

Puentes mixtos especiales con sección en U Línea Z, México

Singular composite bridges with U-section, railway line Z, Mexico.

Luis Matute Rúbio^a, Miguel Ortega Cornejo^b, Daniel Martínez Agromayor^c,
Enrique Bordó Bujaralce^d

^a Máster Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin. Vicepresidente. luis.matute@tylin.com

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

^c Máster Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin. Director Departamento de Puentes. daniel.martinez@tylin.com

^d Máster Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin. Director Departamento de Puentes enrique.bordo@tylin.com

RESUMEN

RECAL ha tenido el encargo de la fabricación, ejecución y puesta en servicio de los trabajos correspondientes a la sustitución de 7 de los 16 puentes ferroviarios existentes en el tramo 2 de la línea “Z”, México. La ejecución de los puentes se encuentra terminada. TYLin ha desarrollado el proyecto de los 7 puentes. Dentro de estos puentes hay 3 tipos de tipologías. No obstante, destaca la tipología de sección en U con losa inferior de hormigón.

ABSTRACT

RECAL has executed the project and the works corresponding to the replacement of 7 of the 16 existing railway bridges in section 2 of the "Z" line, Mexico. The execution of the bridges is finished. TYLin has developed the project of the 7 bridges. Within these bridges there are 3 types of typologies. However, the typology of U-section with a lower concrete slab stands out.

PALABRAS CLAVE: Puente Ferroviario, zona alta sismicidad, sección en U, puentes Mixtos, puentes Ferroviarios, puentes integrales, puentes metálicos.

KEYWORDS: Railway Bridge, seismic zone, U-section, composite bridges, Railway bridges, integral bridges, metal bridges.

1. Introducción

RECAL ha tenido el encargo de la fabricación, ejecución y puesta en servicio de los trabajos correspondientes a la sustitución de 7 de los 16 puentes ferroviarios actualmente existentes del tramo 2, k.m. Z-137+564 al Z-186+046, de la línea “Z”, Ubero, Oaxaca a Mogoñe, Oaxaca,

bajo la gestión y supervisión de la Secretaría de Marina SEMAR.

Dentro de las labores necesarias para la correcta ejecución de las obras se encuentra la redacción de un Proyecto Ejecutivo que defina completamente la Superestructura y Subestructura de cada una de las 7 estructuras

mencionadas. En este contexto, RECAL solicitó la redacción de los citados proyectos a TYLin (antes IDEAM).

Las siete estructuras son:

- Puente de Ferrocarril No. 01 “Ubero”
- Puente de Ferrocarril No. 02 “San Gabriel”
- Puente de Ferrocarril No. 06 “Tolosita”
- Puente de Ferrocarril No. 09 “Palomares”
- Puente de Ferrocarril No. 10 “Malvinas”
- Puente de Ferrocarril No. 13 “Paso Real”
- Puente de Ferrocarril No. 16 “Mogóñe”

No obstante, dentro de estos puentes destacan 5 de ellos con una tipología de sección en U con

losa inferior de hormigón. Esta solución viene dada por la rasante de la vía existente y por los condicionantes hidráulicos, los cuales obligaban a mantener unos gálidos mínimos inferiores y la imposibilidad de plantear una estructura más convencional. La tipología no es usualmente empleada en puentes metálicos de Ferrocarril, más aún, siendo un puente integral. Está formada por dos vigas metálicas longitudinales, unos marcos y vigas transversales metálicas inferiores, conectadas a una losa inferior de hormigón. Las longitudes de los puentes llegan hasta los 120 m, y la luz máxima hasta los 40.0 m.



Figura 1. Vista sección transversal

2. Concepción de la solución

En estos casos, nos encontrábamos con el condicionante de mantener la cota de vía y a su vez permitir el mayor caudal de agua posible bajo los puentes. Esto obligó a buscar una solución cuyo canto sobresaliera hacia arriba, para permitir el mayor gálibo inferior posible.

