

Homogeneización en los viaductos ferroviarios del tramo 5 sur del Tren Maya (México)

Homogenization of the railway viaducts of section 5 south of the Mayan Train (Mexico)

Jordi Revoltós Fort^a, Javier Antón Díaz^b, Andrés Molina Escudero^b, Leire Amurrio Guinea^b

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sener Mobility. Jefe de Disciplina de Puentes y Viaductos. irevoltos@mobility.sener

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sener Mobility. Disciplina de Puentes y Viaductos. janton@mobility.sener

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sener Mobility. Disciplina de Puentes y Viaductos. amolina@mobility.sener

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Sener Mobility. Disciplina de Puentes y Viaductos. leire.amurrio@mobility.sener

RESUMEN

El Tren Maya constituirá un servicio de transporte férreo de carga y pasajeros que interconectará las principales ciudades y zonas turísticas de la región sursureste del país. Los estados de Chiapas, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo, estarán enlazados a través de 1,451 km aproximadamente, de vías férreas. En el tramo 5 sur, debido al ajustado plazo, la escala del proyecto, el alto riesgo kárstico y la presencia de cuevas y oquedades de dimensiones variables en la traza, se proponen tableros de vigas prefabricadas a baja altura, con continuidad en módulos de $4 \times 17.50 = 70$ m entre juntas de dilatación, y unión rígida con los pilotes que ejercen la función de subestructura y cimentación.

ABSTRACT

The Mayan Train will constitute a rail transport service for cargo and passengers that will interconnect the main cities and tourist areas of the south-southeast region of the country. The states of Chiapas, Tabasco, Campeche, Yucatán and Quintana Roo will be linked through approximately 1,451 km of railways. In section 5 south, due to the tight deadline, the scale of the project, the high karst risk and the presence of caves and cavities of variable dimensions in the layout, prefabricated beam decks are proposed at low height, with continuity in $4 \times 17.50 = 70$ m modules between expansion joints, and rigid connection with the piles that perform the function of substructure and foundation.

PALABRAS CLAVE: Viaducto ferroviario, hormigón prefabricado, plazo, tableros monolíticos, karst.

KEYWORDS: Railway viaduct, precast concrete, schedule, monolithic deck, karst.

1. Visión general del proyecto

La obra conocida como ‘Tren Maya’ es un ambicioso proyecto de ferrocarril impulsado por el Gobierno de México de una red ferroviaria de unos 1460 km que conecta los principales núcleos de la península del Yucatán. Se trata de un ferrocarril para uso mixto de pasajeros y mercancías con velocidades máximas de 160

km/h. Se plantea una línea doble si bien la construcción se ha realizado para vía simple con previsión de duplicar la línea en el futuro.

El proyecto y construcción se dividió en 7 tramos. Por tanto, numerosas empresas de diseño y construcción comenzaron los trabajos simultáneamente con el fin de realizar esta obra en tiempo récord, con fuertes presiones políticas para su consecución.

Sener fue adjudicataria de la supervisión de los proyectos de los tramos 1 a 4.

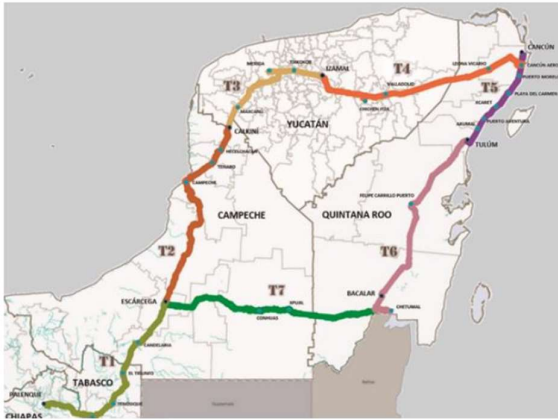


Figura 1. Red ferroviaria del Tren Maya

El tramo 5 discurre por la zona noreste de la península y conecta las localidades de Tulum y Cancún. Durante el desarrollo del proyecto, en el año 2022, el Gobierno de México decidió modificar el trazado original y asignar a Sener la redacción del proyecto del tramo 5 Sur, una subdivisión de dicho tramo entre las estaciones de Tulum y Playa del Carmen. Del mismo modo asignó la construcción de este tramo a tres empresas (que no concurrían en UTE): Mota Engil, ICA y Gami.

El Tramo 5 Sur tiene una longitud de 67 700 metros, discuriendo entre las localidades de Tulum y Playa del Carmen. Este tramo, a su vez, fue dividido en tres subtramos, cada uno de los cuales fue asignado a una empresa constructora si bien Sener fue la encargada de la redacción del proyecto de todos ellos, de manera simultánea.

