

Viaducto de la Garra de Jaguar: proyecto y proceso constructivo

Garra de Jaguar viaduct: Project and construction process

Jordi Revoltós Fort^a, Diego Pajuelo Gallardo^b, Marck Anthony Mora Quispe^{b,c},

Ignacio Pita Olalla^b

^a Máster Ingeniero de Caminos, C. y P. Jefe de la disciplina de Puentes y Viaductos de Sener

^b Máster Ingeniero de Caminos, C. y P. Ingeniero de la disciplina de Puentes y Viaductos de Sener

^c Doctorando Ingeniero de Caminos, C. y P. ETSICCP - Universidad Politécnica de Madrid (UPM)

RESUMEN

Se describe en esta comunicación el proyecto y proceso constructivo del viaducto sobre la caverna Garra de Jaguar perteneciente al tramo 5 Sur del Tren Maya, México. Se trata de un puente ferroviario atirantado de 266.4 m de longitud total, con un vano principal de 122.4 m y tres vanos adicionales de retenida a cada lado. El tablero se concibe a partir de una estructura metálica conformada por dos vigas longitudinales laterales y vigas transversales entre ellas más una losa superior de hormigón armado. Se define un plano de tirantes a cada lado del tablero formado por seis cables paralelos. La estructura metálica se monta mediante empuje desde ambos extremos evitando el apoyo sobre la caverna.

ABSTRACT

The design and construction process of the viaduct over the cavern Garra de Jaguar is described in this paper. The viaduct is located in the Section 5 South of the Maya Train, Mexico. It is a railway cable-stayed bridge of 266.4 m length composed by a main span of 122.4 m, which avoids the cavern, and three additional retaining spans on each side. The deck is defined as a composite steel-concrete structure consisting of two steel longitudinal girders in both edges connected by transverse girders and a reinforced concrete top slab. On each side of the deck, a set of six parallel cables is defined. The metallic structure is launched initially from the retaining spans avoiding temporary supports over the cavern.

PALABRAS CLAVE: viaducto, ferrocarril, acero-hormigón, atirantado, empujado

KEYWORDS: viaduct, railway bridge, composite steel-concrete, cable-stayed bridge, launched bridge

1. Introducción

El viaducto de la Garra de Jaguar pertenece al tramo 5 Sur de la línea ferroviaria Tren Maya que discurre a lo largo de la península del Yucatán, México y que ha sido inaugurado en septiembre de 2024. El tramo 5 Sur, de 67.7 km de longitud, conecta las ciudades de Tulum y Playa del Carmen, colaborando al desarrollo

socioeconómico del Estado de Quintana Roo, en una de las mayores áreas turísticas de México. El Proyecto del tramo ha sido desarrollado en su integridad por Sener.

El tramo destaca por localizarse sobre una zona mayoritariamente kárstica, geológicamente muy compleja, en la que se tiene gran presencia

de cavernas y cenotes que se encuentran interconectados a través de una compleja red de conductos subterráneos con gran presencia de agua. La roca caliza que aflora en superficie se encuentra muy deteriora en profundidad, con multitud de oquedades de diferentes tamaños. Por todo lo anterior la mayor parte del recorrido se ha proyectado en viaducto.

Dentro del conjunto de cavernas presentes a lo largo del recorrido destaca la Caverna Garra de Jaguar sobre la cual se ha construido el viaducto al que da nombre. Esta caverna, de casi 4 km de longitud, discurre transversalmente a la línea ferroviaria, incluye zonas subacuáticas (nivel freático a unos 15 m de profundidad) y alcanza unos 100 m de ancho en el cruce ferroviario con una altura de libre de hasta unos 8 metros. Se destaca de la misma su gran valor geológico y ecológico que ha exigido desde fase de proyecto la necesidad de protección. Por ello, el salto sobre la caverna debía evitar cualquier apoyo sobre la misma, ya fuese de forma definitiva, como durante la construcción y, dadas sus dimensiones, ha dado lugar a una estructura singular que se ha convertido en el icono del tramo 5 Sur del tren Maya.



Figura 1. Entrada a la caverna Garra de Jaguar.