Con todo ello se estudiaron las soluciones similares existentes en Francia y México, donde

se localizaron los siguientes puentes de análoga tipología:

1. Viaducto de Oissel sur la Seine. Francia
 - Vanos = **66.3 + 66.3 + 52.3 m**
 - 2 vigas longitudinales
 - Canto/longitud de vano = 1/15 (continuo)
 - Losa de hormigón entre vigas transversales

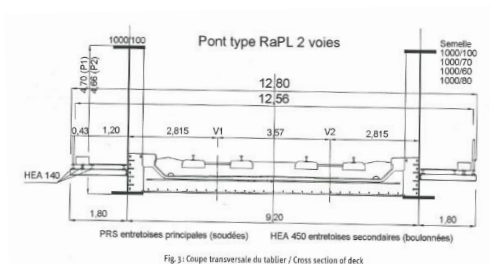


Figura 2. Sección transversal Oiseel



Figura 3. Vista Oiseel

2. Paso del TGV sobre Carretera comarcal RD 59. Francia

- Longitudes de vanos = 57.24 m
- 2 vigas longitudinales
- Canto/longitud de vano = $5/57.24 = 1/11.44$ (isostático)
- Losa de hormigón entre vigas transversales

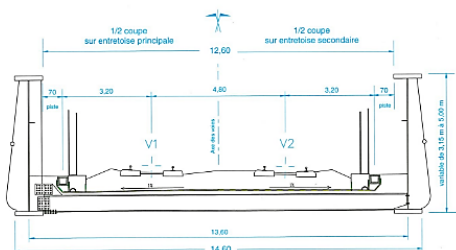


Figura 4. Sección transversal RD 59



Figura 5. Vista RD 59

3. Viaducto de d'Orgon. Francia
- Longitudes de vanos = 60-70 m
 - 2 vigas longitudinales
 - Canto/longitud de vano = $1/15$
 - Losa de hormigón entre vigas transversales

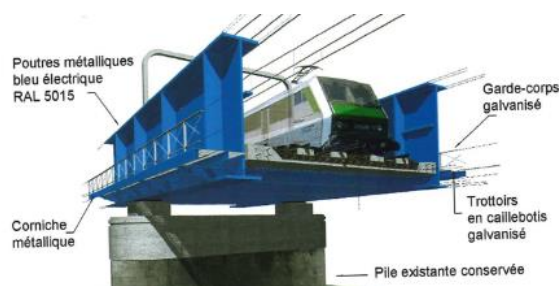


Figura 6. Sección transversal d'Orgon



Figura 7. Vista d'Orgon

4. Viaducto de Billy-le-Grand-le Chateau au-dessus de l'autoroute A4 (Marne). Francia

- Longitudes de vanos = $45.37 + 45.37$
- 2 vigas longitudinales
- Canto/longitud de vano = $1/10.5$
- Losa de hormigón entre vigas transversales

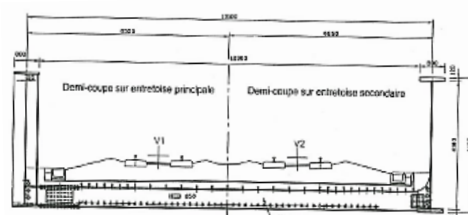


Figura 8. Sección transversal Billy-le-Grand-le



Figura 9. Vista Billy-le-Grand-le

5. Viaducto de Baudrecourt (Moselle). Francia

- Vanos = $35 + 42 + 63 + 63 + 45 + 39$ m
- 2 vigas longitudinales
- Canto/longitud de vano = $1/15$ (continuo)
- Losa de hormigón entre vigas transversales



Figura 10. Vista Baudrecourt

6. Puente Kansas City Southern de México

- Vanos = 13.70 a 39.475 m
- 2 vigas longitudinales
- Canto/longitud de vano = $3.40/39.4 = 1/11.61$
- Ancho libre = 5.486m



