

Tren Maya (tramo 1): Construcción del viaducto metálico de Boca del cerro mediante Pórtico de izado móvil

Mayan train, Mexico (Section 1): Steel viaduct construction using a mobile lifting frame

Alejandro Litago Viñerta^a, Íñigo Barkaiztegi Martínez^b, Miguel Ángel Calvo Rubio^c
y Juan Lima^d

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. VSL Construction Systems. Project Manager. Alejandro.litago@vsl.com

^b Ingeniero Civil. VSL Construction Systems. Project Manager. inigo.barkaiztegi@vsl.com

^c Ingeniero Civil. VSL Construction Systems. Production manager Spain, Latin America and Africa miguelangel.calvo@vsl.com

^d Ingeniero Civil. VSL Construction Systems. Director técnico. Juan.Lima@vsl.com

RESUMEN

Este artículo describe los retos técnicos y productivos que han debido de ser resueltos en la fabricación, montaje y empleo del pórtico de izado móvil, diseñado y fabricado expresamente para el montaje del vano central por avance en voladizos sucesivos desde sus pilas de apoyo del nuevo Puente Boca del Cerro, perteneciente al Tramo 1 del Tren Maya (Palenque-Escárcega). Se trata de un puente de tres vanos, con un vano principal de 160 m de longitud, resuelto con una celosía tipo Warren de dos planos verticales separados 4.5 m y canto variable entre 6.3 y 11.4 m, en acero estructural. Dispone losa de compresión en toda su longitud y losa inferior en la zona próxima a su apoyo en pilas.

ABSTRACT

This article describes the technical and productive challenges that had to be resolved in the manufacture, assembly and use of the mobile lifting gantry, designed and manufactured expressly for the assembly of the central span by advancing in successive cantilevers from its support piers of the new Boca del Cerro Bridge, belonging to Section 1 of the Mayan Train (Palenque-Escárcega). It is a three-span bridge, with a main span 160 m long, resolved with a Warren-type truss with two vertical planes 4.5 m apart and a variable depth between 6.3 and 11.4 m, in structural steel. It has a compression slab along its entire length and a lower slab in the area close to its support on piles.

PALABRAS CLAVE: Construcción de estructuras, Puentes, Izajes pesados, pórticos de izaje, estructuras metálicas y Construcción en voladizo.

KEYWORDS: Structures construction, Bridges, Heavy lifting, Lifting frames, steel structures and cantilever construction.

1. Información del proyecto

El puente Boca del Cerro se encuentra en el estado de Tabasco, en el sur de México. Forma parte del Tramo 1 del Proyecto del Tren Maya

entre los municipios de Palenque y Escárcega. El puente pasa sobre el río Usamacinta. En este sitio existe un puente arco con estructura de

acero de los años 50, el nuevo puente se construyó paralelo al existente. El puente de 220 m de longitud total está constituido por: 2 vanos extremos de 30 m cada uno en sección de hormigón in situ más 1 vano principal de 160 m de sección mixta formado por una celosía de acero, que se construirá como estructura en voladizo a partir de ambos vanos extremos, y una losa de tablero superior de hormigón in situ. El montaje de los segmentos de la celosía de acero en voladizo se llevó a cabo mediante dos pórticos de izaje o LF (idénticos) diseñados a medida para este proyecto.

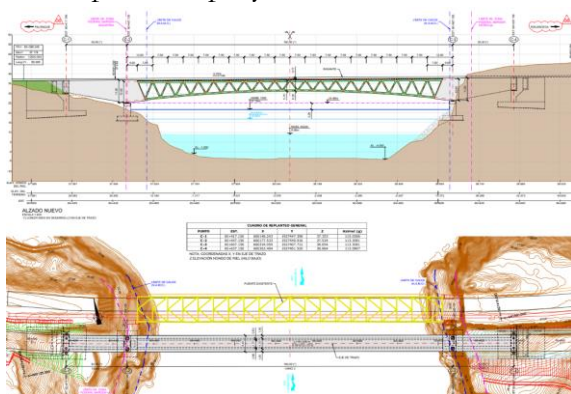


Figura 1. Perfil longitudinal y planta del nuevo puente Boca del cerro.

