

Prefabricación en los Viaductos ferroviarios del Libramiento de Campeche

Use of precast elements in the railway Viaducts of Campeche By-Pass

Jordi Revoltós Fort^a, Miguel Ortega Cornejo^b, Zhang Liu^c, David Alcañiz Jiménez^d

^a Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de Disciplina Puentes y Viaductos. SENER jrevoltos@mobility.sener

^b Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Director General. TYLin miguel.ortega@tylin.com

^c Máster Ingeniero Civil. Jefe de Proyectos. SENER zhang.liu@mobility.sener

^d Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Jefe de Proyectos. TYLin david.alcaniz@tylin.com

RESUMEN

El Libramiento de Campeche es un proyecto de vía férrea perteneciente al Tramo 2 del Tren Maya. Los viaductos ferroviarios de este tramo (Viaducto de la Hoya, Viaducto UMAN y VDT 4044.1) destacan, principalmente, por el empleo de un gran número de elementos prefabricados, empleando los mismos no solo para el tablero (vigas) sino también en la subestructura (fustes, cabezales y dinteles en pilas tipo pórtico). Este hecho, acompañado de la uniformidad de soluciones y la simplicidad de los detalles de conexión entre elementos, permitió cumplir con los exigentes plazos de construcción.

ABSTRACT

Campeche By-pass is a railway project belonging to the Section 2 of Mayan Railway. The railway viaducts of this stretch (Viaducto de la Hoya, Viaducto UMAN y VDT 4+044.1) stand out, mainly, for the extensive use of precast concrete elements, which were used not only for the deck (girders), but also for the substructure (columns, hammerheads, and straddle bents). The prefabrication, as well as the uniformity of the solutions for different viaducts and the simplicity of the connections between elements, allowed the construction to meet a strict schedule.

PALABRAS CLAVE: ferrocarril, hormigón prefabricado, plazo, montaje con grúas, tableros isostáticos.

KEYWORDS: railway, precast concrete, schedule, lifting with cranes, simply supported deck

1. Introducción. Contexto general del proyecto

El Tren Maya constituye un servicio de transporte férreo de carga y pasajeros que interconecta las principales ciudades y zonas turísticas de la región sursureste de México, comunicando cinco de los estados con mayor potencial turístico dentro de la República mexicana.

Los estados de Chiapas, Tabasco, Campeche, Yucatán y Quintana Roo, estarán enlazados a través de 1451 km aproximadamente, de vías férreas. El

libramiento de Campeche pertenece al tramo 2 del proyecto del Tren Maya. Sin embargo, más de un año y medio después de iniciarse las obras y debido a diversas circunstancias de tipo social, se ha tenido que realizar una variante de 18.33km que rodea la ciudad de Campeche, en lugar de pasar por la zona urbana, como se tenía contemplado originalmente.

La exigencia del cliente de poder inaugurar este libramiento a la vez que el resto del tramo 2, ha condicionado un diseño que ha estado enfocado primordialmente en maximizar la rapidez de construcción. Este enfoque ha implicado la implementación de técnicas constructivas de prefabricación, optimizando procesos en cada etapa del proyecto.

2. Descripción de las estructuras

En este tramo especial del Tren Maya se encuentran tres viaductos principales, diseñados para superar obstáculos clave de la zona:

1. Viaducto “La Hoya”:

Este viaducto atraviesa un humedal protegido y tiene una longitud total de 1138.6 m,

distribuida en 38 vanos iguales de 30.0 m cada uno. La diferencia en la longitud de los vanos extremos permite que la longitud de las vigas sea uniforme a lo largo de todo el puente, optimizando su fabricación y montaje.