Tabla 1. Subtramos del T5S

Subtramo	Ubicación	Longitud (km)
----------	-----------	---------------

A	Tulum - Akumal	27.00
B	Akumal – Puerto Aventuras	20.00
C	Puerto Aventuras – Playa del Carmen	20.70



Figura 2. División en subtramos del tramo 5 sur

La línea ferroviaria de doble vía objeto del proyecto es apta para Tráfico Mixto (pasajeros y carga) con velocidades de proyecto, máxima de 160 km/h para trenes de viajeros y máxima de 100 km/h para los trenes de mercancías.

La solución inicialmente planeada discurría principalmente por el camellón o sobre uno de los cuerpos de la Carretera Federal MEX 307, aprovechando el derecho de vía existente, empezándose a redactar el correspondiente Proyecto, que en su concepción general consistía en una solución para el paso de la troncal ferroviaria por medio de la construcción de terraplenes. No obstante, y debido a diversos factores, FONATUR anunció finalmente la modificación del trazado discuriendo entonces por la selva.

El nuevo trazado discurre por una zona fuertemente kárstica. El Gobierno de México confió a Sener y las empresas constructoras anteriores la labor de realizar el diseño y construcción en menos de 24 meses.

2. Condicionantes del proyecto

El primer condicionante era la alta karsticidad de la zona que cuenta con numerosas cuevas, grutas y cenotes. De hecho, uno de los atractivos turísticos de esta zona son las cuevas, como por ejemplo la de Garra de Jaguar. La línea de ferrocarril pasa por encima de esta cueva y fue preciso la realización de un viaducto atirantado para evitar la afección.



Figura 3. Terreno kárstico. Caverna Garra de Jaguar

El principal desafío de este proyecto era lograr que la línea estuviera operativa en un espacio muy corto de tiempo. Tanto el diseñador como las empresas constructoras siempre tuvieron claro que el principal objetivo era mantener la seguridad de la obra, pues el terreno era sumamente complicado. Por ello, todas las soluciones debían ir encaminadas a minimizar los riesgos debidos a las condiciones geotécnicas.

En base a los datos recabados en las exploraciones de campo, y con el fin de adoptar soluciones ingenieriles encaminadas a minimizar el riesgo de colapso, se decidió realizar una tramificación definiéndose dos niveles de peligro: bajo-medio y alto-severo.

Con base en esta nueva tramificación, y con el objetivo de minimizar los riesgos y daños ecológicos potenciales ocasionados al paisaje kárstico, cenotes, cuevas y cavernas, se decidió:

- Mantener la solución en terraplén en aquellas zonas en donde se tuviera un riesgo bajo.
- Sustituir la solución de terraplén por la de viaducto de baja altura en aquellas zonas en donde se tuviera un riesgo medio y alto.

- Proyectar dos saltos especiales en las cavernas Garra del Jaguar y Dos Amores, consideradas como las de mayores dimensiones.

Una vez realizada la tramificación anterior, la longitud de viaducto necesaria era de 40,6 km. Debido a la gran longitud de viaducto y a la presencia de varios consorcios constructores, la solución estructural debía buscar:

- Industrialización y facilidad constructiva.
- Minimización de riesgos debido a las condiciones geotécnicas.

La solución finalmente adoptada estuvo consensuada con las empresas constructoras puesto que sólo ellas podían asegurar que la solución planteada era viable en los ajustados plazos.

3. Descripción de la solución

En el momento de la redacción de proyecto no se contaba con la información geotécnica de toda la traza, pues la campaña geotécnica requería muchos meses para su desarrollo. Se consideró como viaducto tipo una solución modular que pudiera ser fácilmente adaptable a las condiciones que se fueran encontrando en la campaña geotécnica.

Se plantearon módulos hiperestáticos de 4 vanos de 17.5 metros cada uno (total 70 m entre juntas de dilatación) con elementos prefabricados apoyados sobre pilotes.