2. Descripción del puente

En la zona del cruce sobre la caverna la rasante apenas tiene altura sobre el terreno, de no más de 8 metros lo que ha exigido una tipología de tablero superior, con un vano principal de más de 100 m. Por otro lado, la construcción debía evitar cualquier apoyo sobre el techo de la caverna. Bajo estos condicionantes se proyectó un puente atirantado cuyo tablero se empujó desde sus extremos.



Figura 2. Render del Viaducto Garra de Jaguar.

Además de los condicionantes anteriores, el proyecto del tramo, así como su construcción, estuvieron marcados por estrictos plazos de ejecución los cuales fueron considerados ya en fase de Proyecto como más adelante se detalla.

En el diseño del puente se pretendió en todo momento buscar una adecuada integración

de la estructura en el entorno que lo rodea a partir de la adopción de un diseño sencillo y acabado con colores suaves.

El puente tiene una longitud de 266.4 m, distribuida en un vano principal de 122.4 m de luz, centrado sobre la caverna y atirantado desde dos pilonos, uno a cada lado de la misma, más

tres vanos de compensación en cada lateral, también atirantados; uno de 28.8 m y otros dos de 21.6 m de luz.

Los pilonos se elevan hasta los 33 metros sobre el tablero, mientras que los vanos de compensación cortos proporcionan la rigidez necesaria de la estructura frente las sobrecargas ferroviarias. La longitud total de los tres vanos de retenida, de algo más de la mitad de la correspondiente al vano principal, proporciona el equilibrio necesario durante la fase de empuje del tablero desde ambos extremos. Por último, la

ubicación del apoyo extremo, a cierta distancia del primer tirante, evita reacciones de tiro en el mismo.

El sistema de atirantamiento se constituye por 6 familias de tirantes paralelos dispuestas a cada lado del tablero.

La estructura fue diseñada para alojar la doble vía del trazado ferroviario y para el tren de cargas Cooper E-80 establecido en la normativa americana e incluido en las bases de cálculo de Proyecto.



Figura 3. Viaducto Garra de Jaguar.

2.1 Tablero

El tablero se define de sección mixta acero-hormigón, el cual permitió simultanear la ejecución de la estructura metálica en taller con la ejecución de la subestructura en obra, adaptándose a los exigentes plazos de ejecución que se establecieron. A su vez, la ligereza de la estructura metálica resulta idónea frente a un montaje del tablero mediante empuje del mismo.

La estructura metálica se ha definido a partir de elementos sencillos y atornillados, que faciliten su fabricación, traslado y permitan un rápido ensamblaje en obra.

La sección transversal se compone de dos vigas metálicas longitudinales en doble T de 2,40 m de canto, dispuestas en los laterales del

tablero con una separación entre ellas de 13,20 m.



Figura 4. Viga longitudinal en fabricación.

Sobre el ala inferior se definen dos chapas inclinadas a modo de célula, necesarias durante el empuje para minimizar la flexión transversal del ala y recoger eventuales excentricidades durante la construcción entre la posición del patín sobre el que se produce el deslizamiento y el alma de la viga.

Entre las vigas longitudinales se disponen vigas transversales, también en doble T, de 1,85 m de canto y separadas entre sí 3,60 m. La unión entre vigas transversales intermedias y las longitudinales se define mediante tornillos de alta resistencia ASTM A490 de manera que se evitó la ejecución en obra de un gran número de uniones soldadas, permitiendo un ensamblaje más rápido.

Durante el diseño, se cuidaron los detalles de transición de cantos y cruces entre chapas para proporcionar un mejor comportamiento a fatiga provocada por las cargas ferroviarias.



Figura 5. Vista de las vigas transversales y longitudinales.

