

Tres grandes viaductos mixtos en el tramo 1 del tren maya: Tenosique, Candelaria y Escárcega

Three large composite viaducts on Section 1 of the Mayan Train: Tenosique, Candelaria, and Escárcega.

Miguel Ortega Cornejo^a, Pedro Atanasio Utrilla^b, Jokin Ugarte González^c y Alberto Suz Maroto^d

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

^b Máster Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin. Jefe de proyectos senior. pedro.atanasio@tylin.com

^c Máster Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin. Jefe de proyectos senior. jokin.ugarte@tylin.com

^d Máster Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin. Jefe de proyectos. alberto.suz@tylin.com

RESUMEN

Los viaductos urbanos del Tramo 1 del Tren Maya, ubicados en Tenosique, Candelaria y Escárcega, consisten en una sucesión de vanos de 40 m de luz, hasta alcanzar unas longitudes de 2920 m, 990 m y 1080 m respectivamente. El diseño elegido ha sido el de un tablero bijácena mixto isostático, mediante vigas metálicas conectadas a una losa superior de hormigón. Esta tipología permite la optimización de la producción, mediante la estandarización y la construcción en paralelo en varios frentes del viaducto. Estas estructuras se encuentran ubicadas en una zona de alta sismicidad, por lo que las pilas han sido diseñadas para disipar fuerzas mediante rótulas plásticas.

ABSTRACT

The urban viaducts of Section 1 of the Mayan Train, located in Tenosique, Candelaria, and Escárcega, consist of a succession of 40-m spans, reaching lengths of 2920 m, 990 m, and 1080 m, respectively. The chosen design is an isostatic composite twin-girder deck, comprising steel beams connected to a concrete upper slab. This typology enables production optimization through standardization and parallel construction across multiple sections of the viaduct.

These structures are located in a high-seismicity area, so the piers have been designed to dissipate forces through plastic hinges.

PALABRAS CLAVE: viaducto, ferrocarril, mixta, acero, hormigón, isostático, urbano, Maya.

KEYWORDS: viaduct, railway, composite, steel, concrete, urban, simply-supported, Maya.

1. Introducción

El Tren Maya es una de las obras ferroviarias más emblemáticas de reciente finalización en México. Tiene una longitud total de más de 1500 km divididos en 7 tramos de algo más de 200 km.

El tramo 1 discurre entre los municipios de Palenque (Estado de Chiapas) y Escárcega

(Estado de Campeche), con una longitud total de 226.5 km. En este tramo existen varias estructuras importantes, entre las que destacan los tres viaductos más largos del sistema ferroviario interurbano (Figura 1), con una

longitud total de viaducto de 4990 metros distribuidos de la siguiente manera:

- Viaducto de Tenosique: 2920 m.
- Viaducto de Candelaria: 990 m.
- Viaducto de Escárcega: 1080 m.

Los tres viaductos permiten el paso elevado del ferrocarril en las zonas que discurren por las ciudades de Tenosique, Candelaria y Escárcega (que dan nombre a cada uno de los viaductos), eliminando así la barrera que supone la antigua línea ferroviaria a nivel existente, cuyo trazado en la zona urbana coincide con el del nuevo Tren Maya.



Figura 1. Ubicación de los viaductos.

Por tanto, los viaductos urbanos tienen un importante carácter social al conseguir la permeabilidad de la línea ferroviaria y, por tanto, garantizar la continuidad de las calles, las zonas peatonales y los espacios urbanos en general y; en definitiva, aumentar la seguridad y el bienestar de los ciudadanos (Figura 2). Por todo ello, la estética tiene un papel importante en el diseño de los viaductos, con el objetivo de crear espacios urbanos de calidad en el entorno de la estructura ferroviaria.



Figura 2. Vista renderizada de los espacios urbanos circundantes a los viaductos.

El otro punto clave en el diseño ha sido la facilidad y rapidez de construcción, con el fin de garantizar el plazo de ejecución de una longitud tan grande de viaductos.

En este contexto, IDEAM (ahora TYLin) ha sido responsable del desarrollo del diseño en todas las fases del proyecto, Anteproyecto y Proyecto Constructivo, y ha prestado Asistencia Técnica a la empresa constructora durante el desarrollo de la obra.

