

El reto de diseñar y ejecutar cientos de puentes ferroviarios en tiempo récord en la Línea K en México

The challenge of designing and executing hundreds of railway bridges in record time on Line K in Mexico

Luis Matute ^a, Miguel Ortega ^b, Fernando Ruano ^c, Ignacio Pulido ^d, Jokin Ugarte ^e, Pedro Atanasio ^f y Alberto Suz ^g

^a Máster Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin. Vicepresidente Europe/LATAM. 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 del Departamento de Puentes. fernando.ruano@tylin.com

^d Máster Ingeniero de Caminos, C. y P. TYLin. Director de Desarrollo de Negocio de Puentes. ignacio.pulido@tylin.com

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

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

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

RESUMEN

El proyecto de la línea K consiste en la modernización de un tramo de ferrocarril del entorno de 480 km, e incluye la rehabilitación o sustitución de 445 puentes, con un plazo de poco más de un año, en modalidad de “fast-track”. La clave para poder enfrentarse a este gran reto ingenieril y constructivo ha sido la estandarización y versatilidad de las soluciones, siendo la más empleada los puentes isostáticos mixtos de un único vano y luces tipificadas, con continuidad de losa superior con los estribos. También destacan las soluciones mixtas de sucesión de vanos isostáticos para los puentes de mayor entidad, así como el refuerzo de tableros metálicos y subestructura existentes en algunos casos particulares.

ABSTRACT

The K line project involves the modernisation of a railway section of around 480 km, and includes the rehabilitation or replacement of 445 bridges, with a deadline of just over a year, in a “fast-track” mode. The key to being able to face this great engineering and construction challenge has been the standardisation and versatility of the solutions, the most commonly used being mixed isostatic bridges with a single span and standardised spans, with continuity of the upper slab with the abutments. Also noteworthy are the mixed solutions of a succession of isostatic spans for the larger bridges, as well as the reinforcement of metal decks and existing substructure in some particular cases.

PALABRAS CLAVE: Proyecto y cálculo de todo tipo de estructuras, puente, isostático, semi-integral, ferrocarril, mixto, acero, hormigón, fast-track.

KEYWORDS: Design and calculation of all types of structures, bridge, isostatic, semi-integral, railway, mixed, steel, concrete, fast-track.

1 Introducción

La línea ferroviaria conocida como «Línea K» es el tramo más importante dentro del programa de desarrollo de México para la modernización del Ferrocarril Interoceánico en el Istmo de Tehuantepec. Junto con las Líneas Z y FA, la Línea K constituye un servicio ferroviario de mercancías que conecta las principales ciudades y puertos ferroviarios de la región sureste del país, enlazando los océanos Atlántico y Pacífico. La línea ferroviaria recorre 480 km paralela a la costa del Pacífico (Figura 1), desde Ixtepec (Oaxaca) hasta Ciudad Hidalgo (Chiapas), y conecta finalmente con Guatemala. La recuperación y rehabilitación de esta línea ha sido una de las prioridades de la administración mexicana en los últimos años, habiendo sido encomendadas la realización del proyecto y de su ejecución al Servicio de Marina del ejército mexicano (SEMAR) quien contrató para esta tarea a la empresa RECAL, quien confió en los servicios de TYLin como ingeniería especialista en estructuras y en vía ferroviarias para la elaboración de este proyecto.

La orografía de la línea está condicionada por el hecho de que discurre entre la Sierra Madre y el Océano Pacífico, teniendo que sortear innumerables ríos y torrentes que canalizan el agua de las copiosas lluvias tropicales que asolan la zona desde la sierra hasta el mar. El

área también es azotada periódicamente por huracanes y ciclones tropicales y es una de las zonas sísmicamente más activas de México.

En cuanto a las estructuras, el Proyecto de Rehabilitación de la línea, actualmente en desarrollo, consta de 445 puentes compuestos por más de 600 vanos, lo que supone una longitud total superior a 14 km. De ellos, 346 son puentes de un solo vano y 99 son puentes especiales, compuestos por varios vanos.

Como trabajo inicial del proyecto, se realizó una inspección sobre el terreno de todas las estructuras de la línea para determinar su estado de conservación, así como un análisis de las patologías y de la validez estructural para las nuevas cargas de la línea. Como resultado de este trabajo preliminar, se determinó qué estructuras podían rehabilitarse y cuáles debían sustituirse: 18 de los puentes especiales serán rehabilitados, mientras que el resto de las estructuras serán sustituidas.