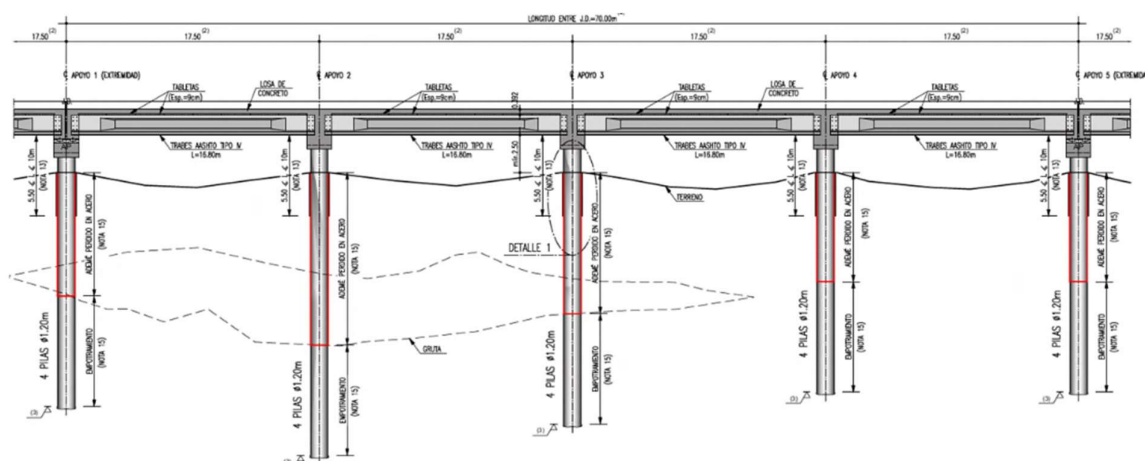


Figura 4. Alzado final de un módulo tipo (ejemplo subtramo C)

Superestructura

Con el objeto de diseñar los elementos más repetitivos posibles, facilitar la construcción y el control de calidad y ahorrar el máximo número de aparatos de apoyo sin disponer aparatos de vía, se optó por módulos continuos de 70 m de longitud formados por 4 vanos de 17.5 m entre ejes de pilotes y 6 vigas AASHTO tipo IV cada uno.



Figura 5. Vigas prefabricadas en parque

Las vigas, de 137.2 cm de canto, se montaban con grúa. Las vigas eran monolíticas

con la subestructura en las tres alineaciones de apoyos interiores mediante el hormigonado de una riostra in situ.



Figura 6. Vigas sobre apoyos temporales con ferralla de riostra preparada para el hormigonado

En las alineaciones de apoyo extremas las vigas se apoyaban mediante apoyos elastoméricos.



Figura 7. Apoyo en zona de junta

Para conformar la losa in situ se disponían previamente prelosas de 9 cm de espesor en celosía. La pendiente transversal de tablero es

constante del 2% a ambos lados del centro de la sección, desaguando a los bordes del tablero. Finalmente se disponía el paquete de vía sobre balasto.



Figura 8. Prelosas en celosía

Subestructura

Con el objeto de agilizar la construcción lo máximo posible, se diseñaron dos opciones para los capiteles que conformaban el nudo de unión entre el tablero y los pilotes:

- Cáscara prefabricada de hormigón
- Hormigonado in-situ

En el caso de la cáscara prefabricada, la subestructura estaba formada por un cabezal prefabricado sobre pilotes. El cabezal tenía 14.20 m de ancho en dirección transversal, y 2.30 m en dirección longitudinal en el caso de los ejes de junta. Para las pilas intermedias el cabezal se podía reducir a 13.90 m x 2.30 m. Una vez colocado el cabezal en su posición definitiva, se realizaba el hormigonado en segunda fase de su interior.

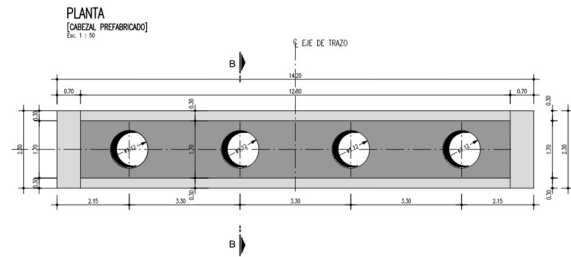
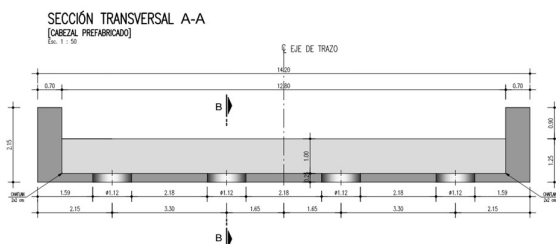


Figura 9. Planta y alzado del capitel prefabricado

En el caso del capitel prefabricado, el apoyo del mismo en el respectivo alineamiento de pilotes fue hecho por un sistema de vigas metálicas temporales.

Cimentación

Con los datos recibidos de los trabajos geotécnicos (sondeos a avance controlado y mixtos así como sus ensayos de laboratorio correspondientes), se pudo establecer que:

- El porcentaje de oquedades y cavernas es mayor en la parte superficial de acuífero, en la zona de agua dulce (15 a 20 metros de profundidad).
- Una vez superada la profundidad anterior, el porcentaje de oquedades es menor, entrando en la zona de agua salada.

