

El viaducto mixto de Huixtla en la Línea K de México

The composite Huixtla viaduct on Línea K in Mexico

Miguel Ortega Cornejo^a, Fernando Ruano Parra^b, Enrique Bordó Bujalance^c, Carlos Colmenarejo Martínez^d y Bryan Barrantes Pérez^e

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

^b Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYLin. Director del Departamento de Puentes. fernando.ruano@tylin.com

^c Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYLin. Director del Departamento de Puentes. enrique.bordo@tylin.com

^d Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYLin. Ingeniero estructural. carlos.colmenarejo@tylin.com

^e Máster Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. TYLin. Ingeniero estructural. bryan.barrantes@tylin.com

RESUMEN

El viaducto de Huixtla es un viaducto ferroviario urbano de 3 km de longitud, perteneciente a la Línea K de México, proyectado por TYLin y construido por RECAL. Esta estructura, que discurre elevada sobre la ciudad de Huixtla (Chiapas) está compuesta por 84 vanos isostáticos mixtos de hormigón-acero de vigas “doble T” y losa superior de hormigón, apoyados en pilas de acero en sección cajón cerrado y cimentados al terreno por medio de encepados de pilotes de hormigón. La estructura se complementa con rampas de acceso al viaducto en cajón cerrado de hormigón y una pasarela peatonal adosada al tablero que salva el río Huixtla, todo ello en estructura de acero y mixta.

ABSTRACT

The Huixtla viaduct is a 3 km long urban railway viaduct belonging to the Línea K in Mexico, designed by TYLin and built by RECAL. This structure, which runs above the city of Huixtla (Chiapas), consists of 84 composite steel-concrete isostatic spans with I-girders and a concrete top slab, supported by steel columns in a closed box cross-section and founded by means of concrete pile caps. The structure is complemented with access ramps to the viaduct in a closed concrete box cross-section and a pedestrian footbridge attached to the deck that crosses the Huixtla River, all designed in steel and composite steel-concrete structures.

PALABRAS CLAVE: Viaducto urbano, viaducto mixto, subestructura metálica, diseño por capacidad

KEYWORDS: Urban viaduct, composite steel-concrete viaduct, steel substructure, capacity design

1. Definición general del viaducto

Dentro de la Línea K en México, línea ferroviaria que unirá los municipios mexicanos de Itepec (Oaxaca) y Ciudad Hidalgo (Chiapas), el viaducto de Huixtla es un viaducto urbano elevado sobre el municipio de Huixtla (Chiapas). Este viaducto, diseñado por TYLin, tiene una

longitud total entre pilas extremas de 3090 m (el de mayor longitud de toda la línea), repartidos en 84 vanos de longitudes comprendidas entre los 21 m y los 42 m, atravesando el municipio de oeste a sureste, salvando además el río Huixtla (Figura 1). El trazado en planta del viaducto es

idéntico al trazado de la vía ferroviaria en desuso existente, la cual discurría en superficie. Con ello, se reduce la afección que produce la vía y se mejora el aprovechamiento que el municipio puede hacer de esa superficie.

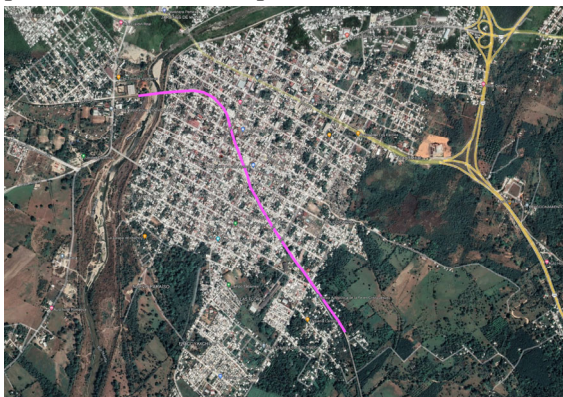


Figura 1. Trazado en planta del viaducto en Huixtla

El tablero mixto de acero-hormigón que sirve de estructura de la vía ferroviaria se apoya en pilas que en su mayor parte son de acero, de sección en cajón cerrado. Las pilas a su vez se conectan a través de anclajes activos a un encepado de hormigón, apoyándose en el terreno por medio de múltiples pilotes también de hormigón.