En las riostras de apoyo, a diferencia de las vigas intermedias, sí se definieron uniones soldadas a las vigas longitudinales. Los apoyos del puente, de tipo esférico, se dispusieron en cada pila, uno deslizante y otro guiado que recogía las acciones transversales sobre el tablero. En el caso de los apoyos en pilono se recurrió a un tope transversal para transmitir las acciones transversales, siendo ambos apoyos libres en las dos direcciones. Los apoyos del puente se dispusieron bajo las riostras transversales, desplazados hacia el interior del tablero al objeto de simplificar las tareas a realizar en obra. De esta forma se liberó el ala inferior de las vigas longitudinales para el empuje

del tablero, evitando soldar en obra las cuñas superiores de apoyo una vez retirados los patines de deslizamiento. A su vez, al no interferir la posición de los apoyos con los patines de deslizamiento se facilitó también la operación de instalación de apoyos, y la transferencia de carga desde los patines de deslizamiento a apoyos definitivos tras el empuje del tablero.

Finalmente, se completa la sección metálica con un arriostramiento horizontal en K a base de perfiles tubulares entre vigas transversales que estabilizaron el tablero durante la construcción hasta contar con la colaboración de la losa de hormigón.

Sobre la estructura metálica se definió una losa de hormigón armado de resistencia 40 MPa sobre prelosas colaborantes apoyadas entre vigas transversales. En la zona de apoyo en pilonos, en una longitud de 12.60 m a cada lado, se extendió también una losa inferior de hormigón armado, también de 40 MPa, sobre todo el ancho interior del ala inferior de las vigas metálicas longitudinales, 1.15 m, que colabora a resistir las flexiones negativas como sección de doble acción mixta.

En cuanto al anclaje de tirantes en el tablero, ubicados en el exterior del tablero, según se describía anteriormente, se cuidó especialmente su diseño de manera que minimizase su impacto visual y se lograra una buena integración en la estructura. Los anclajes de tirantes se disponen cada 7.20 m, coincidiendo cada dos vigas transversales.



Figura 6. Vista de anclajes de tirantes en tablero.

El anclaje de los tirantes en el tablero se ha constituido a partir de un tubo estructural que

sustituye al tubo de sacrificio convencional de los anclajes de tirantes en elementos de hormigón y sobre el que apoya la placa de anclaje, descargando sobre el mismo la carga de los tirantes. A dicho tubo estructural se le soldaron tangencialmente dos chapas paralelas que conducen la carga del tirante desde el tubo hasta el alma de la viga metálica longitudinal.



Figura 7 Detalle del anclaje de tirante en tablero.

La excentricidad de la carga desde el punto de anclaje hasta el eje de la viga longitudinal se resiste mediante un par de fuerzas entre las chapas dispuestas contra el tubo, una alineada con el ala superior de la viga longitudinal en prolongación de ésta, y otra en la zona inferior del anclaje dispuesta entre las chapas paralelas principales. Estas chapas que recogen la excentricidad transversal están alineadas con las vigas transversales del tablero lo cual permite autoequilibrar estas cargas entre uno y otro lado del tablero.

Otro elemento singular a destacar es el detalle de anclaje vertical del tablero en las pilas de retenida y que recogen las reacciones de tiro que se producen al paso de las cargas ferroviarias por el vano principal. Dada la poca altura del tablero sobre el terreno, se definieron dos bielas metálicas por pila, doblemente articuladas en longitudinal, que permiten el libre movimiento del tablero, diseñadas para transmitir una reacción de tiro de hasta unos 13 000 kN en Estado Límite Último.



Figura 8. Biela de anclaje en pilas de retenida.

Para evitar la pérdida de compresión en los apoyos del tablero en estas pilas de retenida al paso del tren, se aplicó un pretensado en las barras de anclaje de las bielas, todo ello previo al hormigonado de la meseta inferior bajo bielas, de manera que se garantizase una compresión mínima en los apoyos del tablero en servicio. Por otro lado, se cuidó especialmente la protección contra la corrosión de estas barras de anclaje, incorporando, además de sistemas pasivos de protección (pintura de barras, encintado e inyección de zonas de anclaje), un dispositivo de anclaje inferior que permitiese una eventual extracción y reemplazo de barras.

2.2 Pilonos

Los pilonos alcanzan una altura de 33.40 m desde apoyos de tablero y su diseño en hormigón armado se planteó sencillo, en forma de H, que permitiese una rápida ejecución.



Figura 9. Vista general de pilonos.