Por este motivo, se propuso de forma general una cimentación profunda a base de pilotes encamisados en sus primeros metros. Esta camisa tenía una doble función:

- Por una parte, evitar el derrame de hormigón dentro del acuífero.
- Y por otra, asegurar la integridad estructural de los pilotes (corroborado mediante ensayos cross-hole en el porcentaje marcado por la normativa).

Una vez superada la zona de oquedades, la camisa era eliminada y se generaba las zonas de empotramiento entre el propio pilote y el terreno natural. Para el diseño del pilote, y con el objetivo de aumentar la seguridad del diseño ante un posible colapso, se decidió:

- Calcular el pilote por fuste (rozamiento) en esta parte profunda, despreciando el

fuste que se genera entre la propia camisa de acero y el terreno natural.

- Despreciar la resistencia por punta.

Esto dio lugar a pilotes profundos, cercanos a los 30 metros de longitud, quedándose las camisas de acero perdidos hacia los 20 metros de profundidad.

Estas soluciones han sido revisadas, validadas y en algunos casos se han visto modificadas por los condicionantes y zonas de protección arqueológicas revisadas con los especialistas del INAH.

Debido a la presencia de varios consorcios constructores, la cimentación es el único aspecto de diseño que cambia, pasando de 4 pilotes de 1.20 m de diámetro con separación de 3.30 m entre pilotes a 3 pilotes de 1.50 m de diámetro con separación de 4.70 m entre pilotes, dependiendo del caso.

4. Ventajas de la solución

La solución adoptada proporcionaba las siguientes ventajas:

- Fácil industrialización de vigas prefabricadas de igual luz en una gran longitud de proyecto, con el consiguiente ahorro de costes y facilidad constructiva para el montaje con grúa.
- Eliminación de aparatos de apoyo en un 60% debido a la unión monolítica entre tablero y pilotes en los ejes de apoyo intermedios.
- Se aprovecha el eje de apoyos de junta para disponer dos alineaciones de neoprenos sobre el mismo dintel, sin duplicar la subestructura.
- Puesto que la distancia entre pilotes era siempre constante (17.50 m), el constructor ejecutaba la excavación de los pilotes de manera simultánea a la fabricación de las vigas.
- La permeabilidad transversal hacia la fauna autóctona existente se ha visto

reforzada no solo por el mantenimiento de los pasos de fauna identificados en la MIA provisional en zona en terraplén, sino por el hecho que al desarrollarse el proyecto en más del 70% en estructura, se ha permitido el movimiento de los animales mediante aperturas de la malla de confinamiento ubicada a lo largo de los 67.7 km del tramo 5 Sur del Tren Maya.

5. Aspectos relevantes del diseño

Estudio de pilotes

Se definió un módulo tipo tal y como se ha descrito, sin embargo, la cimentación se definió pilote a pilote. La gran extensión de la zona kárstica bajo análisis indujo a un cálculo pormenorizado de cada uno de los pilotes en cuanto al refuerzo, encamisado y longitud. Es importante señalar que la variabilidad de cavernas y oquedades se da tanto en dirección longitudinal como en transversal por lo que dos pilotes de una misma alineación de apoyos (separados menos de 4 m) podían tener condiciones geotécnicas muy diferentes.

En primer lugar, se replantearon todos los pilotes puesto que la distancia longitudinal era siempre de 17.50 m. A continuación, se realizó un sondeo de avance controlado en cada posición de pilote. Este sondeo no extrae ningún testigo pues es un sondeo a destroza donde se mide la velocidad de perforación, de modo que si se encontraba una caverna se podía detectar. Los sondeos con extracción de testigo son más lentos de ejecutar y se realizaron en menos posiciones. Si al realizar los sondeos de avance controlado se detectaban cavernas de tamaño importante que pudieran invalidar la solución tipo adoptada, se planteaban soluciones alternativas. En caso contrario se procedía a la perforación de los pilotes.



Figura 10. Perforación de un pilote

El constructor realizaba las perforaciones y éstas se analizaban con cámaras de televisión de modo que se detectaban las oquedades y el nivel freático. En la figura adjunta se observa cómo aparecen oquedades a lo largo del pilote. Esta información era estudiada por el equipo geotécnico que definía, en todos los pilotes, las necesidades de encamisado, así como la longitud de los pilotes.

Tras este segundo análisis se podía concluir que la solución tipo no era viable. En ese caso se planteaban soluciones alternativas.