El viaducto discurre elevado dejando un gálibo vertical mínimo de 5.50 m cuando atraviesa el viario urbano, obteniéndose la cota de carril necesaria por medio de rampas en sección cajón cerrado de hormigón, situadas a ambos extremos del viaducto.

Para permitir el paso de los viandantes a ambos lados del río Huixtla, se dispone una pasarela metálica ligera, adosada al tablero del viaducto, a la cual se accede por sendas rampas también metálicas.

Por último, al haberse habilitado de nuevo la estación ferroviaria de Huixtla, ubicada en uno de los edificios históricos más reconocibles de la ciudad, se proyecta un andén elevado que permita la subida y bajada de viajeros.

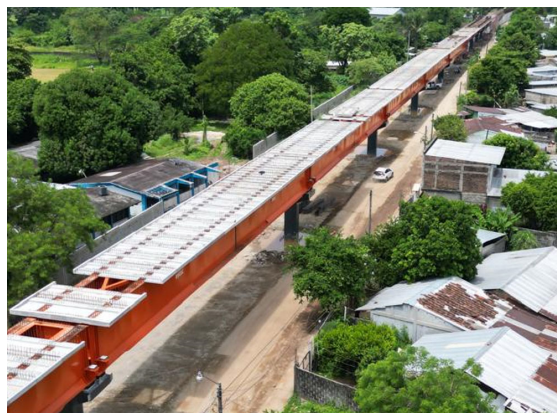


Figura 2. Vista general del viaducto en fase constructiva.

2. Situación previa, condicionantes de diseño y justificación de la solución

En su configuración preexistente, el trazado de la Línea K recorría a cota de suelo el núcleo de la ciudad de Huixtla de noroeste a sudeste, seccionando su tejido urbano en su zona de mayor densidad. Esta disposición, unida al desuso de la línea en los últimos años que ha abocado la vía a un estado de abandono significativo, daba lugar a una serie de particularidades que debían ser consideradas con especial atención de cara a la concepción preliminar del proyecto:

- Ocupación del derecho de vía e invasión de la traza actual:

En la mayor parte de la vía que discurría por Huixtla no se respetaba el ancho libre mínimo establecido por el Derecho de Vía (15m a cada lado), estando ocupado en gran medida por

edificios de carácter perenne. Más aún, la propia plataforma de vía está habitualmente invadida por instalaciones y puestos provisionales, generalmente de comercio ambulante (Figura 3). Este “modus vivendi”, permitido por la escasa frecuencia de trenes en los últimos años, estaba plenamente consolidado dentro de la dinámica vital de la ciudad, por lo que resultaba recomendable que la actuación de rehabilitación de la línea lo respetara en la medida de lo posible.

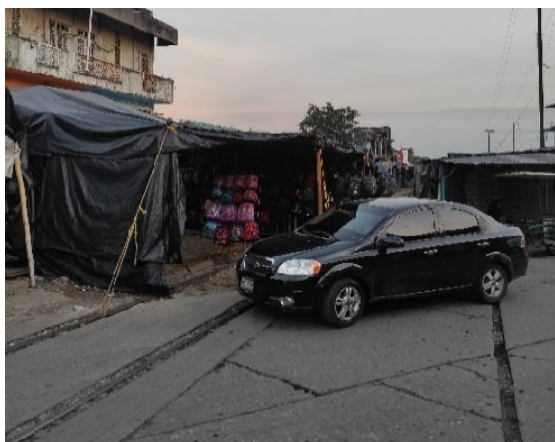
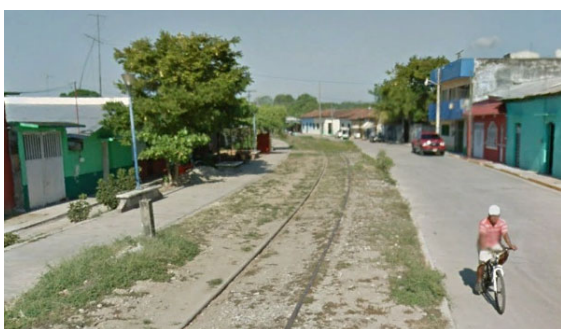


Figura 3. Estado actual de la vía existente.