2. Descripción de los viaductos

2.1 Descripción del tablero

La solución estructural adoptada para los viaductos urbanos consiste en una sucesión de vanos simplemente apoyados de tipo mixto (Figuras 3 y 4), con una luz típica de 40 metros, debido a sus ventajas en fabricación y construcción (como se describe en la sección 4 de este artículo).



Figura 3. Sucesión de múltiples vanos simplemente apoyados.

Esta solución se inspira en los viaductos ferroviarios mixtos de "Archidona" [1] y "Arroyo las Piedras" [2], también diseñados por IDEAM (actualmente TYLin), con la principal diferencia de que esos viaductos tienen vanos continuos en lugar de simplemente apoyados.



Figura 4. Vista general de los vanos mixtos simplemente apoyados.

La superestructura de los viaductos está formada por un tablero mixto cuya sección transversal está compuesta por dos vigas gemelas de acero y una losa superior de hormigón (Figura 5).

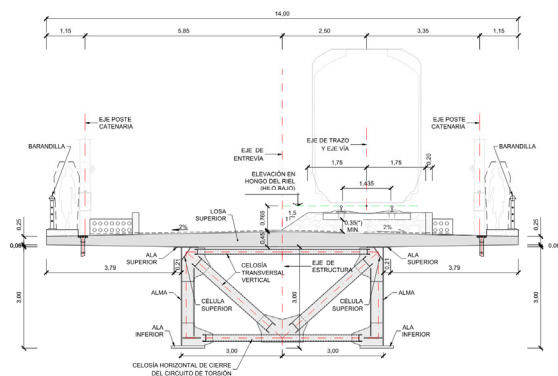


Figura 5. Representación de la sección transversal del tablero.

En cuanto a la estructura de acero, las vigas tienen una altura de 3 m y están separadas 6 m entre sí. Ambas vigas están conectadas mediante cuatro celosías verticales intermedias para reducir la deformación de la sección. Además, el circuito torsional se cierra en el plano inferior de la sección mediante un arriostramiento horizontal en celosía. Finalmente, en los extremos de las vigas, se disponen unos diafragmas metálicos que transfieren las cargas a los apoyos. En la Figura 6 se muestran de manera general todos los elementos que componen la estructura metálica.

La losa superior de hormigón armado tiene un espesor de 0.45 m en el eje central y de 0.25 m en los bordes. La losa está conectada a las vigas de acero mediante pernos conectadores, utilizándose como cabeza de compresión de la sección mixta. Dado que la losa trabaja

principalmente a compresión, los requerimientos de refuerzo longitudinal se reducen al mínimo.



Figura 6. Elementos de la estructura de acero.

El ancho de la losa es de 14 m para alojar dos vías férreas; sin embargo, en los primeros años de operación, los viaductos tendrán solo una vía, por lo que el diseño considera ambas situaciones de servicio: dos vías o solo una, con el respectivo incremento de la excentricidad de las cargas.

Con la configuración descrita y con una limitación de ancho máximo en la estructura metálica de 6,60 m, para que fuera transportable por carretera, se consiguió reducir el peso metálico del vano de 40 m a menos de 130 t, unos 231,6 Kg/m². Alcanzándose cuantías similares a las de una solución en tablero continuo.

2.2 Descripción de la subestructura

Los viaductos están situados en una zona de alta sismicidad, lo que influye significativamente en el diseño de la subestructura, desarrollado mediante un análisis por capacidad y desplazamiento, que se detalla en la sección 3 de este artículo.

Las columnas son de hormigón armado y constan de un único fuste con sección transversal rectangular maciza y esquinas

achaflanadas, sobre el cual descansa un cabecero que soporta las vigas de acero gemelas (Figura 7).

Las cimentaciones son superficiales o profundas dependiendo de las características geotécnicas de cada ubicación. La altura máxima de las columnas es de 15 m, con una altura promedio de entre 5 y 5.5 m.



Figura 7. Vista general de la columna.