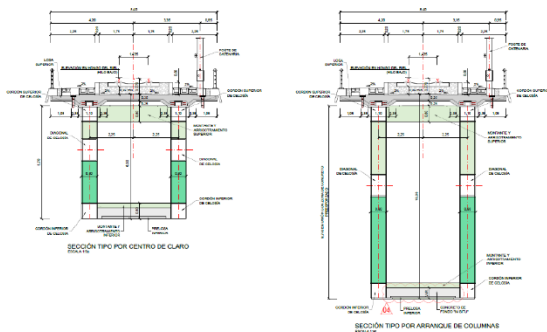


Figura 2. Sección transversal de la celosía metálica del vano central.

Max. segment weight	98 tons
Segment height	Min. 5700 mm Max. 9730 mm
Segment length (at centreline)	Typ. 7500 mm Max. (closure) 11000 mm
Steel segment width	5600 mm
Concrete deck width	8400 mm
Max. longitudinal gradient	0 %
Segment crossfall	0 %
Segment top slab transverse slope from centre	2 %
Min. horizontal curvature radius (in plan)	Straight

Figura 3. Datos principales considerados en el diseño.

2. Diseño de los pórticos

Los pórticos de izaje se diseñaron con un gálibo interior y con una longitud total suficientes para cargar las dovelas desde la parte trasera del pórtico, desplazarlas por su interior hasta la posición frontal donde finalmente se descendía hasta la cota de colocación para proceder al soldado de esta. La carga de diseño del equipo se hizo en base al peso de la dovela mayor siendo esta de 98 t.

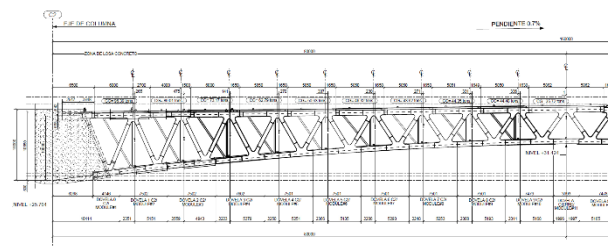


Figura 4. Dovelas de la celosía metálica.

Considerando que la dovela de mayor dimensión tenía un canto de 11.4 m y una longitud típica de 7.5 m, se adoptó una altura interna libre de 13.53 m y una longitud del marco principal de 26.3 m.

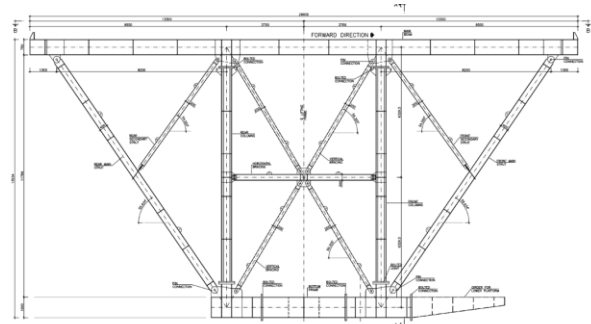


Figura 5. Perfil longitudinal del pórtico de izaje.

La estructura del LF está compuesta por dos vigas longitudinales superiores, unidas entre sí sólo en sus extremos. Sobre estas vigas se dispuso una viga transversal superior móvil (UCB) con la finalidad de izar, desplazar longitudinalmente y descender las dovelas. La UCB se desplazaba sobre skid-shoes mediante 2 gatos hidráulicos (capacidad de 200 kN con carrera de 650 mm, velocidad de desplazamiento

de 1 m/min) con soporte de reacción y reajuste automático a lo largo de la viga principal. Este sistema se compone de un carril de guiado con fijaciones laterales para los gatos hidráulicos de empuje y tiro, con una lámina de acero inoxidable en su superficie de deslizamiento sobre el que se desplazan los patines apoyados sobre unas almohadillas de neopreno-teflón, que permitieron disminuir la fricción longitudinal durante el movimiento.

Sobre el UCB se dispusieron 2 gatos de Heavy Lifting SMU-70 (Strand Lifting Unit con 70 t SWL y velocidad de elevación de aproximadamente 0.25 m/min), junto con sus “palmeras” para guiar los cordones, que se utilizaron para el izaje y descenso controlado de las dovelas.