- Pasos a nivel en el cruce de calles:

Al estar la línea a cota de terreno, cada intersección de las calles transversales con la vía del tren constituía un paso a nivel en el que tanto los viandantes como los vehículos transitaban sobre los propios rieles. En un contexto de recuperación del tráfico ferroviario en la línea, estos pasos a nivel suponían puntos extremadamente

peligrosos, particularmente en el caso de Huixtla donde tiene lugar un intenso flujo viario entre las dos partes de la población definidas por la vía, por lo que resultaba fundamental que la nueva solución del paso del ferrocarril pudiera mitigar este riesgo.

- Estado de conservación deficiente:

En general, la plataforma de la vía presentaba un estado de conservación extremadamente deficiente, con ausencia de traviesas y carencia de balasto (o presencia de balasto contaminado) en muchas zonas o inexistencia de un sistema de drenaje longitudinal y transversal adecuado.

- Situación del puente original sobre el río Huixtla:

El paso sobre el río se resolvía por medio de un puente en celosía metálica de tres (3) vanos de unos cien años de antigüedad, que servía originalmente a la vía ferroviaria y que actualmente había quedado relegado a un uso meramente peatonal. El estado de deterioro severo, así como la incapacidad de la estructura original para hacer frente a los nuevos requisitos técnicos y normativos requeridos en el proyecto, hacían inviable su reparación con un coste económico razonable. Esto, aparejado a la necesidad de resolver los problemas urbanísticos que conllevaba la actuación del proyecto en su globalidad, hacía aconsejable su desmantelamiento y sustitución por una estructura de nueva factura adecuada a las exigencias actuales.

- Plazos muy reducidos:

Uno de los condicionantes más limitantes es la necesidad de que los plazos de elaboración del proyecto y de ejecución fuesen lo más reducidos

posible, con la intención de poder poner en funcionamiento cuanto antes toda la línea ferroviaria, y en el caso concreto del viaducto de Huixtla, para reducir al máximo las afecciones al municipio provocadas por las obras de construcción.

En virtud de la anterior, se concluyó como solución más adecuada la construcción de un viaducto elevado siguiendo el trazado en planta original. Esta opción satisfacía los principales aspectos urbanísticos que imponía el contexto existente:

- Permite el paso del ferrocarril por la ciudad de un modo seguro, planteando la supresión de pasos de nivel y evitando el solape de espacio ferroviario en servicio con el entorno urbano utilizado por la población.
- Proporciona permeabilidad de paso a través del trazado, de modo que la población no quede fragmentada en dos partes separadas por la vía férrea.
- Afecta lo menos posible al actual tejido urbano de la ciudad que ha invadido, en numerosos lugares, el Derecho de Vía e incluso la propia plataforma.
- Habilita un nuevo espacio para la comunidad (unos 18000 m² bajo la sombra del viaducto) que será aprovechado para un uso urbanístico peatonal.

Amén de las ventajas urbanísticas mencionadas, desde una perspectiva técnico-estructural la solución desarrollada presenta las siguientes bondades particularmente relevantes en las circunstancias concretas de Huixtla:

- El recurso a tableros metálicos mixtos permite una mayor longitud de vano merced a su mayor ligereza, lo que reduce el número de pilas y cimentaciones frente a otras posibles estructurales de hormigón más pesadas.

Esto es particularmente relevante en un entorno urbano como el de Huixtla, ya que se minimiza al máximo la afección de la estructura sobre la ciudad al disminuir el número de apoyos sobre el suelo.

- Asimismo, estas estructuras mixtas acero-hormigón son particularmente eficientes en emplazamientos de elevadísima sismicidad como el de Huixtla consiguiendo, por su carácter más liviano, una mayor optimización de las cimentaciones.
- El empleo de una superestructura prefabricada (tanto el tablero metálico ejecutado en taller como las prelosas prefabricadas) permite un proceso constructivo de gran celeridad y medios auxiliares poco invasivos al recurrir a un montaje con grúas, y al permitir la ejecución simultánea del tablero en taller con la construcción in situ de la subestructura. Esta rapidez es especialmente agradecida en entornos urbanos, ya que disminuye el tiempo de exposición del vecindario a los inconvenientes de la obra (ruido, suciedad...) y puede habilitar, en escaso tiempo, espacios para el uso de la comunidad.