Los fustes, de sección rectangular de 3.00 m en longitudinal y 2.80 m en transversal, de hormigón de 45 MPa de resistencia, se vincularon entre sí mediante un travesaño superior de 2.00 x 1.75 m.

Los fustes se ejecutaron con encofrado trepante en trepas de 3.75 m de altura, que coincidieron con la separación vertical de los anclajes de tirantes, de manera que en cada trepa se alojase por completo una única pareja de anclajes de tirantes. La densidad de armadura necesaria para resistir las flexiones longitudinales que induce la sobrecarga ferroviaria exigió el empleo de armaduras de 38 mm de diámetro (#12) y su empalme mediante manguitos roscados los cuales fueron decalados entre trepas a partir de barras de longitud de dos trepas.



Figura 10. Ejecución de fustes de pilonos.

Para los anclajes de tirantes en los pilonos se adoptó una solución de anclaje en paramento exterior con el cruce de cables en planta. Esta disposición se debe a un doble motivo. Por un lado, la dimensión longitudinal del fuste no permite la disposición de un armario interior de anclaje, que exigiría un incremento significativo de la dimensión longitudinal del fuste, más habitual en puentes atirantado de luces mayores. En segundo lugar, la ausencia de armario interior agilita la ejecución de fustes lo cual se comprobó

en obra empleándose menos de dos meses para su ejecución una vez completada la cimentación.

En fase de diseño fue necesario incrementar la separación libre entre fustes para permitir el paso de los anclajes de tirantes en el tablero durante su empuje. Esto da lugar a una excentricidad transversal de los tirantes de 2.25 m entre el punto de anclaje en el tablero y el eje de fustes.



Figura 11. Vista en planta de pilonos.

Esta excentricidad deriva en la aparición de unas fuerzas transversales de desvío significativas en los fustes hacia el interior del tablero, que se autoequilibran entre uno y otro lado mediante la incorporación del travesaño superior, que minimiza así las flexiones transversales en los fustes. Adicionalmente, el travesaño colabora también a reducir el esfuerzo torsor en los fustes debido al cruce en planta entre cada pareja de tirantes.

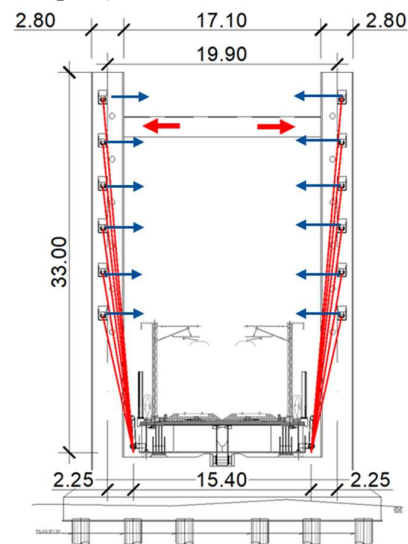


Figura 12. Esquema de desvíos transversales en pilonos.

2.3 Tirantes

Los tirantes se definieron a partir de 61 torones $\varnothing 0.6''$ (150 mm^2) formando un ángulo con el tablero de 21.5° . En Proyecto se estableció su tesado en una única etapa, desde pilonos, salvo el primero a instalar cuya puesta en carga se dividió en dos escalones. El tesado desde pilonos cumple con la premisa de Proyecto de evitar cualquier apoyo sobre el techo de la caverna. Se proporcionó a los tirantes una triple barrera de protección (acero galvanizado, vaina individual rellena de cera y vaina exterior de HDPE).

2.4 Transmisores de impacto

Las acciones horizontales longitudinales, ya sean de frenado y arranque de trenes o de origen sísmico, se transmiten directamente desde el tablero a la base de pilonos a través de transmisores de impacto (tipo STU) ubicados bajo las vigas longitudinales junto a los pilonos. La capacidad de los mismos es de 3 500 kN.



Figura 13. Transmisores de impacto.