Las vigas superiores apoyaban sobre 4 columnas verticales de sección cajón variable. Adicionalmente se dispusieron 2 puntales de cada lado para soportar el voladizo de las vigas principales. Todos estos elementos verticales se rigidizan en su plano con cruces y puntales secundarios.

La estructura se completaba con un bastidor inferior (bottom frame) en secciones cajón que recibe las columnas en sus extremos (en voladizo) permitiendo transferir la carga principal al cordón superior del segmento montado.

El Bottom Frame estaba soportado por 4 skid-shoes que se movían sobre un rail colocado en la parte superior de cada uno de los cordones superiores del segmento del tablero ya montado, y permitía el movimiento longitudinal del LF. El Bottom Frame debió ser “atado” durante el izaje y descenso de la dovela mediante el sistema de Tie-down (con barras de alta resistencia) que permitía transferir las tracciones a las orejetas soldadas en la dovela ya montada. También se debía “activar” el sistema de patas (compression support) para garantizar que las cargas de compresión, debido a la posición excéntrica de la dovela, se transfieren directamente a las **almas de la celosía inferior** ya

montada, ya que excedían la capacidad del sistema de skid-shoes y de la chapa superior del cordón superior de la celosía.

Este sistema se dispuso tanto en las patas frontales como en las traseras, ya que los esfuerzos eran alternantes durante la carga y descarga, como veremos más adelante. Adicionalmente a su uso principal, se había previsto la utilización de este sistema de tie-downs (los 4 activados al mismo tiempo) en caso de que el viento superara el valor máximo de diseño y pudiera comprometer la estabilidad del LF. Afortunadamente no fue necesario su uso.

Adicionalmente, el bottom Frame estaba equipado con 4 gatos de elevación (capacidad de 80 t con carrera de 200 mm) que permitió descender y levantar el LF para pasar desde la losa de hormigón a circular por el cordón superior de la celosía metálica y viceversa.

La plataforma inferior disponía de dos vigas en voladizo frontales sobre la que se “colgó” una plataforma de soldadura compuesta de 3 niveles de trabajo (y todos sus acesos), para permitir soldar los cordones superiores, inferiores y las diagonales de la celosía en todo su perímetro.

Por último, se utilizaron 2 Lifting Beams para levantar y unir cada dovela, actuando de balancín para nivelarlas. Estaban equipados con gatos hidráulicos (capacidad de 275 kN de empuje y 176 kN de tiro, con 350 mm de carrera) para el ajuste del CG y de la inclinación.

Para el diseño de este equipo móvil participaron varias empresas. Los servicios técnicos de VSL España realizaron el prediseño, el desarrollo del concepto de la solución constructiva, la cinemática de montaje, la interacción con la estructura principal y el diseño de los equipos. Pondio hizo el diseño detallado de la estructura metálica, K2 realizó el independent engineering check (ICE) y finalmente los servicios técnicos de VSL Singapur realizaron el Peer review.

3. Disposición general del LF

Se utilizaron dos pórticos de izaje móviles (LF) para instalar las 19 dovelas de acero entre C2 y C3. Un LF empezó desde la pila C2 montando 9 dovelas en voladizo, el otro LF desde la pila C3 montó igualmente 9 dovelas en voladizo. El LF de C2, que alcanzó la mitad del vano más tarde, se utilizó para el montaje de la dovela de cierre. Las prelosas, sobre las que se dispuso hormigón in situ para completar la losa superior, sólo se instalaron después de que el LF hubiera completado el montaje de la última dovela de cierre. Estas prelosas de unas 7.5 toneladas de peso, se montaron con este mismo equipo, reemplazando los gatos de Heavy Lifting del UCB por un cabrestante, con capacidad de desplazamiento transversal. También hubo que disponer de unos pórticos metálicos en el Bottom Frame que permitieron almacenar hasta 12 prelosas en su interior.

El LF se ubicó en el extremo del tablero de hormigón sobre los carriles especiales. El suministro de las dovelas se realizó sobre 2 bogies de tren desde la zona de premontaje de la estructura metálica hasta el extremo del vano lateral hormigonado.