Figura 11. Vista Kansas City

Tabla 1. Comparativa de realizaciones similares

CUANTÍAS					
	Luz (m)	TIPOLOGÍA	SEPARACIÓN ENTRE ALMAS	CUANTÍA (KG/ML)	CUANTÍA (KG/m2)
PUENTE KANSAS CITY SOUTHERN DE MEXICO	39.5	ISOSTÁTICO	6.1	5219	856
PUENTE KANSAS CITY SOUTHERN DE MEXICO (SIN CHAPA GUARDABALASTO)	39.5	ISOSTÁTICO	6.1	4456	731
Viaduct de Baudrecourt (MOSELLE). Francia	47.8	CONTINUO	6.2	5580	905
Viaducto de d'Orgon. Francia	60-70	CONTINUO	9.7	7538	777
Viaducto de Billy-le-Grand-le Chateau au-dessus de l'autoroute A4 (Marne). Francia	42.6	CONTINUO	13.1	10469	799
Viaducto de Bussuy le Chateau. Francia	49.1	CONTINUO	13.1	9674	738

3. Descripción de los puentes

Los puentes con sección en U del tramo son los 5 siguientes:

- Puente de Tolosita
- Puente de "Palomares"
- Puente de "Malvinas"
- Puente de "Paso Real"
- Puente de "Mogoñé"

De estos 5 puentes, Palomares, Malvinas y Mogoñé son puentes de un solo vano de 36,00m de luz.



Figura 12. Vista lateral de Mogoñé

Mientras, Tolosita y Paso Real son puentes de 3 vanos:

- Tolosita: 41.10+38.70+41.10m
- Paso Real: 31.10+38.20+41.10m



Figura 13. Vista Aérea Tolosita en construcción

3. Configuración longitudinal

Todos los puentes son integrales y están formados por vigas metálicas isostáticas con continuidad de losa. Tanto las columnas como los estribos están vinculados con el tablero. La zona dónde están situados los puentes es una zona de alta sismicidad con un espectro con meseta que llega hasta periodos altos, de esta manera se decidió vincular los puentes con la subestructura frente a sismo y los estribos pudieran contar con el empuje pasivo del terreno como elemento resistente.

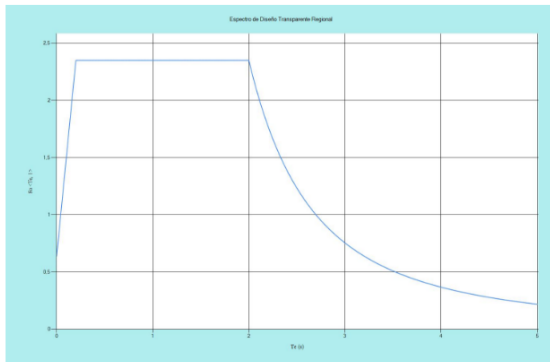


Figura 14. Espectro de Diseño Transparente

La unión tablero-estribo se materializó con la prolongación de la losa del tablero y su unión con el muro trasero del estribo. Para permitir los giros a flexión del tablero se dejaba una distancia libre entre tablero y estribo, la cual permitía dicho giro sin inducir unos esfuerzos excesivos en la losa. Este diseño tiene 2 ventajas:

- Elimina las juntas tablero- estribo y su mantenimiento.
- Elimina la transmisión esfuerzos sísmico-elevados a través de unos apoyos que necesitan con el tiempo mantenimiento y sustitución.

La fuerza transversal del sismo también se transmitía a través de la losa de conexión tablero-caballote. Esta losa se dimensionó para:

- Las fuerzas locales de la carga muerta y el tren flectando desde el murete de estribo hasta la viga transversal de diafragma de apoyo.
- La flexión y cortante producidas por el giro impuesto debido a la flexión longitudinal del puente. Para esta comprobación se tubo en cuenta la perdida de rigidez de la losa por fisuración.
- Las fuerzas de tracción y compresión del sismo longitudinal.
- Las fuerzas transversales del sismo en dirección perpendicular al sentido longitudinal.