3. Descripción de los distintos elementos del viaducto

3.1 Tablero

El tablero del viaducto está formado por 84 vanos, utilizando cuatro longitudes de vano tipo: 21 m, 30 m, 36 m y 42 m, ajustándose en función de los requerimientos urbanísticos de cada situación para permitir los distintos cruces con el viario rodado. La sección transversal tiene 5.80 m de anchura, alojando una única vía ferroviaria sobre balasto, completándose la

sección con dos muretes guardabalasto y de barandillas de seguridad en los extremos (Figura 4).

El trazado del viaducto en planta tiene tramos rectos y tramos curvos; todos los vanos se proyectan con las vigas totalmente rectas, por lo que los ejes de los tableros, así como sus bordes formarán una línea poligonal, de modo que la configuración poligonal del tablero se adapte al trazado curvo en planta variando la posición del eje de la vía dentro de la sección transversal. Ello conlleva que los muretes guardabalasto se tengan que ir adaptando a las curvas, y con objeto de dejar siempre una zona de paseo peatonal de mantenimiento a cada lado con una anchura mínima, la anchura del tablero deba ser mayor en estos vanos (mayor anchura a menor radio de la curva).

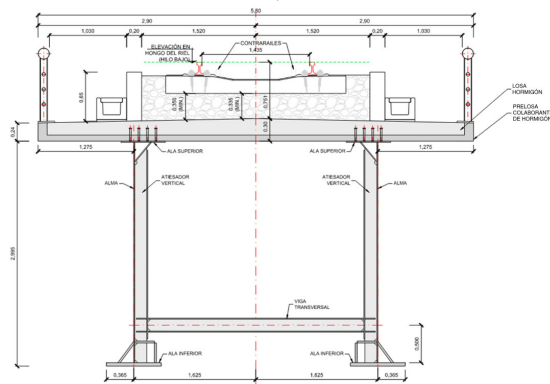


Figura 4. Sección transversal tipo del tablero e imagen inferior de este durante su ejecución.

Cada uno de los vanos son isostáticos; están resueltos con una solución mixta acero-hormigón, compuestos por dos vigas de acero

“doble T” y losa superior de hormigón. Los vanos de 21 m tienen un canto de 1.50 m, y se localizan en los extremos del viaducto, a las afueras de la ciudad. El resto de las longitudes de vanos tienen un canto homogéneo de 3.00 m, sin perjuicio de la longitud de los vanos, con miras a tener una continuidad formal del alzado del viaducto en su recorrido netamente urbano. La solución está inspirada en los viaductos proyectados por TYLin en el Tramo 1 del Tren Maya de México [1].

Los vanos tienen mamparos de alma llena en los apoyos, los cuales a su vez disponen de ménsulas laterales para poder realizar un apoyo invertido en caso de producirse una situación de vuelco del tablero; por otro lado, el mamparo dispone de un hueco central donde poder alojar el tetón de la pila que hace de tope transversal. Una viga transversal dispuesta en un plano horizontal y conectada a las vigas en el extremo inferior del alma forma el tope longitudinal del tablero, transmitiendo su carga al tetón de la pila (Figura 5).



Figura 5. Mamparo de apoyo del tablero.

La losa del tablero tiene un canto máximo en el eje de la sección de 30 cm, y se ejecuta en dos fases: disposición inicial de prelasas nervadas prefabricadas de hormigón armado y posterior hormigonado del resto de la sección. Entre vanos se deja una junta longitudinal, por lo que no hay continuidad longitudinal entre vanos en ningún punto de los mismos.

La conexión entre la losa de tablero y las vigas de acero se materializa por medio de

pernos conectadores soldados al ala superior de las vigas, agrupados y ubicados de tal manera que coincidan con unos huecos preparados en las prelosas para que pueda materializarse dicha conexión (Figura 6).