Mediante este esquema, se reparten las acciones entre ambos pilonos y se evita que las acciones longitudinales sobre el tablero se recojan a través de los tirantes que llevarían la carga hasta un punto alto del pilono y darían lugar a unas importantes flexiones longitudinales en pilonos. Además, estos dispositivos evitan movimientos longitudinales durante el frenado, permitiendo a su vez la libre dilatación del tablero frente a las acciones térmicas y reológicas del hormigón.

3. Proceso constructivo

Como se describió anteriormente, el proceso constructivo está muy condicionado por la necesidad de evitar cualquier apoyo temporal sobre la caverna y evitar cualquier riesgo de colapso de la misma. Con este fin, se estableció en Proyecto un procedimiento de montaje del tablero mediante empuje sobre la caverna.

Un segundo condicionante del diseño del proceso constructivo fue la secuencia evolutiva del tablero y la entrada progresiva del peso del mismo el cual se tuvo que coordinar con la puesta en carga de tirantes.

3.1 Empuje del tablero

Se definió en Proyecto el montaje de la estructura metálica dividida en dos tableros, cada uno de ellos apoyado sobre las pilas de retenida de un lateral más otros tres apoyos traseros provisionales, que permitió el montaje completo de la estructura metálica, todo ello fuera de la ubicación de la caverna. El frente de empuje se situó justo por delante del apoyo en pilonos al objeto de evitar cualquier operación de remonte en pila.

Las vigas transversales se enviaron a obra fabricadas a longitud completa, ejecutando en obra, a nivel de suelo, únicamente su unión atornillada a las vigas longitudinales (salvo las vigas transversales de apoyo que fueron soldadas). Posteriormente, se izaron por tramos conjuntos completos de vigas longitudinales y transversales a posición de empuje, apoyándose directamente sobre los patines de deslizamiento. Se adoptaron las medidas oportunas para evitar deslizamientos sobre los patines y se completaron las uniones soldadas transversales entre segmentos de vigas longitudinales.

El empuje, de únicamente 57.60 m desde cada uno de los lados, se realizó una vez completada la estructura metálica, hormigonada la losa inferior y montadas las prelosas de los vanos de retenida a modo de contrapeso, sin que penalicen apenas el diseño del tablero y de los

elementos de empuje. Dos gatos de tiro se situaron en pilonos y empujaron el tablero a través de dos cables de 7 torones anclados en una

viga auxiliar bajo tablero. De forma preventiva se dispusieron también dos cables de retenida anclados a la pila extrema definitiva.



Figura 14. Empuje completado en uno de los tableros.

Para limitar la deformación en el frente y no condicionar el diseño de la sección del tablero en el apoyo sobre pilonos, se dispuso de un sistema de atirantamiento provisional a partir de una torre metálica de 15 m de altura sobre el tablero en la sección de pilono y una pareja de tirantes provisionales alineados con cada una de las dos vigas longitudinales. Cada tirante provisional se conformó por 26 torones $\varnothing 0.6''$. Se incorporó un sistema de anclaje activo a partir de cuatro barras $\varnothing 47$ de alta resistencia.



Figura 15. Anclaje activo de atirantamiento provisional.

Este sistema permitió tesar los tirantes provisionales en una etapa intermedia del empuje una vez que se alcanzó un voladizo de

30 m. Para evitar el contacto entre ambos tableros el empuje se completó dejando un gap entre ellos de 40 mm.

3.2 Instalación y puesta en carga de tirantes

Una vez completado el empuje de ambos tableros y realizada la maniobra de transferencia de carga a apoyos definitivos, se procedió al montaje y tesado de las bielas de anclaje en apoyos de retenida. Para ello, se emplearon cuatro gatos simultáneos conectados hidráulicamente para garantizar la entrada centrada de la carga en las bielas y evitar movimientos horizontales de las mismas.

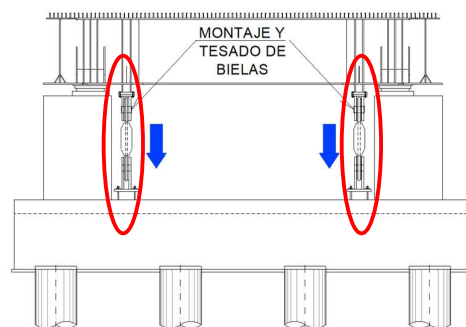


Figura 16. Montaje y tesado de bielas de retenida.