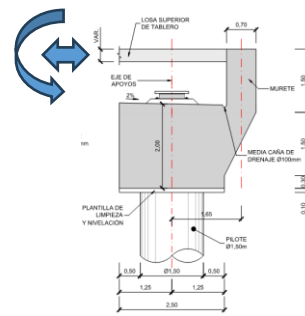


Figura 15. Alzado estribo

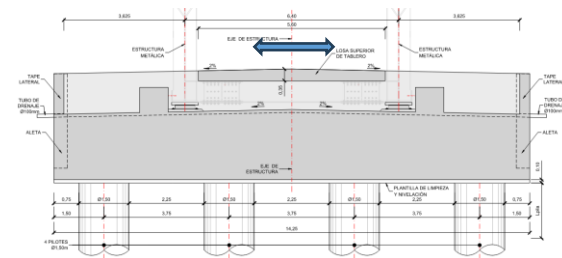


Figura 16. Vista Frontal del estribo

Los topes transversales dispuestos en los estribos fueron colocados únicamente para fases constructivas, dado que transversalmente también se transmitía la fuerza horizontal a través de la conexión de la losa del tablero, como se ha comentado.

Los estribos se diseñaron con alineación única de pilotes para flexibilizarlos y permitir los movimientos reológicos y térmicos sin inducción de grandes esfuerzos en la cimentación.

Para los puentes de Tolosita y Paso Real en las columnas, se dispusieron topes transversales y longitudinales que permitían la conexión tablero-columna.

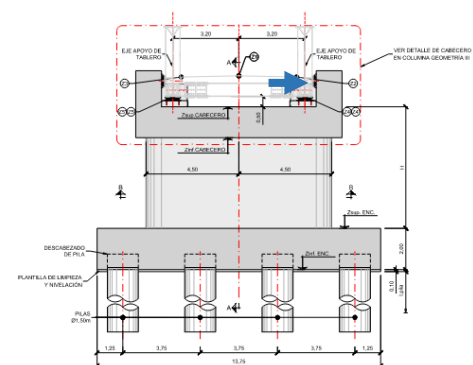
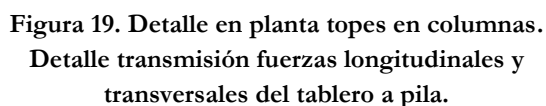
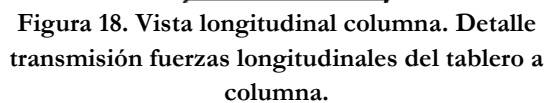
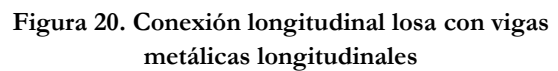


Figura 17. Vista transversal de columna. Detalle de transmisión de fuerzas transversales del tablero a la columna.



- Las fuerzas locales de la carga muerta y el tren flectando entre vigas transversales de diafragma de apoyo.
- La flexión y cortante producidas por el giro impuesto debido a la flexión longitudinal del puente.
- Las fuerzas de tracción y compresión del sismo longitudinal.
- La flexión y cortante debidos al sismo en dirección perpendicular al sentido longitudinal.



- Resistir el sismo transversal. Rasante debido a la flexión de eje vertical.
- Transmitir el sismo longitudinal y el frenado de la losa a las vigas metálicas longitudinales, para que desde estas mismas se transmitiera a los topes situados en las pilas.
- Para el esfuerzo rasante inducido por la retracción de la losa. La losa se retrae y dicha retracción es impedida por las vigas metálicas, traccionándose la losa y comprimiéndose las vigas metálicas.
- Para el esfuerzo rasante inducido por diferencia de dilatación/contracción térmica entre losa y tablero. Efecto similar al debido a retracción que comprime/tracciona losa y vigas.