Figura 6. Pórtico de izaje en posición de izaje.

El LF estuvo perfectamente conectado a la estructura permanente para garantizar su estabilidad durante la elevación y el montaje de las dovelas, tanto para transferir las fuerzas de tracción como para distribuir adecuadamente la

fuerza de compresión. El LF sólo se desplazó hasta la posición de montaje con la dovela ubicada en el centro de gravedad del conjunto LF, dovela y plataforma, ubicada lo más bajo posible y arriostrada a las 4 columnas para evitar su balanceo. Para el montaje de las dovelas M3 y M4 el LF se desplazó encima de una Shim-Beam cuya misión fue mantener el mismo nivel que el tablero de hormigón. Luego del montaje de la dovela M5, el LF se descendió hasta apoyar directamente sobre la celosía.

4. Montaje y desmontaje

El LF se ensambló en la posición para el montaje de la primera dovela en los pilares C2 y C3 respectivamente.

Para realizar el montaje del LF fue necesaria la utilización de 1 grúa de 400 t que permitiera izar el marco principal de 26 m de longitud.



Figura 7. Izaje del marco principal.

5. Prueba de carga

Antes del uso regular del equipo, la puesta en servicio del LF requirió el siguiente control de

calidad:

- Pesaje de la estructura.
- Levantamiento topográfico del pórtico en vacío.
- Inspección visual de uniones atornilladas y bulonadas, puntos de apoyo sobre skid-shoes y retenidas, equipos de izado y elementos de conexión (puntos de enganche).
- Prueba de carga estática, sin desplazamiento de la dovela, con aumento incremental de la carga de izaje (10%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100% del peso de la dovela) y medición de las deflexiones tanto en el marco principal como en las columnas, así como la inspección visual de todos los elementos.
- Descarga completa y levantamiento topográfico del pórtico en vacío.
- Prueba de carga dinámica con izaje de la dovela: 300 mm, 600 mm y cota de lanzado.
- Prueba de translación de la viga transversal superior con desplazamientos incrementales de 1m, medición de la fuerza de rozamiento en el empuje y levantamiento topográfico de todos los puntos de control en el marco principal y columnas

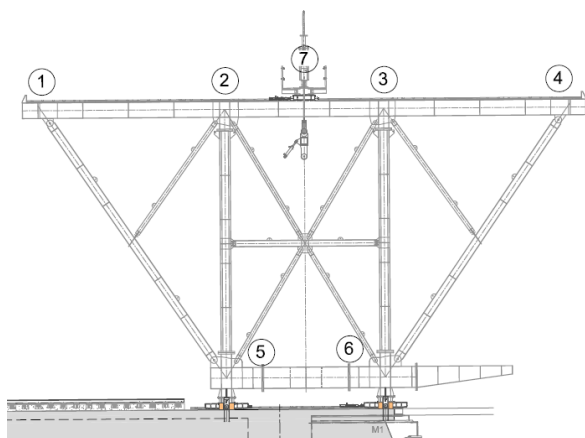


Figura 8. Puntos de control topográficos durante la prueba de carga.

Los criterios de aceptación y rechazo y las tolerancias que se contemplaron durante la prueba de carga fueron:

- Que la diferencia de carga entre los grupos hidráulicos no fuera mayor del 10% del valor máximo estimado.
- Que la cota relativa entre los puntos 1 y 4 no difiriese en más de $0.0035 \text{ rad} = 0.2^\circ = 0.35\%$ (30 mm en 8.25 m) respecto de la cota de los puntos 2 y 3 respectivamente.
- Que el desplazamiento horizontal entre los puntos 2 y 3 a ambos lados del LF fuera menor a $\pm 10 \text{ mm}$.
- Que el desplazamiento vertical relativo entre los dos carriles (desnivel transversal) fuera menor a $\pm 10 \text{ mm}$.

Todos los criterios se cumplieron durante la prueba de carga.

6. Ciclo tipo de colocación de dovelas metálicas

Esta solución consideró un ciclo tipo que se compuso de las siguientes fases:

- **Fase 01:** Movimiento de la dovela metálica hasta la posición de izaje mediante el uso de 2 bogies de tren que circulaban sobre sistema de 2 vías de tren paralelas.



