

Ejecución del nuevo puente de Boca del Cerro en el Tren Maya

Construction of the new Boca del Cerro bridge in the “Tren Maya”

Miguel Ortega Cornejo^a, Pedro Atanasio Utrilla^b y Kevin Rincón Crespo^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. pedro.atanasio@tylin.com

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

RESUMEN

El nuevo puente de Boca del Cerro, situado en el sur de México dentro de la nueva infraestructura ferroviaria del Tren Maya, es una celosía mixta de canto variable que salva el río Usumacinta mediante un gran vano central de 160 m. El vano central se construyó por avance en voladizo desde ambos vanos laterales, con el innovador procedimiento de transportar las dovelas metálicas de la celosía por encima de la propia estructura en voladizo. Este proceso constructivo permitió el montaje in situ de toda la estructura metálica en un tiempo récord y evitando los riesgos de cualquier dependencia del río Usumacinta.

ABSTRACT

The new Boca del Cerro Bridge, located in southern Mexico as part of the new Tren Maya railway infrastructure, is a variable-depth composite truss spanning the Usumacinta River with a 160 meter-main span. The main span was built by incremental cantilevers from both lateral spans, with the innovative procedure of transporting the steel segments of the truss over the cantilevered structure itself. This construction process allowed the entire steel structure to be assembled in situ in record time and avoiding the risks of any dependence on the Usumacinta river.

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

KEYWORDS: bridge, railway, truss, composite, steel, concrete, cantilevered, Maya.

1. Introducción

El nuevo puente de Boca del Cerro está situado en el sur de México, al final del Cañón del río Usumacinta (Tabasco), y es la estructura de mayor luz de todo el Tren Maya.

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

La zona en la que se ubica el nuevo puente, al final del cañón del río Usumacinta, 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. Proceso constructivo del puente existente

El proceso constructivo utilizado para el puente existente inspiró el seleccionado para el nuevo puente. El puente histórico se construyó por avance en voladizo de las celosías de los arcos desde ambas orillas (Figura 1). Para ello, la estructura metálica se empotró provisionalmente en las orillas del río mediante la prolongación de los cordones superiores de ambos arcos (Figura 2).

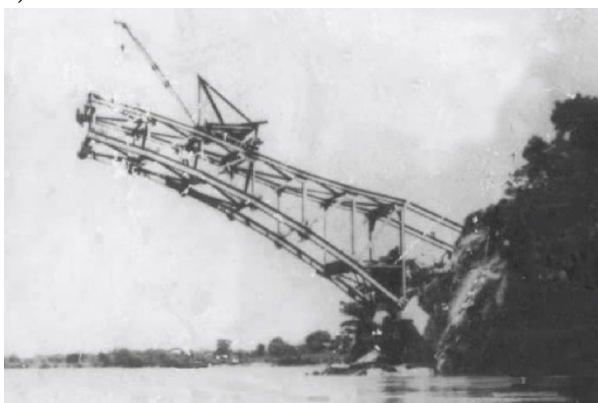


Figura 1. Construcción por avance en voladizo del puente arco existente.



Figura 2. Empotramiento provisional de la estructura metálica.

Las celosías de los arcos se montaron utilizando grúas que se desplazaban sobre el arco, las cuales se abastecieron de los materiales mediante barcazas situadas justo debajo del

puente, lo que permitía elevar verticalmente los elementos y ensamblarlos después en su posición final. De este modo, la estructura avanzó simétricamente desde cada orilla hasta el cierre del arco en el centro del río (Figura 3).



Figura 3. Cierre del arco en centro de vano.

Posteriormente, se retiraron los empotramientos provisionales laterales, se montaron las péndolas verticales y se colgó la estructura del tablero, con acceso para el suministro de piezas desde el río

3. Selección del proceso constructivo para el nuevo puente

Durante la concepción del nuevo puente, la selección de la tipología estructural y el proceso constructivo a emplear estuvieron fuertemente correlacionados (véase el artículo relativo a la concepción y proyecto del nuevo puente de Boca del Cerro de esta misma publicación de ACHE [1]).

El condicionante más importante para la determinación del proceso constructivo a emplear fue la necesidad de independizar completamente la construcción del nuevo puente del río Usumacinta, el más caudaloso de México y con unas condiciones hidrológicas extremas que originan variaciones del nivel del agua de hasta 3 m en unas horas. De este modo, el proceso constructivo seleccionado fue la ejecución de la estructura metálica por avance en voladizos sucesivos desde ambos vanos de compensación.