Finalizada esta maniobra se procedió al comienzo de instalación y puesta en carga progresiva de tirantes.

La entrada paulatina del peso del tablero, unido a la importante fracción de peso que representa la carga muerta, fundamentalmente el balasto, y posteriormente la carga significativa que supone el paso de los vehículos ferroviarios, hizo necesario definir una secuencia de instalación progresiva de tirantes. Para ello, se estableció en Proyecto la instalación en primer lugar de una de cada dos familias de tirantes de manera alterna (cables n° 1, 3 y 5, numerados de más corto a más largo). Posteriormente, una vez completado el tablero con el hormigonado de la losa, se realizaría la instalación del resto de tirantes (cables n° 2, 4 y 6). De esta forma se pudo establecer una carga mínima de instalación, no inferior a los 20 kN/torón que evitasen deslizamiento en las cuñas de anclaje de torones.



Figura 17. Instalación de primeros tirantes.

El proceso constructivo definido en Proyecto contempló la instalación inicial del segundo tirante más largo (cable n° 5) a una carga de tesado mínima de 20 kN/torón tras la cual se procedía a retirar el sistema de atirantamiento provisional y transferir toda su carga a este primer cable definitivo. Completada esta fase, se procedería a realizar la segunda etapa de tesado del cable. Este procedimiento permitía tener un mejor control de la carga definitiva introducida en el primer cable descartando cualquier variación derivada de eventuales desviaciones en la carga del sistema de atirantamiento provisional una vez completado el empuje. Posteriormente

se monta un segundo cable de longitud intermedia (cable n° 3) tesado en una única etapa.

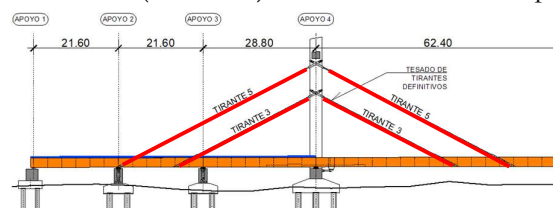


Figura 18. Instalación de tirantes n° 3 y 5.

Tras la instalación de esta segunda familia de tirantes se realizaría la maniobra de cierre entre tableros; acercamiento entre tableros para cierre del gap y posterior unión soldada entre ellos. Para ello, se emplearon dos barras Ø40 por viga longitudinal, dispuestas una a cada lado del alma y que se fijaban entre los extremos de los tableros. Mediante gatos se pusieron en carga estas barras venciendo las fuerzas de rozamiento en teflones de apoyos y la coacción elástica que suponen los cables ya instalados. Se estimó necesaria una carga total por barra de 360 kN.



Figura 19. Acercamiento y cierre entre tableros.

Se analizó en Proyecto la factibilidad de realizar pequeñas correcciones en cota relativa entre ambos tableros, previamente a la unión, ya fuese con pequeñas correcciones de carga en tirantes, mediante la actuación en las tuercas de regulación de anclajes en pilonos; incorporando peso en uno de los tableros; o mediante la incorporación de gatos entre ambos extremos. Se evaluó que se conseguían correcciones de desviaciones razonables de cota entre tableros con pequeños ajustes en cualquiera de estas actuaciones.

Una vez cerrada la estructura metálica se estableció el montaje de prelosas en el vano principal, continuando posteriormente con la

instalación de una tercera familia de tirantes (cable n° 1, el más corto).

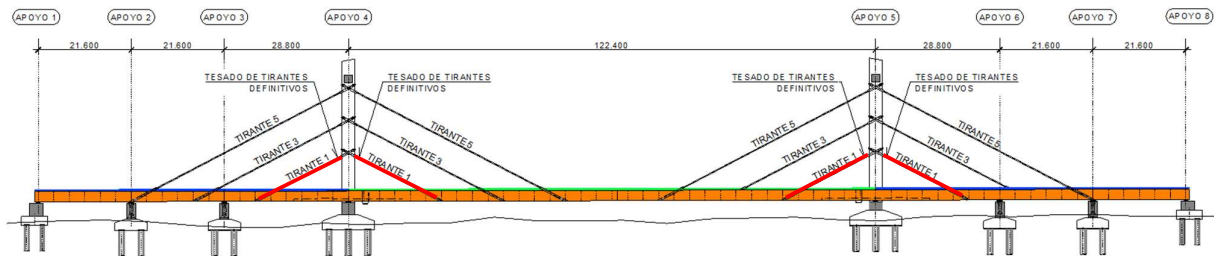


Figura 20. Instalación y tesado de tirantes n° 1.