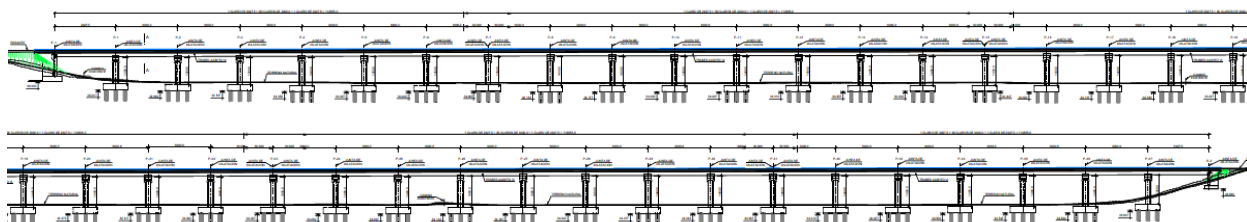


Figura 1. Alzado del viaducto La Hoya



Figura 2. Vista general del viaducto La Hoya

2. Viaducto “Uman”:

Este viaducto cruza un valle con un desnivel máximo de 27 metros. Su longitud total

es de 328.6 m, compuesta por 9 vanos iguales de 30.0 m y dos vanos extremos de 29.3 m cada uno.

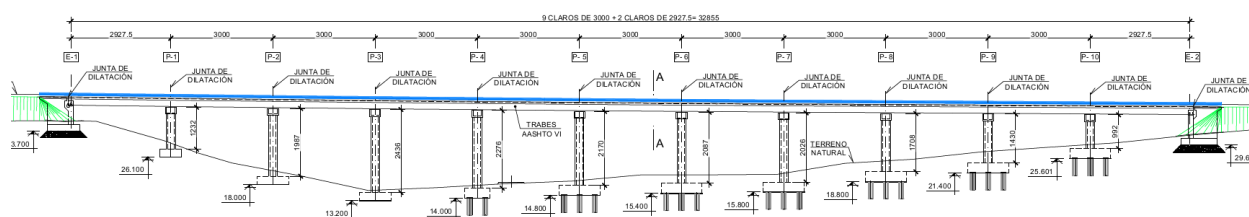


Figura 3. Planta y alzado del viaducto Uman



Figura 4. Vista general del viaducto Uman

3. Viaducto “4+044”:

Este viaducto cruza la carretera principal de la zona en un trazado con un esviaje pronunciado de hasta 70°. Tiene una longitud total de 179.6 m, dividida en 4 vanos de 30.0 m y dos vanos extremos de 29.3 m. Para salvar el esviaje, se diseñaron 5 pórticos postesados, con una luz máxima de 25.7 m.

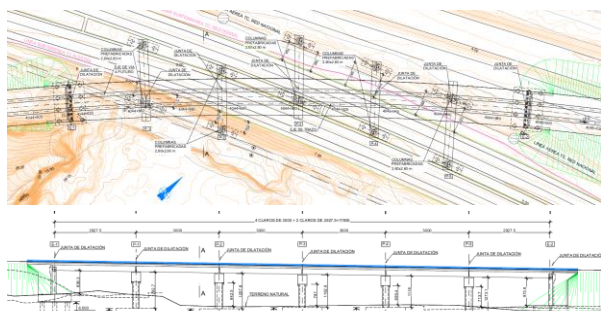


Figura 5. Planta y alzado del viaducto 4+044

Con el objetivo de optimizar los procesos de diseño, fabricación y montaje, se estandarizó la longitud de las vigas en 29.75 m para los 55 vanos de los tres viaductos. Esto permitió el uso de una única sección tipo en todos los vanos, reduciendo la complejidad del proyecto.

El tablero está formado por 8 vigas doble T de hormigón pretensado tipo “AASHTO VP”, con un canto de 1.83 m, y una losa de hormigón in-situ de 30 cm de espesor mínimo, ejecutada sobre prelosas prefabricadas, lo que permite materializar una sección de 14.20 m de ancho, capaz de alojar doble vía de ferrocarril (si bien inicialmente se instalará solo una de ellas). Esta configuración asegura la rigidez estructural y la durabilidad requerida para las condiciones operativas del tren.

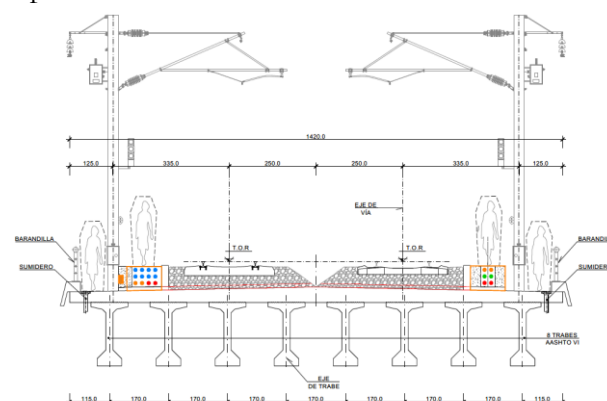


Figura 6. Sección tipo del tablero

Con objeto de transmitir de los esfuerzos longitudinales y transversales a las pilas, se han

dispuesto riostras en los apoyos extremos de cada vano.