Las vigas de acero están apoyadas sobre apoyos elastoméricos zunchados. Las fuerzas horizontales de cada vano son soportadas por las columnas aledañas a través de topes de acero longitudinales y transversales en cada extremo del vano, que reaccionan contra un dado de hormigón armado situado en el centro del cabecero (Figura 8).

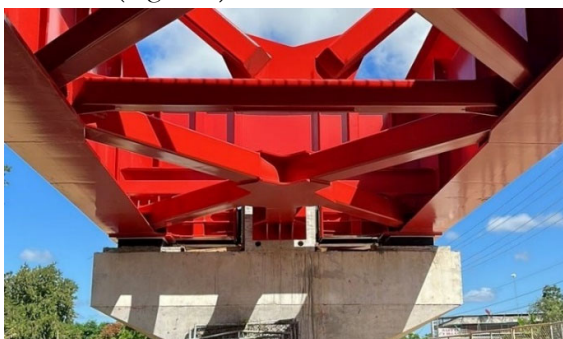


Figura 8. Topes de acero longitudinales y transversales.

2.3 Particularidades de cada viaducto

Como se indicó al inicio de este artículo, la solución estructural descrita es común a los tres viaductos. Sin embargo, cada viaducto presenta algunas particularidades.

La principal diferencia entre los viaductos radica en el número de vanos y la longitud total, como se resume a continuación:

- Tenosique: consta de 72 vanos con una longitud total de 2920 m.
- Candelaria: tiene 25 vanos con una longitud total de 990 m.
- Escárcega: abarca 27 vanos con una longitud total de 1080 m.

Los tres viaductos están ubicados principalmente en zonas con trazados rectos, aunque hay dos curvas en Tenosique y una en Escárcega, todas ellas con un radio mínimo de 1100 m.

Además, el viaducto de Candelaria cruza el río Candelaria en los primeros vanos de la estructura. En esta zona, el viaducto cuenta con dos vanos de 35 metros de longitud y una pasarela peatonal (Figura 9). La pasarela está apoyada en unas vigas transversales colgadas de las vigas principales del viaducto en los tramos en los que éste que cruza el cauce del río.



Figura 9. Representación del cruce del río Candelaria por el viaducto y la pasarela peatonal.

3. Diseño sísmico por capacidad

Como se ha indicado anteriormente, debido a la alta sismicidad de la zona, el enfoque del proyecto para el desarrollo de la subestructura se ha basado en un diseño por capacidad.

Mediante esta estrategia se recurre a mecanismos específicos de rotura, ubicados en la base de la columna, que permiten que esta sección actúe como un fusible, que disipa la energía sísmica y limita la magnitud de los

esfuerzos que se transmiten al resto de elementos. Se consigue así garantizar un comportamiento acotado y predecible de la subestructura ante las situaciones de evento sísmico extremo; lo que permite reducir las dimensiones de la subestructura sin comprometer la estabilidad global del viaducto.

Dentro del marco normativo, entre los principales criterios de diseño que han hecho posible llevar a cabo esta estrategia en el proyecto, destacan los siguientes aspectos:

- Se ha acotado de manera precisa la acción sísmica, para ello se ha caracterizado el espectro sísmico de sitio particularizándolo para cada viaducto y zona, evitando emplear espectros normativos más conservadores. En la figura 10 se observa la diferencia entre los espectros de sitio, en colores rojo, azul y verde; y los normativos, en amarillo, morado y línea punteada.

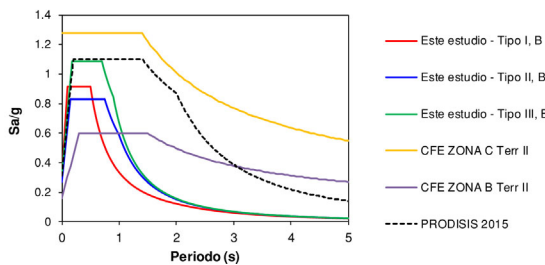


Figura 10. Espectros de sitio y normativos la zona de Candelaria.

- Se han definido las zonas de rótula plástica en la parte inferior del fuste de columna (Figura 11). Zona diseñada para poder disipar energía y absorber grandes deformaciones inelásticas de manera controlada.