En este contexto, TYLin ha sido responsable del desarrollo de los Proyectos Constructivos y también proporciona Asistencia Técnica a la empresa constructora durante el desarrollo de las obras. El gran reto del proyecto es completar el diseño y la construcción de toda la línea ferroviaria en poco más de un año, para lo cual el proyecto se ha desarrollado como “fast-track”.

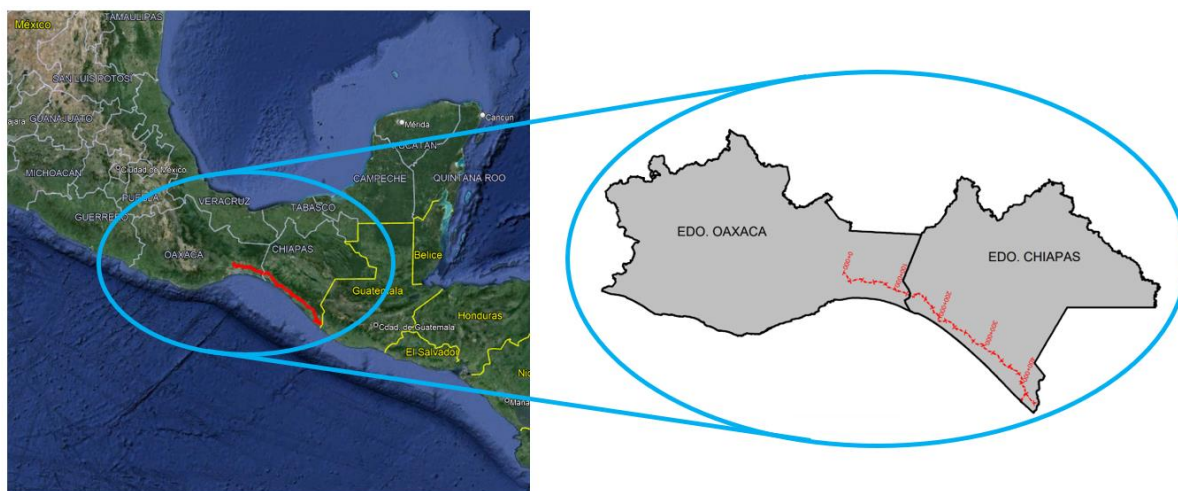


Figura 1. Localización del ferrocarril de la Línea K

2 Descripción de los puentes nuevos

2.1 Solución estructural

La solución estructural adoptada para los nuevos puentes, que constituyen la inmensa mayoría de las estructuras de la traza, consiste en vanos simplemente apoyados, teniendo en cuenta sus ventajas de fabricación y construcción (como se describe en la sección 3 de este documento).

La solución empleada se basa en los viaductos urbanos del tramo 1 del «Tren Maya», recientemente terminados y diseñados por TYLin [1]. Los viaductos ferroviarios compuestos «Archidona» [2] y «Arroyo las piedras» [3] también inspiraron el diseño, con la principal diferencia de que esos viaductos tienen vanos continuos en lugar de simplemente apoyados.

Buscando la eficiencia y rapidez de diseño y construcción, el proyecto consta de vanos tipo con las siguientes longitudes de vano: 12, 15, 21, 24, 30, 36 y 42 metros. De esta forma, cada nuevo puente se compone de uno o varios vanos tipo, con la subestructura adaptada a las condiciones geotécnicas de cada emplazamiento también dentro de unas soluciones estándar.

2.1.1 Superestructura: vanos tipo

En cuanto a la sección transversal del tablero, pueden diferenciarse dos tipos de vanos estándar:

- Vanos mixtos con losa superior, de tipología bijácena o bicajón, para luces de 12 a 42 m.
- Vano «tipo U», con luces de 30 a 42 m.

La solución más utilizada es el tablero de losa superior. Este tipo de tablero se compone de dos vigas gemelas de acero separadas 3,25 m entre ejes y una losa superior de hormigón conectada a la placa superior de las vigas de acero

con pernos (Figura 2), por lo que se utiliza como cabeza de compresión de la sección compuesta. Las grandes ventajas de la acción compuesta (acero-hormigón) son la eficiencia del material, gracias a la reducción de la capacidad requerida de las vigas de acero, y la reducción de las fuerzas sísmicas debido a la ligereza del tablero.