La incorporación previa de las prelosas permitía añadir el peso necesario que evitase el levantamiento de apoyos en pilono durante la instalación de esta familia de tirantes. Además, se evitaba así el montaje previo de este cable, y que hubiese incrementado significativamente las cargas a aplicar en el cierre entre tableros por tratarse de un cable mucho más rígido.

La siguiente fase de ejecución prevista en Proyecto fue el hormigonado de la losa superior y tras la misma la instalación del resto de tirantes avanzando desde el más largo hacia el más corto (cables n° 6, 4 y 2), tesados en una única etapa completándose el proceso constructivo del tablero.

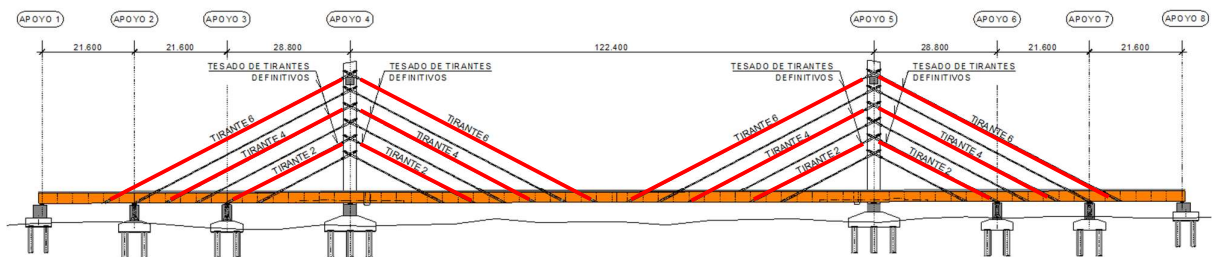


Figura 21. Instalación y tesado de tirantes n° 2, 4 y 6.

En fase de obra, se siguió a grandes rasgos el procedimiento de instalación de tirantes descrito. Sin embargo, debido a los plazos de ejecución establecidos, el constructor decidió solapar algunas fases de instalación de tirantes lo cual conllevó a ciertas desviaciones en flechas. Para su corrección, se realizó un pesaje de tirantes y se definieron una serie de retesados de cables con los que se consiguió rectificar la deformada del tablero.

Taller metálico: Recal.

Apoyos, tirantes y amortiguadores: VSL.

Maniobra de empuje y montaje de tirantes: VSL.

Apoyo Técnico a la constructora: Sener

4. Ficha técnica

Principales participantes:

Propiedad: Tren Maya (Empresa perteneciente a la Secretaría de la Defensa Nacional, SEDENA).

Proyecto: Sener

Dirección de obra: SEDENA.

Empresa Constructora: Gami, Grupo Indi.

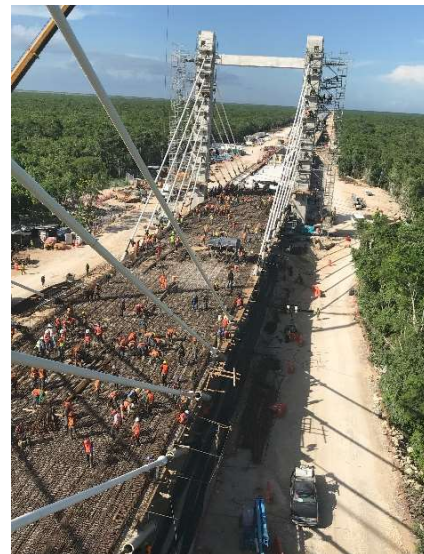


Figura 22. Montaje de ferralla en vano principal.