la ladera, fue necesario mejorar las características del terreno en la huella de las cimentaciones para obtener una capacidad suficiente en el macizo rocoso para acomodar las cargas transmitidas (Figuras 18 y 19). La mejora del terreno consistió en una cuadrícula de inyecciones armadas. Adicionalmente, en la columna C-3 la mejora se complementó con columnas de jet grouting en la zona más próxima al talud. En ésta columna, se dispuso una protección con muro pantalla en el frente de la cimentación para evitar cualquier tipo de afección al río por fugas de lechada durante la ejecución del jet grouting.

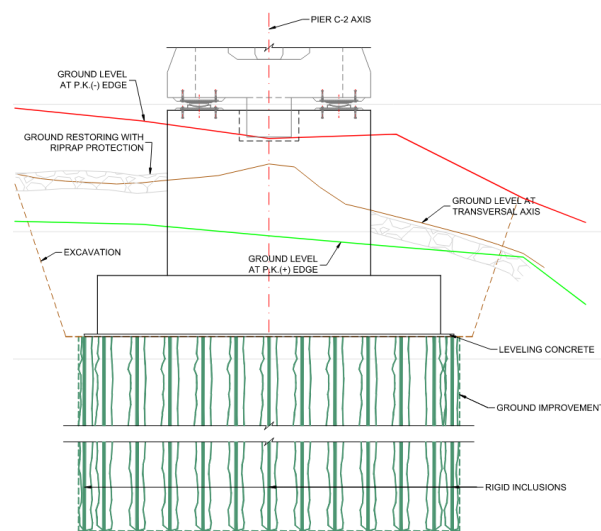


Figura 18. Mejora del terreno bajo las cimentaciones de las pilas. Alzado.

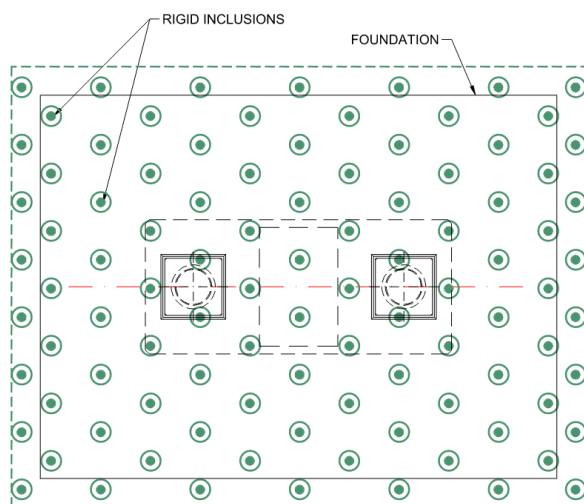


Figura 19. Mejora del terreno bajo las cimentaciones de las pilas. Planta.

5.2. Estribos

En los apoyos extremos, la reacción de levantamiento del tablero se soporta mediante topes verticales y dos apoyos esféricos en cada estribo (Figura 20). De este modo, la fuerza de levantamiento producida en el estribo se compensa eficazmente con el peso de estos elementos enterrados y el de las tierras sobre sus zapatas. Además de estos apoyos para cargas verticales ascendentes, se disponen dos apoyos esféricos en cada estribo para resistir las cargas verticales descendentes (Figura 21).



Figura 20. Tope anti levantamiento en estribos.

El punto fijo frente a fuerzas horizontales longitudinales está situado en el estribo de PK-. El punto fijo se materializa mediante barras pretensadas ancladas al mamparo del tablero de hormigón y al muro del estribo, disponiendo entre ambos elementos dos apoyos esféricos (Figura 21). Adicionalmente, durante el proceso constructivo se dispuso un punto fijo provisional en el estribo de PK+ durante el avance en voladizo hasta que se produjo el cierre de la estructura metálica en centro de vano.

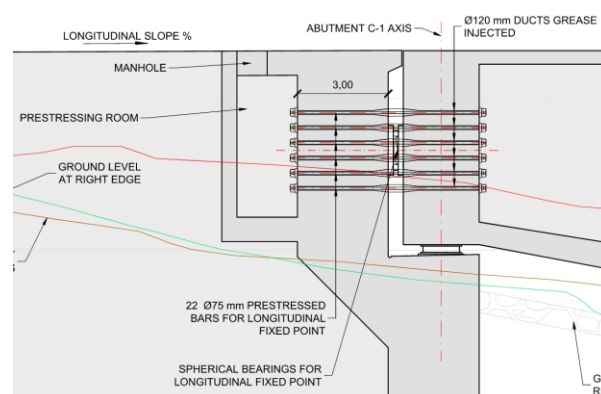


Figura 21. Punto fijo longitudinal en estribo de PK-.

6. Conclusiones

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

El nuevo puente de Boca del Cerro permanece semioculto tras el puente arco, respetando el entorno natural y la belleza del paisaje, así como el valor histórico y cultural del puente existente (Figura 22).

Estas cualidades han quedado reconocidas habiendo quedado el puente finalista de los premios internacionales de IABSE 2024 en la categoría de puentes con una superficie menor a 5000 m².



Figura 22. Nuevo puente de boca del cerro fundido en el paisaje que lo rodea.

Referencias

- [1] F. Millanes, M. Ortega, R.A. Estévez , El viaducto del río Ulla en el Eje Atlántico de Alta Velocidad: una celosía mixta récord del mundo, Hormigón y Acero. 66 (2015) 165–190.
- [2] F. Millanes, M. Ortega, J. Pascual, El viaducto sobre el Río Nalón, un puente mixto de carretera con un vano principal de 110 m de luz, Hormigón y Acero. 60 (2009) 29–42.
- [3] F. Millanes, M. Ortega, “La Concordia” outstanding new arch bridge in Valdebebas, Madrid, IABSE Symposium: Challenges for Existing and Oncoming Structures, Prague, 2022. 1519-1526.