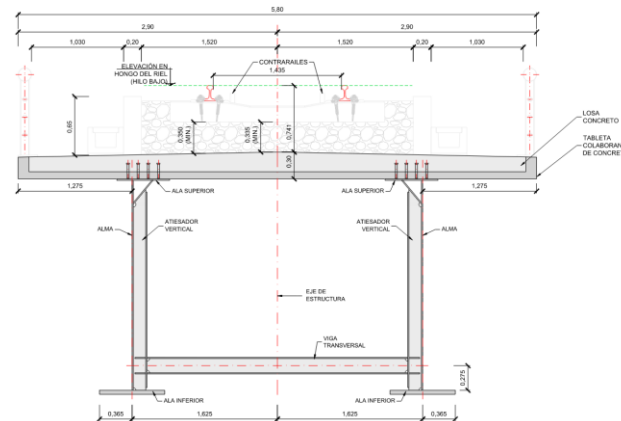


Figura 2. Sección transversal de un tablero de vigas gemelas

El canto de las vigas de acero varía de 1,495 a 3,0 m en función de la longitud del vano (de 21 a 42m). Ambas vigas están conectadas con cuatro montantes horizontales intermedios más dos diafragmas extremos en las secciones de apoyo, que conforman pórticos transversales que transfieren las acciones transversales del viento a la losa superior y equilibran la excentricidad de la placa inferior de la viga. Además, se proporciona una celosía de arriostamiento horizontal en el plano del ala superior para evitar el pandeo general de la placa superior durante la construcción.

La anchura de la losa superior de hormigón armado es de 5,80 m para alojar una sola vía, y su espesor es de 0,30 m en la línea central y de 0,24 m en los bordes.



Figura 3. Puente de un vano con vano estándar de dos vigas

Para los vanos tipo más cortos (12 y 15 m de longitud de vano, tipología más numerosa de la traza), las vigas gemelas de un alma se sustituyen por dos vigas de sección cajón (Figura 4), eliminando así la necesidad de riostras horizontales intermedias. El canto de las vigas cajón es de 0,74 o 0,896.

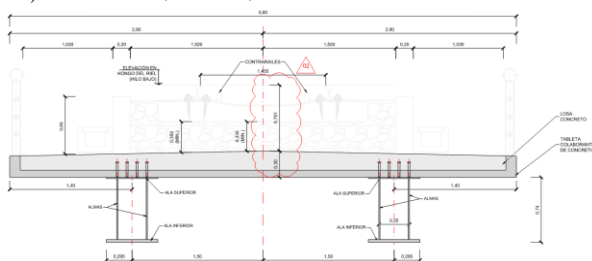


Figura 4. Sección transversal del tablero de vigas cajón gemelas



Figura 5. Puente de un vano con vano estándar de vigas gemelas de cajón

Los vanos tipo U constan de dos vigas gemelas de acero separadas 6,4 m entre ejes y una losa inferior de hormigón apoyada en vigas transversales (Figura 6) para soportar la vía. En esta tipología la losa inferior de hormigón no

contribuye a la flexión general del tablero, lo que no permite aprovechar la optimización de material de las secciones mixtas, redundando en unas cuantías de acero más elevadas que en el caso anterior. Por este motivo, esta tipología de tablero se ha empleado exclusivamente en vanos con limitaciones de gálibo vertical y en zonas en las que los condicionantes no permitían elevar la rasante de trazado. La losa inferior sí contribuye como cabeza de compresión a la flexión de las vigas transversales que transfieren las cargas del tráfico hacia las vigas principales laterales.