Por último, es de comentar, que dicha conexión se ha realizado cercana al centro de gravedad de las propias vigas metálicas y alejada de las platabandas inferiores. Esto implica que las tracciones transmitidas por las vigas metálicas a la losa, por la flexión longitudinal de dichas vigas, produce en servicio tensiones despreciables a nivel de fisuración en el armado longitudinal de la losa.

4. Sección transversal

La sección transversal estaba formada por 2 vigas longitudinales apoyadas isostáticamente y situadas ambas en los extremos del viaducto.

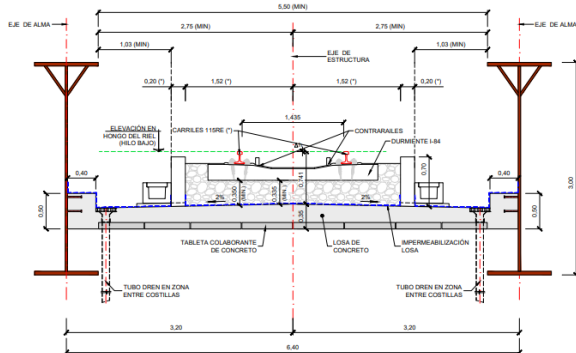


Figura 21. Sección transversal

El cálculo de las citadas vigas fue realizado en régimen elástico y contando con la reducción de resistencia de los cordones suprimidos comprimidos debido a los efectos de pandeo lateral de los mismos, entre los marcos situados cada 5,00m. Dichas vigas se dimensionaron aprovechando al máximo el material de manera que al final quedaron condicionadas tanto por esfuerzos últimos de resistencia como por los esfuerzos de fatiga.

Como se ha comentado, cada 5 metros se disponía un marco transversal cuya función era estabilizar los esfuerzos de viento y pandeo lateral existente en los cordones superiores de las vigas principales. Las vigas inferiores de dichos marcos permitían el apoyo de la losa inferior que flecta entre marcos y unas vigas intermedias transversales situadas entre cada marco. La viga inferior es una viga conectada a la losa mediante conectores creando una sección mixta. Dichas vigas se montaban atornilladas, para permitir un montaje sencillo y rápido en obra, sin personal muy especializado.

La unión atornillada **marco transversal a vigas longitudinales** se realizó lo mas próxima a los extremos para reducir al máximo los efectos de flexión local del tren y la posible fatiga. No obstante, dichas uniones se dimensionaron para la flexión/cortante local del tren, y el trabajo marco (viento transversal junto con el trabajo de

contención del pandeo lateral del ala superior de las vigas metálicas)

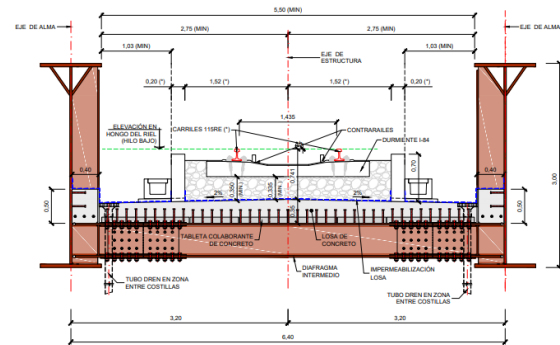


Figura 22. Sección transversal marco cada 5,00m

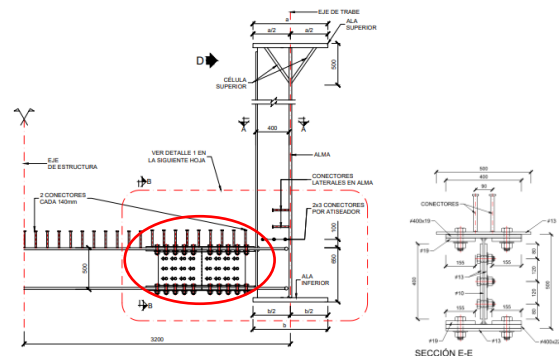


Figura 23. Unión atornillada marco transversal a vigas longitudinales

Como se ha comentado, entre marcos, se disponen unas vigas transversales intermedias. Las mismas funcionan como vigas mixtas y reduce la luz de apoyo longitudinal de la losa superior al entorno de los 2.50m. La unión con las vigas longitudinales se realiza atornillada para simplificar y reducir plazos de ejecución en obra. Dicha unión está articulada a efectos de cálculo. También se comprobó que el giro impuesto inducido por dichas vigas producía tensiones despreciables las almas.