Esta solución estuvo inspirada por el método constructivo empleado en el puente

existente, pero con la novedad de que para el nuevo puente no existiría ninguna dependencia del río, ni siquiera para el suministro de las dovelas, que serían transportadas sobre el propio puente en construcción hasta el frente del voladizo. También sirvió de inspiración el proceso constructivo del Viaducto del río Ulla [2].

La otra gran ventaja del proceso constructivo seleccionado fue que no requeriría de la instalación de un gran parque de empuje ni de otras instalaciones auxiliares como torres de atrantamiento. Los parques de montaje para el ensamblado de las dovelas previamente a su izado, como se describe en el apartado 5 de este artículo, se instalaron tras los estribos en la propia traza de la línea del ferrocarril, de modo que la superficie ocupada en las orillas del río alrededor de los estribos fue muy reducida y se minimizaron los impactos sobre las zonas protegidas próximas al puente.

4. Construcción de estribos, pilas y vanos de hormigón

La ejecución del puente comenzó con la excavación de los taludes en las márgenes del río y la ejecución de las mejoras del terreno bajo las cimentaciones de las columnas.

Posteriormente se construyeron las pilas y los estribos, prestando atención a la correcta ejecución los rellenos en el trasdós del estribo que deben recoger las reacciones de levantamiento en los extremos del tablero en situación de explotación del puente (Figura 4).



Figura 4. Ejecución de estribos.

Una vez finalizadas las pilas y estribos, se continuó con la ejecución, por fases, de los vanos de hormigón cimbrados al terreno. Al mismo tiempo, se iban colocando los elementos de la dovela inicial de la celosía que quedan embebidos en los vanos de hormigón (Figuras 5 y 6).



Figura 5. Ejecución de vanos de hormigón con elementos embebidos de la estructura metálica.



Figura 6. Colocación de elemento embebido del cordón superior.

Una vez finalizados los vanos de hormigón se instalaron los puntos fijos longitudinales en los estribos. Dichos puntos fijos se materializaron mediante barras pretensadas ancladas al mamparo del tablero de hormigón y al muro del estribo, disponiendo entre ambos elementos dos apoyos esféricos (Figura 7). En el caso del estribo de PK- el punto fijo es definitivo, mientras que en el estribo de PK+ el punto fijo fue provisional durante el avance en voladizo hasta que se produjo el cierre de la estructura metálica en centro de vano.

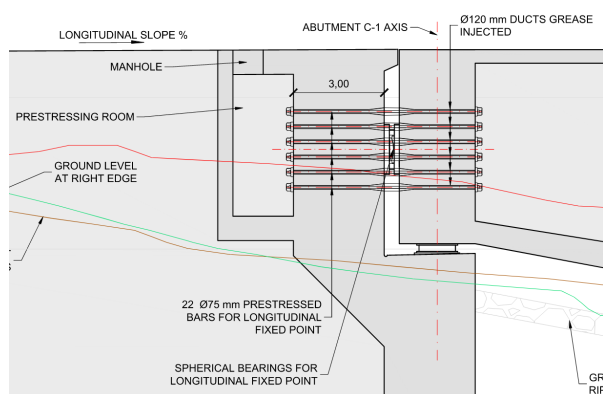


Figura 7. Punto fijo longitudinal en estribos.

Finalmente, se procedió al tesado de la primera fase de familias de pretensado de los vanos de hormigón (como se explica más adelante, la segunda fase de familias se tesaría una vez completada la estructura metálica).

5. Fabricación de la estructura metálica

La celosía metálica se dividió en dovelas para su diseño, fabricación y montaje. El puente consta de un total de 21 dovelas: las dos dovelas de arranque embebidas en el hormigón y 19 dovelas distribuidas en 9 dovelas por voladizo más la dovela de cierre (Figura 8).

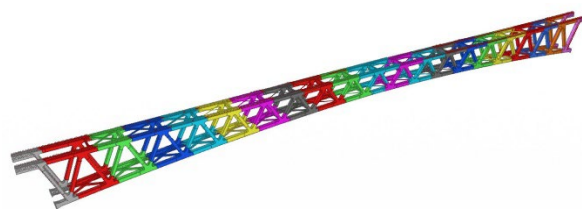


Figura 8. Vista general del modelo BIM de la estructura metálica con la división de la celosía en dovelas.