Estas secciones se han dimensionado para resistir los esfuerzos de cálculo en la situación pésima de explotación (Resistencia), minimizando las reservas de capacidad en estas hipótesis.

Y adicionalmente han sido diseñadas con unos requisitos específicos de armado, disponiéndose una armadura transversal adicional de confinamiento y evitando

disponer solapes en la armadura longitudinal. Lo que ha permitido dotar a esta zona de una gran ductilidad y capacidad de deformación.

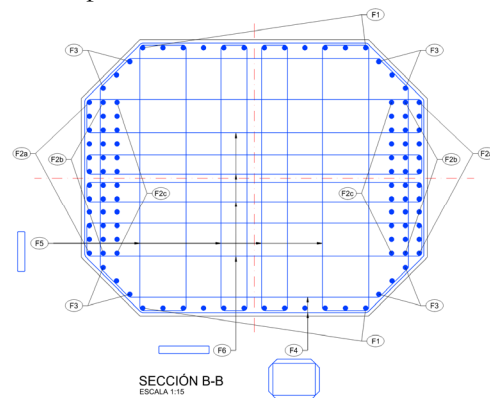


Figura 11. Sección transversal en base de columna.

La ubicación de la rótula plástica en la base de la columna permite que esta zona sea fácilmente inspeccionable y reparable en caso de ser necesario.

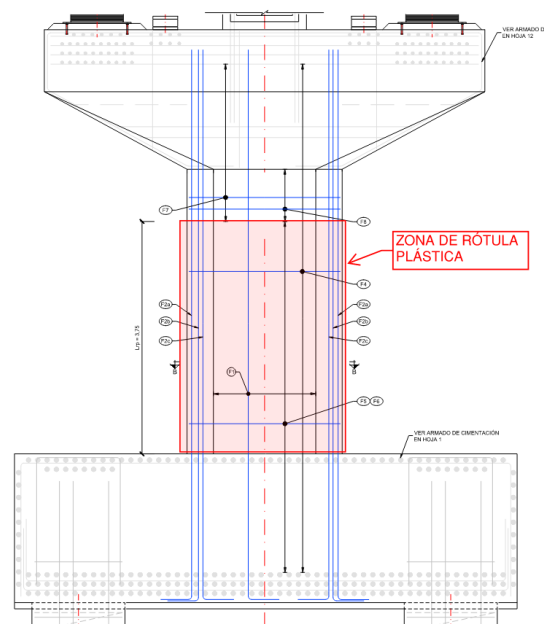


Figura 12. Acotación de las zonas de rótula plástica.

- Así mismo, la columna se ha diseñado para que su capacidad de deformación sea superior a la demanda máxima que se produciría en el evento de sismo extremo. En la figura 13, se representa el diagrama momento curvatura equivalente para la sección de rótula de una de las columnas, en color rojo se

puede observar como la demanda es del orden de un 25% de la capacidad, de deformación de la columna.

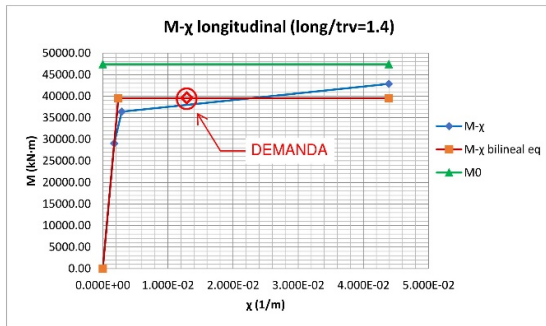


Figura 13. Ejemplo de diagrama momento curvatura de columna.

- La variación de altura entre columnas próximas se ha estudiado para que se produzca de manera gradual, con el objeto de favorecer un comportamiento armónico homogéneo entre ellas y garantizar una compatibilidad en desplazamientos a lo largo de todo el viaducto.
- El resto de los elementos de la subestructura se han dimensionado por sobrerresistencia, para que trabajen en régimen elástico frente al sismo. Se han dimensionado de esta manera la

cimentación y el cabezal de la columna y los topes longitudinales y transversales, tanto en la parte ubicada en el cabecero de la columna como el tablero.