Se plantearon y diseñaron diversas soluciones alternativas:

- Losas in situ armadas para luces menores de 15 m para ajuste.
- Vanos de 25.0 m isostáticos formados por 6 vigas AASHTO VI.
- Vanos de 30 m formados por 8 vigas AASHTO VI.
- Vanos de 45.0 mixtos.

Todas las soluciones alternativas se componían para dar múltiplos de 17.50 m, de modo que la posición de pilotes en avance de línea no cambiara y el constructor pudiera seguir construyendo con independencia de las soluciones especiales requeridas. Por ejemplo, si era necesario un vano de 45.0 m de luz por una gran caverna se añadía un vano de 25.0 m, de modo que entre ambos sumaban 70 m, que es múltiplo de 17.5 m y los pilotes siguientes no cambiaban de posición.

Solución monolítica

Con el fin de reducir costes de estructura y de terraplén, la distancia desde la cara superior del carril a la superficie del terreno llega a ser muy pequeña, hasta de 4.5 m, aproximadamente.



Figura 11. Tramo de altura mínima

Debido esta cota de la rasante, la estructura corría el riesgo de ser excesivamente rígida con solo una pequeña porción del pilote entre la cara inferior del tablero y la cota del terreno. Por esta razón, se definió una longitud de sobre-excavación adicional donde el pilote aumentaba su altura libre, llegando en algunos casos a los 10.00 m de longitud entre la cara inferior de viga y la zona donde el pilote ya tiene contacto con el terreno.

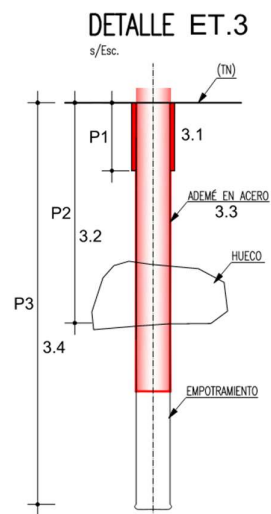


Figura 12. Esquema constructivo de un pilote



Figura 13. Pilote construido con sobre-excavación

De esta forma se dotaba de la necesaria flexibilidad adicional a una estructura muy sensible a los movimientos de reología y temperatura debido al monolitismo.

Por otro lado, las longitudes de los pilotes cambiaban longitudinal y transversalmente en cada módulo debido a las diferentes condiciones geotécnicas y geometría de las cavidades que aparecen en profundidad, sin embargo, la longitud libre anteriormente descrita es la misma en todos ellos.

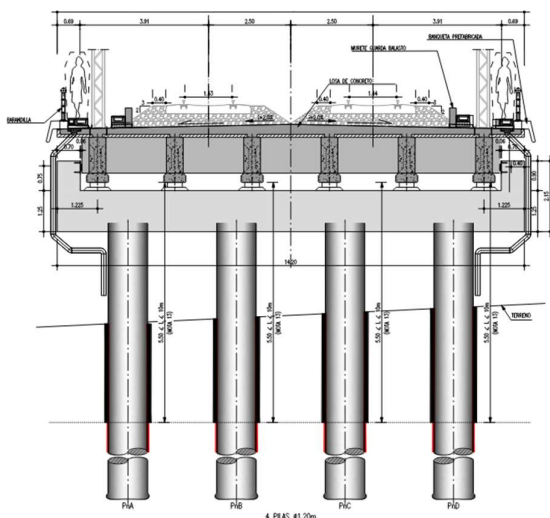
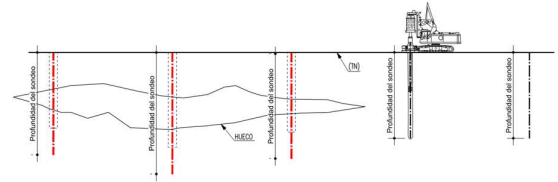


Figura 14. Alzado frontal con pilotes

6. Proceso constructivo

El proceso que se siguió fue:

- 1) Se ejecutan sondeos hasta el nivel de la punta del pilote.
- 2) Se realiza la perforación de los pilotes, se analizan todos los casos y se establecen las dimensiones de los huecos, el nivel de las capas freáticas, la extensión del encamisado y el tipo de armado.



- 3) Hormigonado y ensayo de pilotes.



Figura 15. Pilotes y capiteles

- 4) Construcción de capiteles, bien in situ o bien prefabricados.
- 5) Colocación de vigas mediante grúa



Figura 16. Colocación de vigas

- 6) Colocación de prelosas, ferrallado de losa y hormigonado.
- 7) Acabados



Figura 17. Trabajos en tablero



Figura 17. Vista aérea de la obra terminada