El apoyo vertical del tablero en la subestructura se materializa mediante unos apoyos convencionales de neopreno zunchado. Horizontalmente, el tablero está retenido mediante topes, tanto transversales como longitudinales dispuestos en cada pila. Los topes longitudinales, materializados mediante perfiles metálicos embebidos en los cabezales de las pilas, permiten los desplazamientos reológicos y térmicos, pero actúan en situación de frenado y sismo, prácticamente eliminando las demandas de distorsión en los neoprenos verticales.

3. Prefabricación en la subestructura

Para maximizar la velocidad de ejecución, se optó por emplear la mayor cantidad posible de elementos de hormigón prefabricados. Esto incluyó componentes como los fustes de las pilas, capiteles, dinteles de los pórticos, vigas doble T, reduciendo significativamente los tiempos de ejecución.

En octubre de 2022 se inició el montaje del primer fuste, y dos meses más tarde, todas las pilas del primer viaducto de La Hoya de 36 vanos estaban completamente ejecutadas. Gracias a un diseño eficiente y una planeación detallada, se logró mantener un ritmo constante y alto de ejecución, alcanzando un promedio de un fuste montado por día.

3.1 Fustes y conexión con la cimentación

Cada pila está compuesta por dos fustes prefabricados huecos con geometría octagonal, con dimensiones exteriores de 2.60×2.60 m, chaflanes de 50 cm y espesor de tabla de 40 cm fabricados en el parque de prefabricación ubicado dentro del recinto de la obra. Una vez completados, los fustes se izan con dos grúas móviles, se colocan en posición vertical, se

alinean con precisión y se instalan sobre la cimentación. Finalmente, se inyecta lechada para garantizar la integridad estructural entre los fustes y la cimentación.

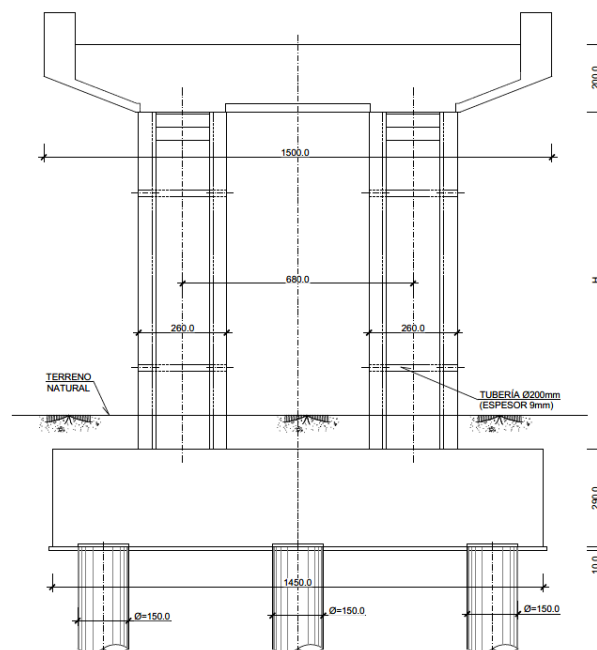


Figura 7. Alzado de la pila.

La solución de fuste prefabricado se aplicó a todas aquellas pilas cuyos fustes tuvieran alturas inferiores a los 14 m, con objeto de evitar pesos excesivos. Pese a ello, la prefabricación se aplicó a la totalidad de los apoyos del Viaducto de La Hoya y del Viaducto 4044.1 y a un 30% de los apoyos del Viaducto UMAN.

3.1.1 Diseño

La conexión estructural entre la cimentación y los fustes se realiza mediante 36 grupos de armaduras, cada uno compuesto por dos barras de acero pasivo: una barra de #12 (Ø38 mm) y otra de #10 (Ø32 mm), que sobresalen desde la base del fuste prefabricado. En la cara superior del encepado, se disponen 36 ductos de acero corrugado de Ø100 mm, embebidos y listos para la conexión in situ, garantizando una transferencia eficiente de cargas entre los elementos.