La estructura metálica tiene un peso total de aproximadamente 1100 toneladas, siendo la dovela más pesada de 91.5 ton y la más ligera de 36.5 ton (dovela de cierre).

Al mismo tiempo que se construían los vanos laterales de compensación, se estaban fabricando en taller y ensamblando en los parques de montaje situados detrás de los estribos las dovelas metálicas de la celosía.

Para manipular, fabricar y transportar a obra las 1100 toneladas de elementos metálicos, las dovelas se dividieron en los siguientes elementos más simples: nudos superiores, cordones superiores, nudos inferiores, cordones inferiores, diagonales, montantes horizontales y arriostramientos. No obstante, para reducir el número de uniones in situ, los elementos individuales de nudo más cordón se ensamblaban en el taller previamente a su envío a obra (Figura 9).

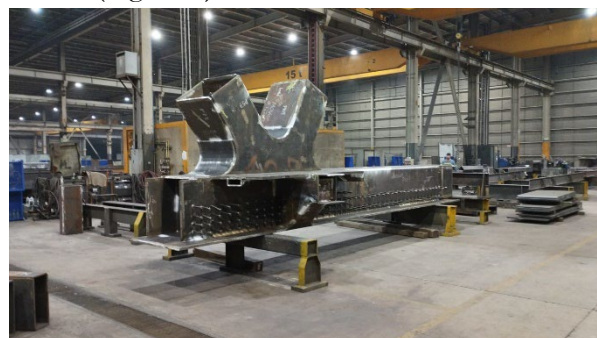


Figura 9. Unión en taller de los elementos individuales de nudo y cordón.

Posteriormente, cada plano de la celosía se ensamblaba in situ en posición horizontal (Figura 10) y, a continuación, ambos planos se verticalizaban y se unían mediante los montantes y arriostramientos horizontales para configurar la dovela que luego se izaría (Figura 11). En esta fase también se instalaban los arriostramientos

provisionales para garantizar la geometría de las dovelas durante su izado y transporte, como se detalla en el apartado 6 de este artículo.



Figura 10. Unión en el parque de montaje de cada plano de la celosía en posición horizontal.



Figura 11. Ensamblado in situ de las dovelas completas.

6. Ejecución de la estructura metálica por avance en voladizo

Una vez completados los vanos de compensación, se inició el montaje de la celosía metálica por avance en voladizo desde cada vano de hormigón. Para ello, se diseñaron dos carros de izado móviles especiales (de 155 ton cada uno) con la característica innovadora de que podían transportar las dovelas dentro de su estructura.

Las dovelas se suministraban a los carros de izado en la posición de las pilas mediante unos bogies desde los parques de montaje y, posteriormente, los carros de izado transportaban las dovelas sobre el voladizo de la celosía en construcción hasta su posición final.

El ciclo de trabajo tipo de los carros de izado para la colocación de una dovela implicaba (Figura 12): recoger la dovela por la parte posterior del carro, centrar la dovela dentro del carro, avanzar hasta el frente del voladizo, desplazar la dovela hacia delante en el carro, descenderla hasta su posición final y, por último, soldarla a la dovela anterior.



Figura 12. Ciclo tipo para la colocación de una dovela con el carro de izado móvil.

Las dovelas se izaron y montaron con las prelosas metálicas inferiores definitivas (en las zonas de negativos con hormigón de fondo) o con las rejillas tipo tramex (que hacen la sección visitable en las zonas sin hormigón de fondo), en función de la posición final de la dovela dentro de la celosía. Además, para preservar la geometría de la dovela y evitar desviaciones en la configuración final del puente debidas a deformaciones durante el izado y el transporte, las dovelas se montaron con arriostramientos verticales y horizontales provisionales.

Este proceso se ejecutó, dovela a dovela, (Figura 13) hasta que la celosía metálica se cerró en centro de vano mediante el montaje de la dovela de cierre (Figura 14).



Figura 13. Vista general de los voladizos de la estructura metálica.



Figura 14. Cierre de la estructura metálica.

Este innovador procedimiento constructivo por avance en voladizos sucesivos permitió el montaje in situ de toda la estructura metálica en menos de 2 meses, evitando los riesgos de cualquier dependencia del río Usumacinta.

6.1. Seguimiento y monitorización del avance en voladizo

Se desarrolló un modelo de cálculo de elementos finitos evolutivo (Figura 15) que reproduce todas las fases de la ménsula para definir las contraflechas de la celosía (Figura 16), así como las coordenadas de posicionamiento de cada una de las dovelas, teniendo en cuenta la evolución de la estructura y su deformación en cada una de las fases del proceso constructivo.