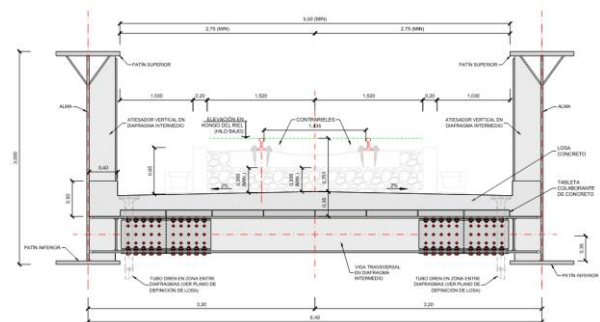


Figura 6. Sección transversal de un tablero en «U»

El canto de las vigas de acero es de 2,40, 3,00 o 3,40, dependiendo de la luz del vano. Ambas vigas están conectadas por montantes horizontales intermedios que, junto con la rigidización vertical de las vigas principales, conforman pórticos transversales que transfieren las acciones horizontales del viento y evitan el pandeo del ala superior de las vigas gemelas. La celosía horizontal de arriostramiento se proporciona en esta solución en el plano del ala inferior para transferir las acciones transversales del viento durante la construcción.

Los puentes deben cumplir estrictos requisitos relacionados con la resistencia a la fatiga debida al tráfico ferroviario. En consecuencia, el diseño correcto de todos los detalles ha sido crucial para no empeorar la

categoría de fatiga. A este respecto, la solución de dos cajones para claros de 12 y 15m ha resultado sumamente competitiva ya que, al reducir notablemente el número de soldaduras de elementos transversales (rigidizadores, diafragmas...) la resistencia a fatiga de estos elementos mejora sustancialmente, dando lugar a un ahorro significativo de acero estructural. La necesidad de una correcta ejecución de los detalles llevó a definir con absoluta precisión cada una de las placas, encuentros y soldaduras dentro de los planos de taller. Los detalles se centran en transiciones suaves de dimensiones y espesores, acabados circulares y tangentes de las chapas, rectificadas al ras en los extremos de las soldaduras, etc.

2.1.2 Subestructura: estrategia sísmica

La Línea K está situada en una de las zonas de mayor peligrosidad sísmica de México. En este escenario, uno de los aspectos fundamentales del diseño de puentes ha sido el mecanismo de transmisión de fuerzas sísmicas horizontales de la superestructura a la subestructura.

En cuanto a la transmisión de fuerzas horizontales se han desarrollado dos soluciones estándar asociadas a un diseño específico para la subestructura:

- Comportamiento semi-integral mediante continuidad de la losa superior.
- Topes sísmicos.

La solución semi-integral con continuidad de losa superior es la más extendida, utilizándose en todos los puentes de un vano y en puentes de varios vanos de hasta 80 ó 90 m de longitud total de puente. Esta estrategia consiste en transmitir los esfuerzos horizontales a los estribos a través de la losa superior, que es continua a lo largo de todo el puente (como se muestra en la figura 3).

La continuidad de la losa superior no influye en la flexión general del tablero, que en la sección de apoyos se debilita intencionadamente para formar una rótula, pero permite aprovechar la resistencia pasiva a la presión del terreno

situado detrás de los estribos para resistir las fuerzas longitudinales.

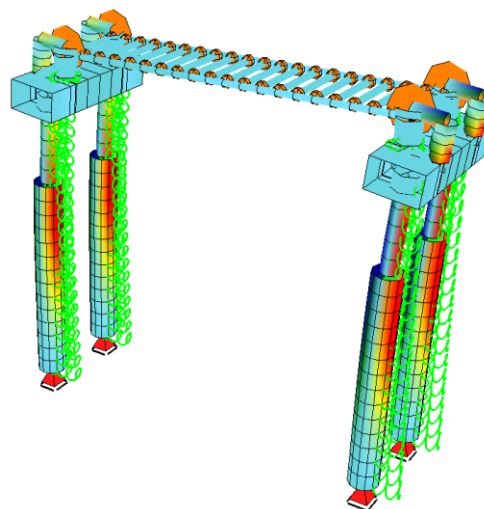


Figura 7. Modelo de cálculo de puente semi-integral

En el resto de puentes en los que la losa no es continua, los esfuerzos horizontales longitudinales se transmiten mediante topes. En el caso de los topes bidireccionales, cada vano se fija a una pila o estribo mediante un elemento metálico auxiliar embebido en el hormigón de la subestructura correspondiente. En cambio, cuando se utilizan topes de compresión, los vanos no se fijan a ningún elemento, y cada vano puede apoyarse bien en el tope de la pila anterior, bien en el de la pila posterior.