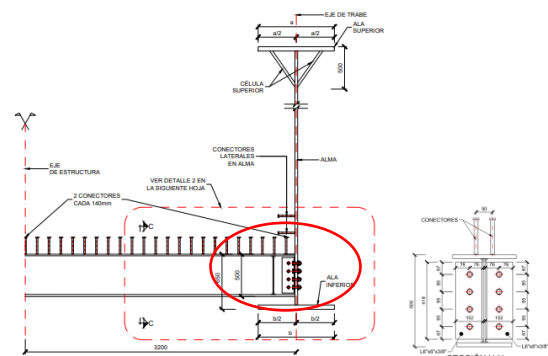


Figura 24. Unión atornillada vigas transversales intermedias con vigas longitudinales

Finalmente, al llegar a los estribos se disponía un marco que hacía las veces de diafragma asegurando el paso de las cargas de las vigas longitudinales a la subestructura.

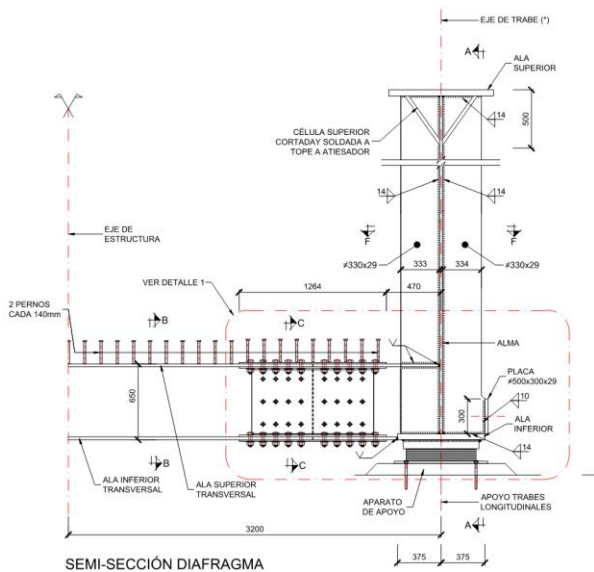


Figura 25. Sección transversal por estribo.

5. Proceso constructivo

El proceso constructivo se divide en 5 fases:

- **Fase 1**, en la cual se cortaba el tráfico, se retiraba el antiguo tablero y se demolía la subestructura existente. Esta fase en Tolosita y Paso Real no fue necesaria, dado que se hizo un ajuste el trazado y los nuevos puentes se ejecutaron paralelamente.

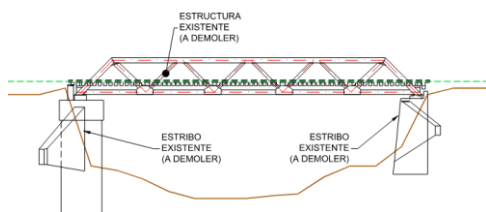


Figura 26. Fase 1

- **Fase 2**. En esta fase de excavaban las cimentaciones, se ejecutaban los pilotes, se montaba el armado del estribo y se hormigonaba. También en esta fase estaba previsto el montaje de la

protección de socavación, aunque dicho montaje, finalmente, fue realizado tras acabar los puentes:

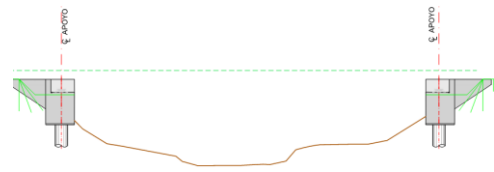


Figura 27. Fase 2

- **Fase 3**. En esta fase se procedía a montar la estructura metálica del tablero y el relleno del bloque técnico tras los estribos.