Este modelo también se utilizó para supervisar el proceso de ejecución de la

estructura metálica por avance en voladizo, comparando las mediciones de deformación in situ con las previstas en el modelo.

Para el seguimiento de los voladizos se instaló un sistema de control topográfico que permitía verificar la posición de todas las dovelas ya ejecutadas en cada una de las fases del proceso constructivo. De este modo se consiguió una mayor eficacia durante la construcción y se garantizó la calidad de la estructura construida.

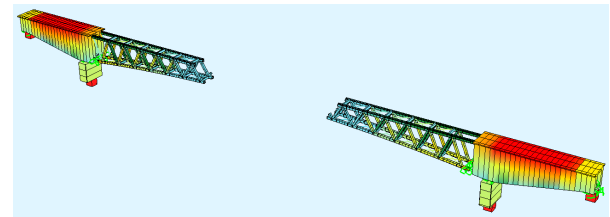


Figura 15. Modelo de elementos finitos para el seguimiento del proceso constructivo.

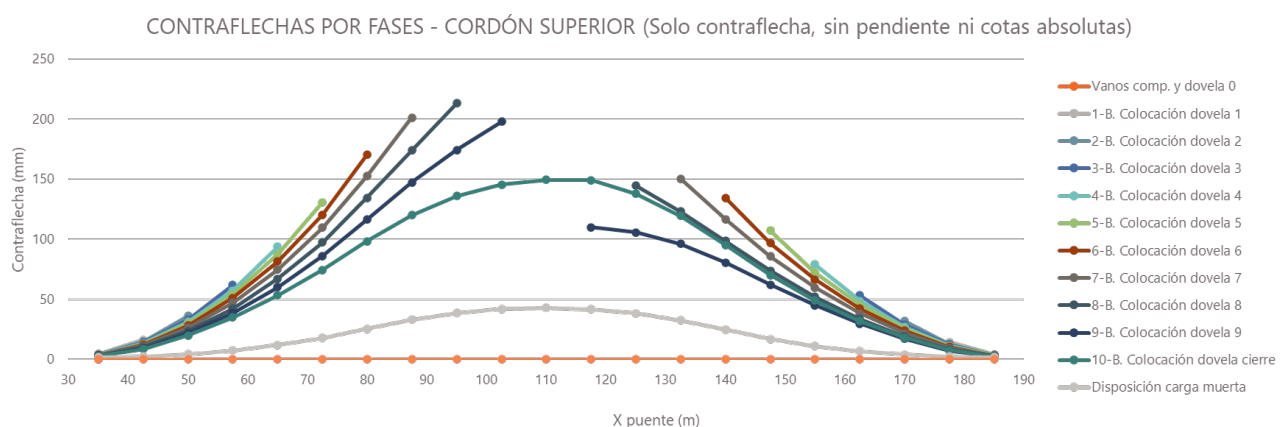


Figura 16. Definición de contraflechas por fases para el posicionamiento de las dovelas y monitorización de los voladizos.

7. Hormigonado de las losas y ejecución de acabados

Una vez terminada la celosía metálica, se tesó la segunda fase de familias de pretensado de los vanos de hormigón y se hormigonó la losa inferior.

A continuación, se colocaron las prelosas superiores sobre la celosía utilizando los mismos carros de izado empelados para la colocación de las dovelas, y se hormigonó la losa superior. Por

último, se colocaron el balasto, las vías y otros elementos de acabado sobre el tablero.



Figura 17. Puesta en servicio del nuevo puente de Boca del Cerro.

8. Conclusiones

El resultado de la elección de un procedimiento constructivo óptimo, así como del exhaustivo control en todas las fases constructivas, es una estructura de gran calidad ejecutada en un tiempo récord.

Con la solución adoptada se consiguió satisfacer plenamente la principal exigencia del cliente de independizar completamente la construcción del río Usumacinta, eliminando todos los riesgos potenciales asociados. Además, las afecciones al entorno protegido quedaron reducidas al mínimo.



Figura 18. Vista general del nuevo puente de boca del cerro.

Referencias

- [1] M. Ortega, P. Atanasio, J. Ugarte, K. Rincón, Nuevo puente de ferrocarril de Boca del Cerro en el Tren Maya. Concepción y proyecto, IX Congreso de ACHE, 2025.
- [2] F. Millanes, M. Ortega, R. A. Estevez, 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.