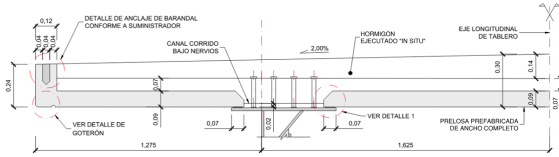


Figura 6. Detalle de conexión entre losa y viga.

El tablero dispone de cuatro juegos de apoyos, todos ellos de neopreno zunchado: apoyos verticales, en funcionamiento durante la inmensa mayor parte del tiempo, apoyos del tope transversal, apoyos del tope longitudinal y apoyos del tope antivuelco, entrando en funcionamiento estos tres últimos juegos de apoyos únicamente cuando las fuerzas laterales, longitudinales o el momento de vuelco los activan.

3.2 Pilas

Los vanos isostáticos se apoyan todos ellos en pilas monofuste, siendo en su inmensa mayoría metálicas con excepción de algunos casos concretos en los que se recurre a pilas de hormigón.

Las pilas metálicas están compuestas de tres elementos principales: el fuste, el cabezal y la basa de anclaje. El fuste tiene una sección transversal en cajón cerrado de 1.30×1.05 m, con un alma central en la dirección longitudinal. La acción sísmica en la zona es muy elevada (aceleración espectral en meseta de 1.5g), por lo que adoptar un criterio de diseño elástico de las pilas no era viable con unas dimensiones de columna convencionales. Por este motivo, se recurre a un diseño sísmico fundamentado en desplazamientos con una filosofía de protección por capacidad de los elementos estructurales adyacentes a las rótulas plásticas previstas en base del fuste.

En la coronación del fuste se encuentra el cabezal, un elemento también de acero en

sección cajón rigidizado de múltiples almas que genera la superficie necesaria para albergar los cuatro apoyos verticales de los dos extremos de vanos que se apoyan en él. En la coronación del cabezal se sitúa también el tetón de pila, elemento que recibe las fuerzas transversales y longitudinales provenientes del tablero y las transmite al resto de la pila.

El anclaje del fuste a la cimentación se realiza por medio de una doble basa rigidizada de acero, la cual se introduce en un cáliz habilitado en el encepado de hormigón a tal fin. Estas barras roscadas de 75 mm de diámetro se encuentran embebidas en el encepado y, una vez se sitúa en posición la basa (enhebrando esta a través de las barras) se van pretensando las barras por turnos hasta dejar la pila totalmente instalada en la cimentación. Las celdas interiores de la basa por donde discurren las barras de anclaje se rellenan con mortero fluido sin retracción, para proteger las mismas frente a la corrosión. La coronación de la basa se hormigona también para protegerla asimismo frente a la corrosión y los efectos de la exposición a la intemperie (Figura 7).

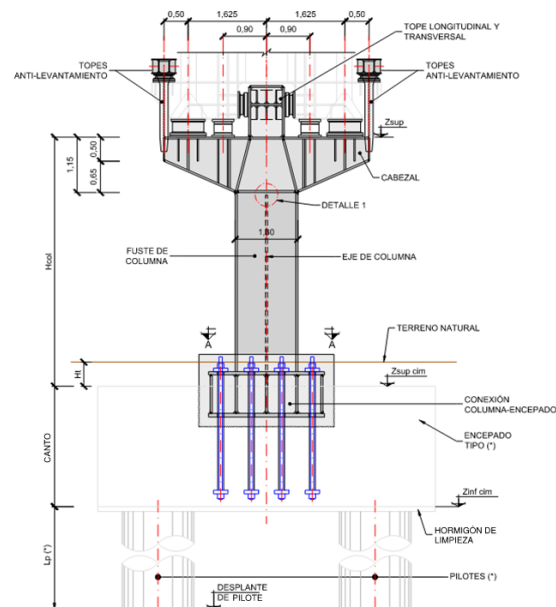




Figura 7. Alzado e imagen de pila metálica tipo durante su ejecución.