Procediendo de esta manera, y tomando como referencia la columna media de 5,80 m de altura, se han conseguido reducir los esfuerzos elásticos de sismo de unas 1550' t en ambos sentidos, a unas 720 y 850 t en sentido longitudinal y transversal respectivamente. Alcanzando así una reducción de esfuerzos de casi un 50% de media.

Además, la solución de vanos isostáticos, elegida en el proyecto, ha jugado un papel muy importante en esta estrategia sísmica. Ya que, al quedar el tablero vinculado a las columnas cercanas a través de los topes laterales, la acción sísmica queda controlada, soportando cada columna la masa correspondiente a la de un vano.

Esto permite poder diseñar viaductos de gran longitud (Figura 14) sin necesidad de disponer aparatos de apoyo especiales o unidades de disipación de energía tipo amortiguadores más complejas, que implican un mayor costo y exigen una mayor necesidad de mantenimiento.



Figura 14. Vista general de extremo final del Viaducto de Tenosique terminado.

En resumen, este enfoque no solo ha ayudado a mejorar la seguridad de la estructura, garantizando un desempeño óptimo de la cimentación frente a acciones sísmicas y reduciendo los costes de fabricación; sino que también reduce los costes de reparación y mantenimiento limitando el posible daño a zonas de la estructura acotadas y accesibles para inspección y reparación.

4. Descripción del proceso constructivo y beneficios de la solución estructural adoptada

La otra gran ventaja de la tipología elegida para los viaductos urbanos radica en la versatilidad de su proceso constructivo. La solución basada en múltiples vanos simplemente apoyados permite la ejecución simultánea de varios elementos estructurales (cimentaciones, columnas y tablero), sin necesidad de seguir un orden específico para el montaje de los vanos desde un estribo al otro (Figuras 15 y 16).



Figura 15. Montaje de múltiples vanos sin un orden específico.

De esta manera, la construcción del viaducto puede realizarse de manera independiente por secciones, o incluso por

vanos individuales, según las necesidades de organización en obra. Además, si ocurre algún incidente en una sección específica durante la construcción, no es necesario detener la ejecución de todo el viaducto, ya que se puede continuar trabajando en otra sección no afectada.



Figura 16. Ejecución simultánea de varios elementos estructurales.

La estructura metálica de cada vano se fabrica completamente en taller y se transporta por carretera a la obra en su forma terminada (Figuras 17 y 18). Esto acelera la producción del tablero, minimiza el trabajo en obra y garantiza un control más exhaustivo de la ejecución de la estructura metálica.



Figura 17. Transporte de vanos de 40 m terminados.

Para permitir el transporte de la estructura metálica completa, que cubre una distancia de más de 1330 km desde la planta de RECAL en Guadalajara, la sección transversal del tablero ha sido diseñada para ajustarse a las dimensiones máximas permitidas para transporte. Por ello, la altura de las vigas se ha limitado a 3 m y el espaciamiento entre ellas a 6 m, como se describe en la sección 2.1.



Figura 18. Transporte por carretera de vanos de 40 m terminados.

Una vez en el sitio, los tableros metálicos se almacenan bajo su posición final sobre plintos temporales (Figuras 19 y 20) y se levantan posteriormente mediante dos grúas (Figura 21), con un peso promedio de cada vano de aproximadamente 130 t.



Figura 19. Vigas metálicas almacenadas en obra esperando ser izadas.

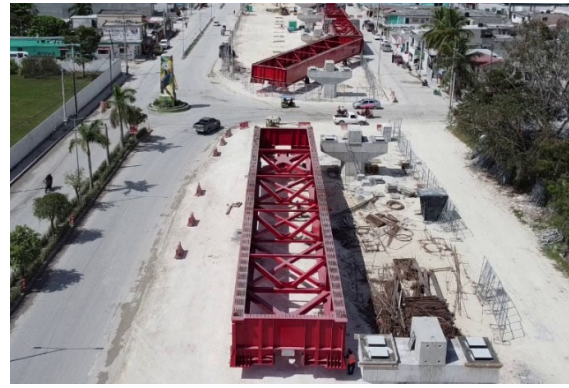


Figura 20. Vigas metálicas almacenadas en obra esperando ser izadas.