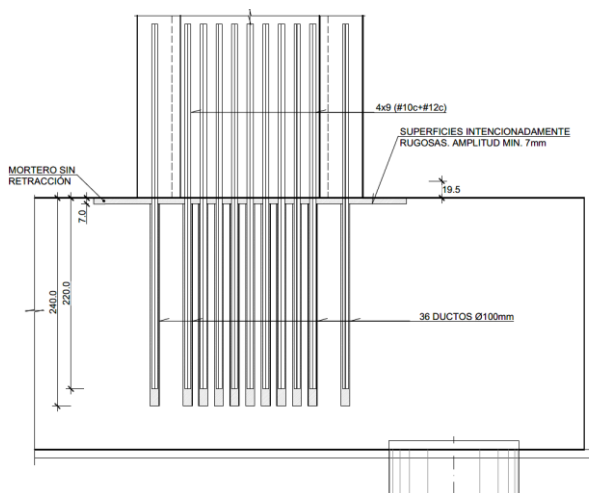


Figura 8. Armadura de conexión

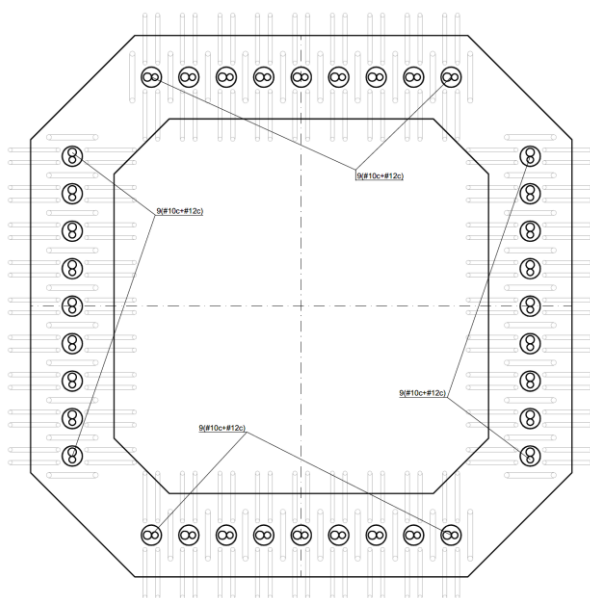


Figura 9. Planta de armadura de conexión

3.1.2 Ejecución

La instalación de los fustes prefabricados no requirió maquinaria adicional aparte de las dos grúas móviles. Estas mismas grúas se emplearon posteriormente para el montaje de los capiteles de las pilas y de las vigas doble T, también prefabricadas. Este enfoque permitió optimizar el uso de recursos y simplificar la logística en obra.

En cada fuste se dejan dos pasatubos embebidos para el izaje durante su fabricación. Durante la ejecución, cada grúa se encarga de levantar desde un bulón colocado en dichos

pasatubos, elevando el fuste a una cierta altura. Luego, una de las grúas continúa elevando el fuste por un extremo, mientras que la otra mantiene su posición inicial. De esta manera, el fuste se voltea de posición horizontal a vertical. Una vez que el fuste alcanza la posición vertical estable, se retira la grúa que sostiene el punto de izaje inferior, y la otra grúa lo traslada a su posición definitiva.



Figura 10. Iniciando de izaje



Figura 11. Posición final de izaje

Una vez que el fuste se sitúa en la posición de instalación, se desciende cuidadosamente hasta que todas las armaduras del fuste se introducen en los ductos de la cimentación. Es fundamental tener un replanteo muy cuidado de los ductos para evitar que cualquier elemento de conexión se dañe durante este proceso.