Habida cuenta de que la mayor parte de las pilas responden a unas necesidades dimensionales constantes a lo largo del viaducto, en general las pilas son prefabricadas en acero, a excepción de tres casos concretos, en los que los condicionantes geométricos difieren notablemente del patrón geométrico tipo: pilas bajas del extremo frontal y dorsal del viaducto; pilas a las que concurren vanos con cantos distintos (llamadas pilas de transición); y las pilas que soportan los vanos que salvan el río Huixtla. Además de esta necesidad geométrica, las pilas del río son las más propensas a padecer problemas de corrosión al estar sometidas a ciclos alternos de inmersión y de exposición aérea debidas al régimen de crecidas fluviales variables a lo largo del año. Esta circunstancia refuerza la elección del hormigón en estas columnas.

La cimentación de las pilas se realiza por medio de pilotes de 1.50 m de diámetro y longitud variable en función del terreno, entre los 10 y los 30 m de profundidad, necesarios principalmente para resistir las grandes fuerzas horizontales a los que se ve sometida la estructura en situación de proyecto de sismo. Los encepados, de entre 4 y 12 pilotes en función

de la pila y con cantos variables entre los 2.00 y los 3.00 m, disponen de un cáliz rectangular central en su cara superior para albergar la basa de anclaje de la pila; una vez se instala esta y se tesan los anclajes el cáliz se rellena el hueco restante con mortero fluido sin retracción.

3.3 Rampas de acceso

El trazado del viaducto se encuadra dentro del contexto del resto de la línea ferroviaria, la cual se encuentra en su inmensa mayoría a la misma cota del terreno. Es por ello que si se desea que a su paso por Huixtla el viaducto permita un gálibo vertical de al menos 5.50 m, la cota del carril debe situarse aproximadamente a unos 9.50 m sobre la cota del terreno. La pendiente longitudinal máxima permitida es del 1.5%, y puesto que no es económicamente viable adquirir esta cota con más tramos de viaducto, se decidió alcanzar esta a través de una rampa de acceso, la cual permitiese a la vía ir ganando altura hasta que comenzase a ser necesario disponer de viaducto y no de una rampa de acceso.

La opción de que la rampa se ejecutase por medio de un terraplén se descarta por la ocupación horizontal del terreno que sería necesaria, por lo que se barajó recurrir a estructuras tipo muro de contención en “U”, con un relleno interior de tierras, o hacer una sección en cajón cerrado. Debido a la gran magnitud de la fuerza de sismo, que generaría una gran fuerza inercial y comprometería la verificación del vuelco del muro en “U”, esta solución solo se aplica en los casos de alturas de muro moderadas (menores a 2.50 m), a partir de la cual se recurre a la sección en cajón cerrado de hormigón. Esta solución consiste en una zapata corrida, muros laterales y una losa idéntica a la utilizada en el viaducto, reforzando la idea de querer homogeneizar y prefabricar el máximo de elementos posibles. Para la transmisión de fuerzas transversales se disponen diafragmas intermedios, y se habilita un paso peatonal a través de la rampa, intentando reducir al mínimo

el obstáculo que genera disponer una rampa (Figuras 8 y 9).

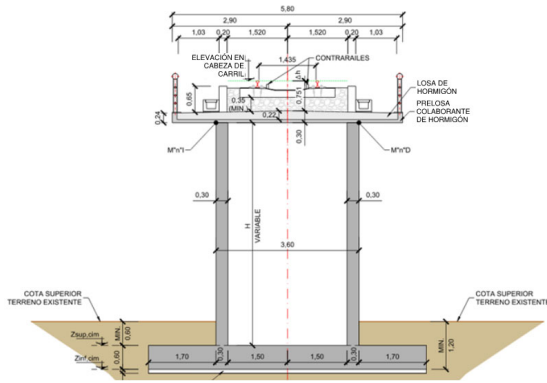


Figura 8. Sección tipo del cajón de la rampa



Figura 9. Imagen del cajón durante la ejecución del tramo de unión entre rampa y tablero.

3.4 Pasarela peatonal sobre el río

Como se ha comentado anteriormente, se prevé la demolición del antiguo puente sobre el río Huixtla, actualmente de uso exclusivamente peatonal. Al eliminarse este, se eliminaba la única manera que tenían los viandantes de cruzar entre ambas márgenes del río, por lo que se decidió proyectar una pasarela que hiciese la misma función que tenía el antiguo puente sobre el río.