Figura 21. Izado de las vigas metálicas.

La secuencia de construcción para cada vano individual continúa con la colocación de las losas superiores de hormigón prefabricado (Figura 22). Estas losas son de ancho completo del tablero, lo que permite colocar la armadura a lo largo de todo el ancho de la losa de una sola vez y verter el hormigón sin necesidad de usar cimbra ni carros de encofrado en voladizo (Figura 23). Además, las losas prefabricadas tienen aberturas coincidentes con la distribución de los conectores soldados a la placa superior de las vigas para garantizar el comportamiento mixto del tablero. Esto permite industrializar la fabricación, acelerando y simplificando la construcción de la losa.

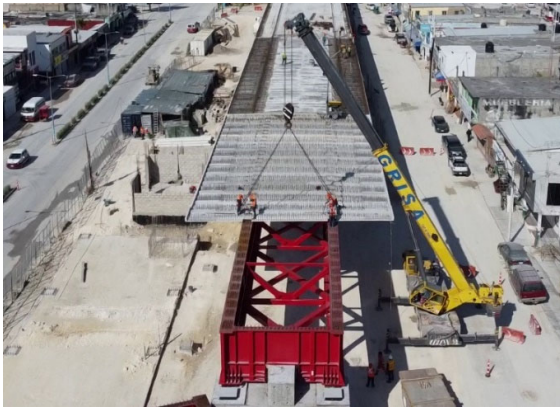


Figura 22. Colocación de losas superiores de hormigón prefabricado.



Figura 23. Vista general de las losas de hormigón prefabricado.

El vertido del hormigón de la losa se realiza en dos fases (Figura 24): primero se hormigona la zona entre las vigas metálicas y, una vez que esta zona ha adquirido suficiente resistencia, se continúa con los voladizos. Con esta secuencia se optimiza la estructura metálica, ya que solo el peso de la zona central de la losa es soportado únicamente por la estructura metálica, mientras que el peso del hormigón en los voladizos es soportado por una sección mixta intermedia.

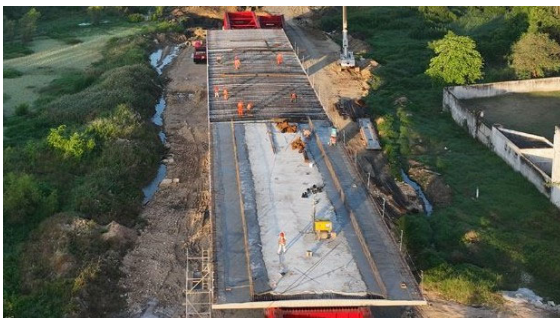


Figura 24. Vertido de la losa en dos fases.

5. Fabricación de la estructura metálica del tablero

La estructura metálica completa de los viaductos urbanos se fabrica en el taller de RECAL, ubicado en Guadalajara, con un volumen total de acero estructural superior a 16000 toneladas, distribuidas aproximadamente de la siguiente manera: Tenosique, 9460 t; Candelaria, 3190 t; y Escárcega, 3480 t.

La solución de usar vanos típicos de 40 m para los 4990 m de longitud total de los viaductos urbanos del Tramo 1 del Tren Maya ha permitido estandarizar el proceso de producción en el taller, resultando en una gran optimización de los tiempos de fabricación y construcción.

A pesar de la estandarización, debido a las particularidades de cada viaducto (descritas en la sección 2.3), los 124 vanos no son exactamente iguales y se han clasificado en 17 tipos para su diseño y fabricación. Sin embargo, las diferencias entre los grupos son leves, como cambios en los perfiles tubulares de las celosías de arriostramiento o la ausencia de topes longitudinales en los vanos extremos, lo que no afecta significativamente la tasa de producción.

Dado el peso elevado de la estructura metálica de cada vano, aproximadamente 130 t, cada uno se fabrica en el taller dividido en dos semivanos. El proceso de producción comienza con la fabricación de cada semiviga por separado (Figura 25) y, posteriormente, ambas se ensamblan para formar la viga gemela mediante la soldadura de diafragmas y celosías de arriostramiento (Figura 26). Finalmente, los dos semivanos se ensamblan para conformar un vano completo de 40 m antes de enviarlo al sitio de construcción (Figura 27).