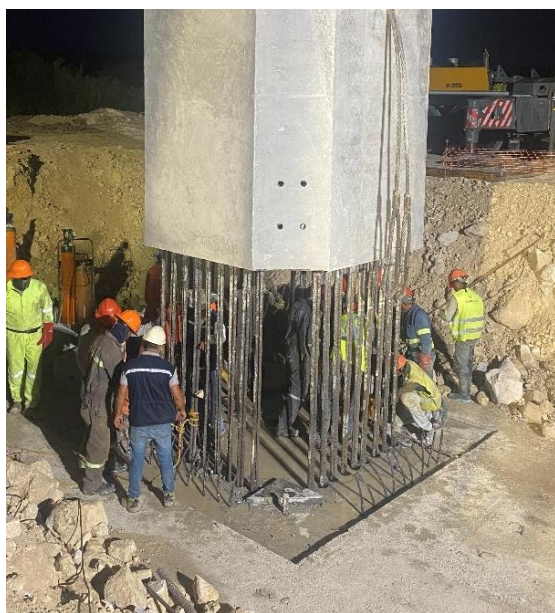


Figura 12. Instalación de fuste



Figura 13. Fuste pendiente de inyección

La ejecución de la conexión se realiza inyectando mortero sin retracción a través de las mangueras de inyección de forma que el llenado de las mismas se produzca de abajo a arriba y rebosando por el espacio existente entre columna y zapata.

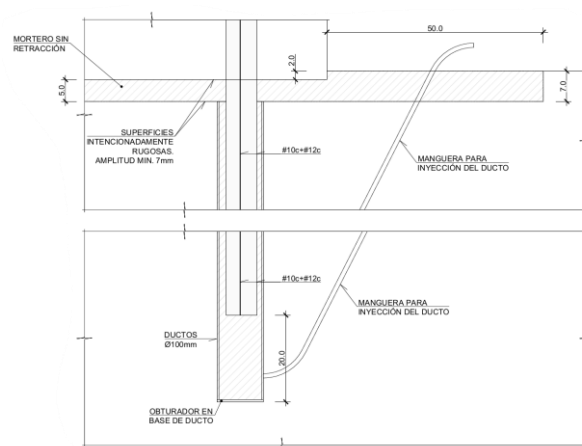


Figura 14. Detalle de inyección de conexión

3.2 Dinteles de pilas tipo

Los dinteles de las pilas tipo de los Viaductos de La Hoya y UMAN son elementos de 15 m de anchura con una sección transversal máxima de 2.00 m (canto) × 3.40 m (dimensión longitudinal). En este caso, a diferencia de los fustes, las elevadas dimensiones y peso de los dinteles impiden que puedan ser prefabricados en su totalidad.

Por tal motivo, y nuevamente con la finalidad de reducir al máximo los trabajos a realizar “in situ”, se optó por una solución de

cáscara prefabricada que hiciese las veces de encofrado colaborante para el relleno posterior de hormigón.



Figura 15. Capitel en parque de prefabricación

La sección tipo de la cáscara prefabricada es una “U” de 25 cm de espesor tanto en las almas como en la losa inferior, espesor que permite que la cáscara resista adecuadamente los esfuerzos de hormigonado. Los tapes laterales de la cáscara tienen un espesor de 92.5 cm, pues no solamente tienen la función de absorber los esfuerzos de hormigonado, sino que también recogen los armados locales de los topes transversales de las pilas.

Como se ha indicado anteriormente, la cáscara es un encofrado colaborante con el relleno de hormigón, lo que se consigue gracias a un tratamiento de rugosidad en sus caras internas, junto con la disposición de armados de conexión. La conexión final entre los fustes y el dintel se materializa mediante el armado en espera superior de los fustes que penetra en el dintel a través de unos huecos inferiores, de la misma geometría que el dintel, dejados en la cáscara.

Respecto de la ejecución y montaje de los dinteles, una vez ejecutada la cáscara se procedió al ferrallado del interior del dintel en suelo, de manera que los trabajos en altura quedaron reducidos al hormigonado del relleno. Una vez izada la cáscara y antes de materializar la conexión con los fustes mediante el hormigonado del relleno, la cáscara se apoya provisionalmente en unas ménsulas ejecutadas junto con los fustes prefabricados (Figuras 15 y 16).



Figura 16. Espera superior en fuste y capitel



Figura 17. Instalación del capitel

3.3 Dinteles de pilas pórtico

Como se ha mencionado en el apartado 2, el Viaducto 4044.1 consta de unas columnas tipo pórtico que permiten materializar los apoyos intermedios del tablero, evitando la autopista que discurre bajo él, llegando a tener estos pórticos una luz máxima de 25.7 m, medida entre ejes de fustes. Los fustes de las pilas pórticos se resolvieron, en todos los casos, mediante la solución de fustes prefabricados descrita anteriormente. Los dinteles, por su parte, se resolvieron empleando una solución semejante a la de los dinteles de las pilas tipo, si bien las luces tan relevantes que deben salvar obligaron a realizar unas adaptaciones específicas que los diferencian de los dinteles tipo.