La solución consiste en materializar una pasarela ligera metálica adosada al tablero, siendo la sección transversal de la pasarela dos vigas de perfil laminado sobre las cuales se apoya una chapa de acero antiderrapante que sirve de superficie de tránsito. El tablero de la pasarela se cuelga de la estructura principal a través de unas costillas transversales que se apoyan a su vez en

las alas inferiores de las vigas principales del viaducto por medio de una solución atornillada. Estas costillas transversales se disponen coincidentes con los diafragmas intermedios del tablero, existiendo además entre las alas inferiores del tablero y las vigas de la pasarela un plano de diagonales que arriostran la solución frente a acciones horizontales (Figura 10).

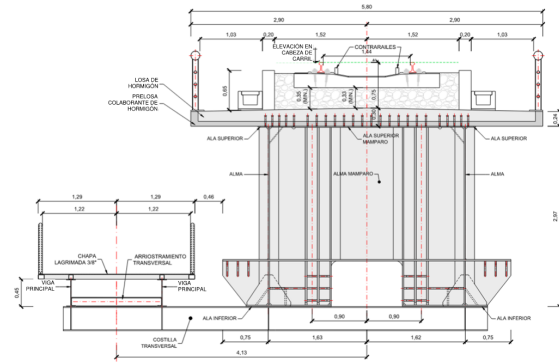


Figura 10. Sección transversal del tablero del viaducto y la pasarela, en la zona de apoyo.

Para acceder a la cota requerida, la pasarela cuenta con dos rampas de acceso a ambos lados de esta, con la misma sección transversal, apoyadas en pilas también metálicas que se unen por medio de anclajes a una cimentación pilotada monofuste de hormigón armado. El trazado de las rampas de acceso a la pasarela se ha adaptado para ajustarse lo mejor posible a los requerimientos arquitectónicos del entorno (Figura 11).



Figura 11. Infografía mostrando las rampas de acceso a la pasarela, en conjunción con el viaducto

4. Conclusiones

En el cuerpo de este artículo se recoge una explicación de la razón de ser del nuevo viaducto de Huixtla dentro en el contexto del macroproyecto de rehabilitación de la Línea K en México, así como una descripción sucinta de las principales características técnicas de su estructura.

La integración de este viaducto elevado en la ciudad de Huixtla ha permitido resolver los principales problemas técnicos y urbanísticos que planteaba el recorrido original de la línea férrea a nivel de suelo por una zona densamente urbanizada, dentro de un contexto extraordinariamente exigente de plazos de proyecto y de ejecución. En concreto, la solución desarrollada:

- Permite el paso del ferrocarril por la ciudad de un modo seguro al suprimir numerosos pasos a nivel.
- Proporciona permeabilidad de paso a través del trazado evitando la fragmentación de la ciudad.
- Afecta lo mínimo posible al actual tejido urbano de la ciudad que había invadido el Derecho de Vía e incluso la propia plataforma.
- Habilita un nuevo espacio para uso comunitario bajo la sombra del viaducto.
- Reduce el número de pilas y cimentaciones al recurrir a tableros metálicos mixtos que hacen posible una mayor longitud de vano merced a su mayor ligereza frente a otro tipo de soluciones. Esta circunstancia ha sido además particularmente relevante en el contexto de elevadísima sismicidad de Huixtla.
- Hace posible un proceso constructivo de gran celeridad con medios auxiliares poco invasivos (grúas) gracias a la simultaneidad de la fabricación del

tablero en taller con la construcción in situ de la subestructura.

Agradecimientos

Queremos agradecer a la empresa RECAL, contratista principal y taller metálico encargado de la realización de los elementos de acero estructural del viaducto, así como a la Secretaría de Marina de México (SEMAR), por su confianza en el equipo de TYLin para llevar a cabo este proyecto.

Referencias

- [1] M. Ortega, P. Atanasio, J. Ugarte, A. Suz, Urban Viaducts at Section 1 of the “Tren Maya” railway, Eurosteel Amsterdam, 2023.