Figura 9. Movimiento de la dovela mediante el uso de bogies de tren.

- **Fase 02:** Activación de tie-down en las patas frontales y del compression support (con los gatos hidráulicos bloqueados mecánicamente) en la parte posterior.



Figura 10. Sistema de retenida del pórtico.

- **Fase 03:** Movimiento del UCB hasta la posición de izado de dovella.
- **Fase 04:** Izaje de la dovella hasta la cota de lanzamiento de pórtico de izaje y movimiento del UCB hasta la posición de lanzamiento de pórtico de izaje. Esta posición es aquella que garantiza que las reacciones del conjunto pórtico de izaje + dovella + plataforma son iguales en los 4 skid-shoes. Dado que el peso de las dovelas se reduce a medida que progresa el avance del puente, la posición de las dovelas durante el lanzamiento de pórtico de izaje, cambiaba para cada dovella; siendo para las más pesadas más cerca del eje de simetría del pórtico de izaje y para las más ligeras más alejadas del centro. Esto es así porque el pórtico de izaje no era completamente simétrico, debido a la existencia de las plataformas en la parte frontal.



Figura 11. Posición de la viga transversal de izaje durante el lanzamiento del pórtico de izaje.

- **Fase 05:** En esta fase se transfería la reacción de compresión desde los compression supports a los skid-shoes traseros y luego se liberaba de las barras de los tie-downs en los apoyos delanteros, de forma que el pórtico quedaba completamente apoyado sobre los skid-shoes.
- **Fase 06:** Lanzamiento del conjunto pórtico-dovella hacia la posición de instalación de la dovella. Esta fase consiste en el uso de gatos de empuje colocados en los skid-shoes delanteros del pórtico para empujarlo sobre las almohadillas de neopreno-teflón. Es importante notar que, durante esta fase, el movimiento longitudinal del pórtico no estaba restringido por lo que era necesario monitorear permanentemente la presión de empuje de los gatos. Una presión de empuje muy elevada en los cilindros hidráulicos indicaría acodamiento de alguno de los elementos de apoyo del pórtico de izaje por lo que la maniobra se debería detener hasta aclarar que sucede. Sin embargo, una presión de empuje muy baja indicaría la ausencia de rozamiento entre el acero inoxidable de los skid-shoes y las almohadillas de neopreno-teflón que podría suponer la movilización del pórtico de forma no deseada.



Figura 12. Sistema de lanzamiento del pórtico.

- **Fase 07:** Previo al desplazamiento longitudinal de la dovela hasta su posición de descenso, se debía conectar los tie-downs de la parte trasera, activar sus barras de alta resistencia y luego activar los gatos de los compression supports de la parte frontal (quedando apoyado sobre los gatos hidráulicos bloqueados mecánicamente). Esta fase es análoga a la fase 02, si bien, dado que la dovela sería desplazada hacia la parte delantera del pórtico de izaje, el esquema estático tracción-compresión cambia de sentido.
- **Fase 08:** Desplazamiento longitudinal de la dovela (colgando del UCB) hasta su posición y posterior descenso de esta (con los gatos de Heavy Lifting), hasta la cota de soldadura de la dovela al tablero existente.



Figura 13. cilindros hidráulicos de cordones con doble anclaje activados mediante servoválvulas.

Para el descenso controlado de la dovela con los gatos de Heavy Lifting, los sistemas de servoválvulas transfieren la carga entre ambos anclajes de cilindro a medida que la pieza desciende: Cargando en anclaje superior cuando el pistón está retrayéndose y la dovela descendiendo, y en anclaje inferior cuando el cilindro hidráulico está abriendo pistón para iniciar otra embolada mientras la pieza se mantiene bloqueada mecánicamente. Este proceso automatizado permite además el clavado de las cuñas de forma sincrónica en función de la carrera del pistón, el control de la presión tanto en las cámaras de empuje como de retorno del cilindro y el monitoreo del

desplazamiento del pistón. A este efecto, VSL Construction Systems dispuso de su sistema de control y monitoreo para maniobras de descenso.



Figura 14. Panel de control de los cilindros hidráulicos de descenso.