La sección tipo de los dinteles es rectangular, con 3.40 m de anchura y 3.30 m de canto. Con objeto de reducir el peso del dintel y aumentar la eficacia del postesado, se han dispuesto unos aligeramientos rectangulares de porexpán de 1.95 m de canto y 2.20 m de ancho. Al igual que en los dinteles de las pilas tipo, estos dinteles se han ejecutado empleando una cáscara prefabricada colaborante de 25 cm de espesor tanto en losa inferior como en almas. La conexión con los fustes es, al igual que en las pilas tipo, monolítica, materializándose a través del armado en espera de los fustes prefabricados. De la misma manera, el carácter colaborante de la cáscara prefabricada se consigue mediante rugosidad de las caras interiores y armados de conexión.

Los dinteles son postesados, disponiéndose cables de pretensado únicamente en el hormigón in situ (la cáscara se diseñó para resistir los esfuerzos de peso propio del dintel únicamente con armadura pasiva). Existe una gran variabilidad en la definición del pretensado entre los diferentes pórticos, debido a las diferentes posiciones relativas tablero-fustes. No obstante, de manera general, se han definido dos familias de pretensado: una pseudo-horizontal discurriendo por la losa inferior del pórtico y una segunda parabólica moviéndose por las almas del dintel. En función del pórtico, se han empleado cables de 31Ø0.6" o 37Ø0.6".

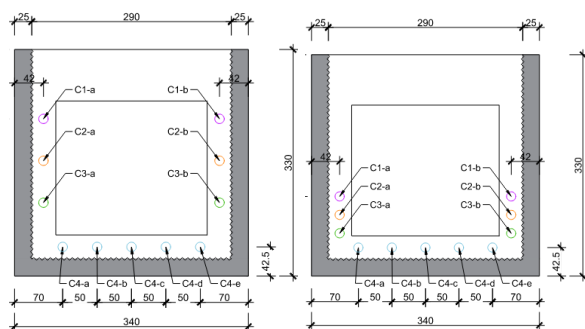


Figura 18. Disposición de las vainas de pretensado en los dinteles de las pilas pórtico

Todos los cables de pretensado discurren por toda la longitud del dintel, estando, por ello,

sus anclajes en los extremos del dintel. Para poder alojar las trompetas y refuerzos locales de los anclajes de pretensado, los tapes laterales de las cáscaras se han regresado hasta un espesor total de 75 cm. A diferencia de los dinteles tipo, en el caso de los pórticos, los topes transversales no forman parte de la cáscara prefabricada, sino que se ejecutan en una 3ª fase tras el hormigonado del relleno general del dintel y la colocación del tablero.



Figura 19. Detalle de anclajes de pretensado en cáscara prefabricada

La secuencia de montaje de los dinteles de estos pórticos es semejante a la de los dinteles de las pilas tipo. De hecho, para favorecer la homogeneidad de soluciones, se ha dispuesto en estos casos el mismo detalle de apoyo de la cáscara prefabricada en los fustes que en los demás viaductos. La principal diferencia es que, para los dinteles de los pórticos se optó por realizar el ferrallado una vez izado los fustes, para reducir el peso a izar.



Figura 20. Ferrallado del interior de los pórticos



Figura 21. Pórtico del Viaducto 4044.1 al finalizar las obras

4. Principales participantes en el proyecto y obra

Propiedad: Secretaría de Infraestructuras, Comunicaciones y Transportes (SICT) y Fondo Nacional de Fomento al Turismo (FONATUR). México.

Empresa Constructora: Mota-Engil México

Jefe de obra: Luis Teixeira

Jefe de oficina técnica: Carlos Frade

Proyecto Constructivo y Asistencia Técnica al Contratista durante la ejecución:

Consorcio SENER-TYLin: Jordi Revoltós, Zhang Liu, Miguel Ortega, David Alcañiz