Inicialmente, algunos vanos fueron transportados al sitio divididos en dos módulos y ensamblados en obra. Sin embargo, tras verificar en los primeros viajes que no había limitaciones en la carretera para transportar módulos de 40 m de longitud, todos los vanos

siguientes se enviaron como un único módulo completo.



Figura 25. Producción de una semiviga.

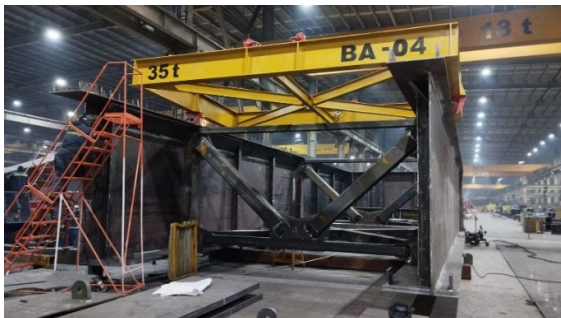


Figura 26. Ensamblaje de vigas gemelas mediante diafragmas y celosías.



Figura 27. Ensamblaje de semivanos en el taller para formar un vano de 40 m.

Los viaductos deben cumplir estrictos requisitos relacionados con la resistencia a la fatiga debido al tráfico ferroviario. Por lo tanto, el diseño correcto de todos los detalles es crucial para no empeorar la categoría de fatiga. La necesidad de una ejecución precisa de los detalles llevó al desarrollo de más de 400 planos de taller y 100 planos de ensamblaje que definen con precisión cada una de las placas, encuentros y soldaduras. Los detalles se centran en garantizar transiciones suaves en dimensiones y espesores (Figura 28), acabados circulares y tangentes de las placas, entre otros.

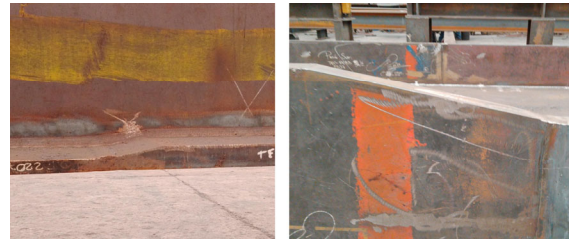


Figura 28. Detalles de transiciones suaves. Transición de espesor, lado izquierdo, y transición de ancho en ala inferior, lado derecho.

Por ejemplo, en la figura 29, se muestra un detalle tipo de acuerdo tangente. En el que primero se procede cortando el extremo de la cartela en su parte más estrecha (línea azul), para evitar que se funda durante el corte o soldeo. Posteriormente, la soldadura se extiende más allá del borde teórico del acuerdo para finalmente retirar mediante amolado el sobrante (zona amarilla).

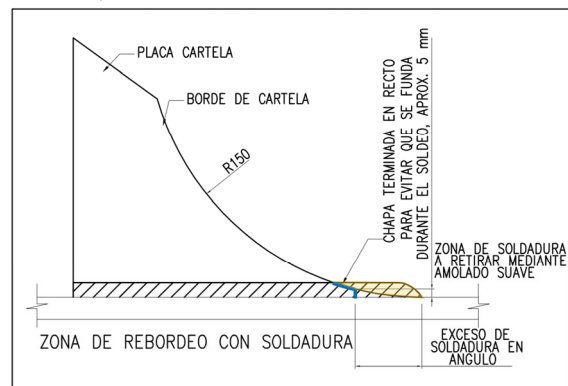


Figura 29. Detalles de planos de taller para transiciones con acabados tangentes.

Referencias

- [1] Millanes, F.; Bordó, E. (2013). Viaducto de Archidona (L.A.V. Antequera-Granada), 3.150 m de dintel mixto sin juntas de dilatación. Revista Hormigón y Acero; Volumen 64, nº 270.
- [2] Millanes, F.; Ortega, M.; Pascual, J. (2007). "Arroyo las Piedras" viaduct. The first Composite Steel-Concrete High Speed Railway Bridge in Spain. Revista Hormigón y Acero; Volumen 58, nº 243.