- **Fase 09:** Ajuste fino de la alineación de y soldadura de la dovela.



Figura 15. Cilindros de ajuste.

Esta fase consiste en la alineación de la dovela mediante el uso de los cilindros del balancín que permiten cambiar el giro de esta, guiados con el apoyo de la topografía. Una vez que se confirmaba por parte de la topografía que la dovela estaba en posición, se procedía a soldarla al resto del tablero completamente.

- **Fase 10:** Transferencia de carga desde los gatos de Heavy Lifting al tablero soldado, liberación de los gatos del balancín, empuje de la UCB a su posición de movimiento del pórtico de izaje en vacío (decalada hacia detrás desde el eje de simetría del pórtico conforme a la ingeniería de construcción), liberación de la fijación

del pórtico tanto en el apoyo frontal con la transferencia de carga desde los gatos planos a los skid-shoes como en los apoyos posteriores con la liberación de las barras de retenida y empuje del pórtico hasta el vano de compensación en la posición de izaje de la siguiente dovela para iniciar un nuevo ciclo.



Figura 16. Vista longitudinal del nuevo puente de Boca del cerro durante su construcción.

7. Colocación de las prelosas

Una vez cerrado el vano central con la colocación de la dovela de cierre, se procedió a adaptar el pórtico para la colocación de las prelosas. A tal efecto, se retiraron los gatos SMU-70 y se sustituyeron por un cabrestante, que permitía el movimiento transversal y una manipulación más ágil de las prelosas. Como las prelosas se debían disponer de forma longitudinal dentro del LF (para poder transportar hasta 12), era necesario girarlas una vez que se había traspasado los puntales frontales, para colocarlas en su posición.

La colocación de las prelosas se realizó de forma simétrica desde el centro de luz hacia los vanos de compensación del puente. El transporte de 12 prelosas dentro del LF permitió montar 22.5 m de prelosas en cada “viaje”.

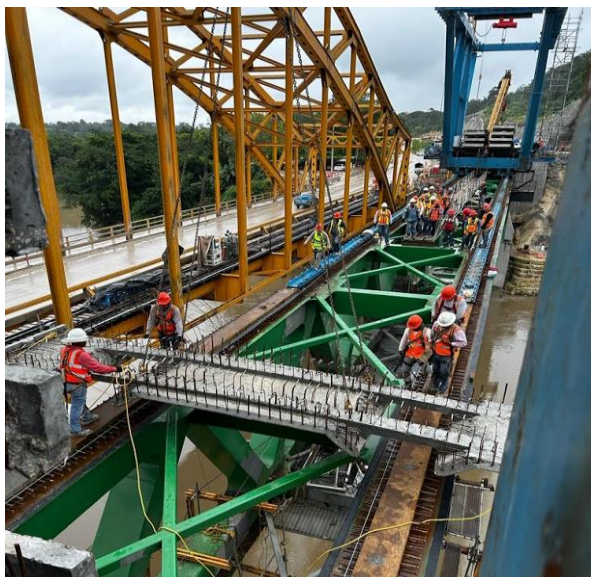


Figura 17. Vista de la colocación de las prelosas.

8. Plazo de ejecución del tablero

El plazo de ejecución del vano central del tablero, una vez estuvieron montados los pórticos de izaje, fue de 3 meses:

- 2.5 meses para la colocación de las 19 dovelas metálicas.
- 2 semanas para la colocación de 160 m de prelosas de hormigón armado incluida la modificación de los pórticos.

El rendimiento en la colocación de las dovelas metálicas fue de 5 días por dovela y pórtico.

Agradecimientos

Finalmente queremos agradecer a todas las partes involucradas en el proyecto su colaboración y el gran trabajo realizado por todos:

- A IDEAM / TY LIN que realizó el diseño del nuevo puente de Boca del Cerro.
- A MOTA ENGIL MÉXICO que fue el contratista principal.
- A RECALL que fue el fabricante de la estructura metálica.
- A ULMA que fue el proveedor de la plataforma frontal para la soldadura de dovelas.

- A K2 que realizó el independent engineering check.
- A Pondio que realizó el diseño detallado de los pórticos de izaje.
- A VSL Singapur, cuyos servicios técnicos realizaron el peer review.