Provisionalmente, para asegurar la estabilidad frente al viento y el posible sismo en construcción, se bloqueaba en longitudinal y transversal el tablero metálico contra la subestructura.

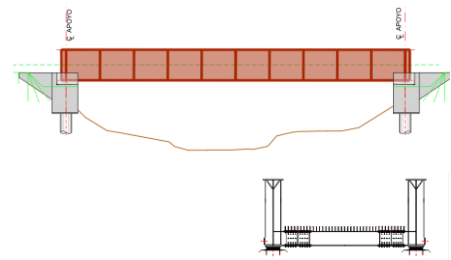


Figura 28. Fase 3



Figura 29. Montaje con grúas Tolosita



Figura 30. Montaje con grúas Tolosita

- **Fase 4.** Durante esta fase, se montaban las preslosas, posteriormente el armado de la losa y finalmente se hormigonaba. El hormigonado de la losa se ejecuta desde el centro hasta los estribos. De esta manera la zona de conexión de losa-estribo se hormigona en el último momento para evitar esfuerzos impuestos de flexión en dicha conexión debido al giro del tablero en estribos, durante el hormigonado. En el momento que la losa alcanzara $f_c' = 30\text{MPa}$, se procedía a retirar los bloqueos provisionales que aseguraba la estabilidad frente a fuerzas horizontales.

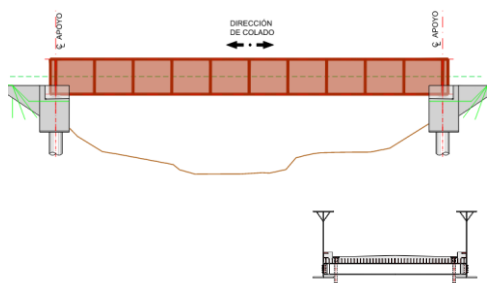


Figura 31. Fase 4



Figura 32. Montaje de prelosas

- **Fase 5.** Esta fase sería la fase a acabados. Se hormigonaban los muretes guardabalastos, se impermeabilizaba el tablero y se montaban canaletas, balasto y vías (con contracarriles).

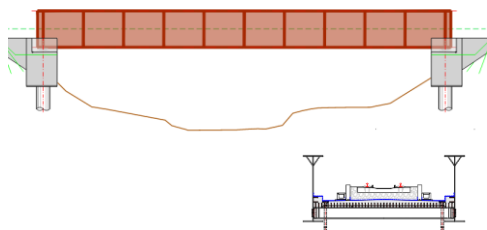


Figura 33. Fase 5



Figura 34. Colado muretes guardabalasto



Figura 35. Montaje de vías



Figura 36. Puente acabado a falta de montaje de protección socavación.

La facilidad de los procesos constructivos proporcionó la ejecución de la obra y la reducción de los plazos, siendo el plazo completo de los puentes pequeños del entorno de los 2 meses y de los grandes del entorno de los 4 meses.

6. Conclusiones

Las soluciones proyectadas permitieron perfectamente adaptarse a los condicionantes existentes:

- Rasante del tren existente y no modificable
- Necesidad de aportar la mayor capacidad hidráulica posible
- Plazos de ejecución reducidos

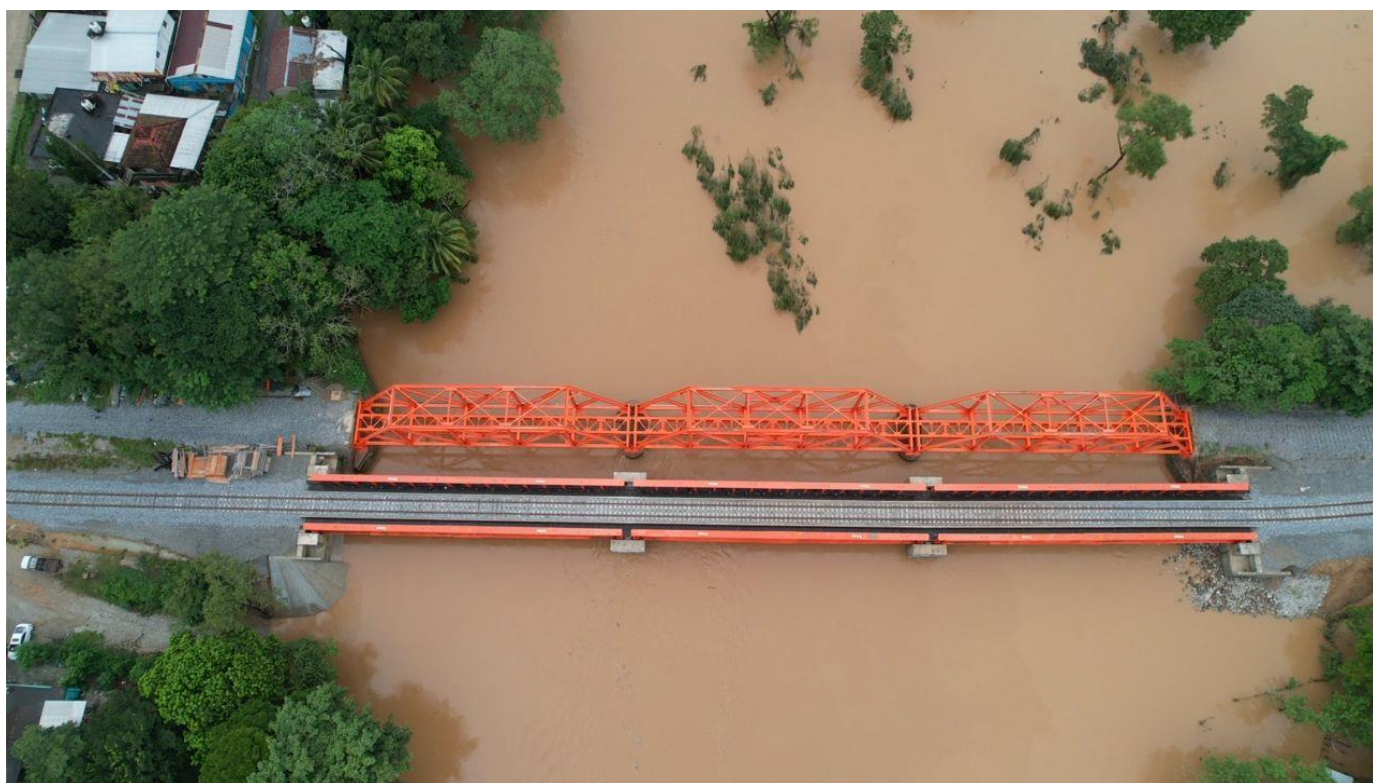


Figura 37. Puente de Tolosita tras las inundaciones de octubre de 2024.

Por último, queremos agradecer a la empresa RECAL su confianza, sin la cual no hubiera sido posible la ejecución de estos retos:

- René Calderón Bujdud,
Presidente Grupo Recal
- Javier Villa Torres
Vicepresidente de División
- José Carlos Hernández Rico
Director de Operaciones de Construcción
- Luis Antonio Mendoza Valdez
Líder de equipo de diseño
- Cristóbal de Jesús Espinoza Vargas
Director de Obra Civil

También queremos agradecer el trabajo realizado por parte del equipo de TYLIN México que ha trabajado en estos proyectos:

- Gabriel Pérez Mondragón,
- José Antonio Lopez Meza
- Yitzhak Yair Cortes

Como a el equipo de TYLIN Spain desplazado en México:

- Alejandro Mosquera
- Ramón Aranzubía Ruiz