Cuando se utilizan topes longitudinales, la subestructura consiste en pilas de hormigón de un solo fuste con sección circular maciza y un encepado, habitualmente apoyado en cuatro pilotes de 1.20m ó 1.50m de diámetro. Por lo general, en estos casos la subestructura se ha diseñado mediante un análisis en desplazamientos, recurriendo a la filosofía de protección por capacidad con la disposición de rótulas plásticas en puntos concretos, como la parte inferior del fuste circular, limitando los esfuerzos máximos que se transfieren a la cimentación. Sólo en algunos casos particulares, en los que las limitaciones de altura de los pilares impedían la formación de rótulas plásticas, la subestructura se diseñó mediante un análisis elástico lineal.

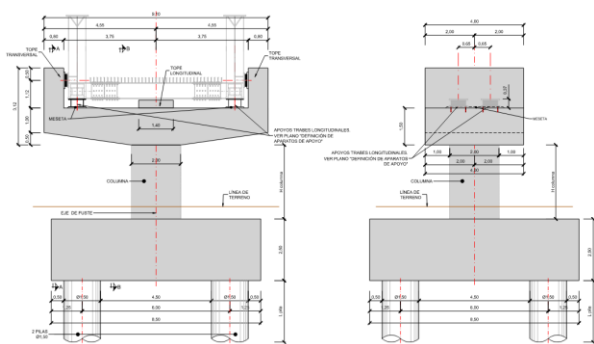


Figura 8. Pila tipo con fuste circular diseñada por capacidad

Para resistir las fuerzas horizontales transversales, todos los puentes tienen topes transversales de compresión en todos los ejes de apoyo, excepto los estribos con continuidad de losa superior, en los que las cargas transversales también se transmiten por la losa. Para los tableros de tipología bijácena, en los que el centro de masas se encuentra muy por encima del plano de apoyos, los topes transversales se completan con topes verticales antilevantamiento.

En lo que se refiere a la transmisión de las cargas verticales, en todas las soluciones las vigas de acero se apoyan sobre apoyos elastoméricos reforzados.

2.2 Proceso constructivo

Teniendo en cuenta el ajustado plazo de tiempo en el que debe completarse el diseño y construcción de un número tan elevado de estructuras, la tipología elegida para los puentes, con vanos simplemente apoyados, proporciona las ventajas clave: posibilidad de producción en serie; condiciones de ejecución en taller bajo condiciones supervisadas y con un control de calidad exhaustivo; y versatilidad de su proceso constructivo. Además, en el caso de los puentes de varios vanos, el diseño mediante vanos múltiples simplemente apoyados permite la ejecución simultánea de múltiples elementos estructurales (cimientos, pilares y tablero), sin tener que seguir un orden específico para el montaje de los vanos de un estribo a otro.

La solución utilizando sólo 18 tipos de vanos estándar para resolver 445 puentes - incluyendo puentes nuevos y puentes rehabilitados ha permitido estandarizar el proceso de producción en taller, resultando en una gran optimización de los tiempos de fabricación y construcción.

La estructura metálica de cada vano se fabrica completa en el taller y, posteriormente, se transporta por carretera a la obra ya terminada (Figura 9). De este modo, se agiliza la fabricación del tablero, se minimizan los trabajos a realizar en obra y se garantiza un control más exhaustivo de la ejecución de la estructura metálica.



Figura 9. Transporte de vano completo

Toda la estructura metálica de los puentes de la línea ferroviaria se fabrica en los talleres de RECAL en Guadalajara, con una cantidad total de acero estructural de unas 27.000 t. Para permitir el transporte de la estructura metálica completa, que cubre una distancia de unos 1.500 km, la sección transversal de los tableros se ha diseñado para ajustarse a las dimensiones máximas permitidas para el transporte. Por lo tanto, el canto de las vigas se ha limitado a 3 m y la anchura de las vigas exteriores, incluidos los rebordes, a 6 m, como se describe en la sección 2.

El proceso de producción de cada vano comienza con la fabricación de cada viga por separado y, posteriormente, ambas se ensamblan para conformar la viga gemela mediante la soldadura de diafragmas y cerchas de arriostramiento. Para los vanos más largos, cada uno se fabrica dividido en dos semivanos. La fabricación de cada semivano es como la descrita anteriormente para los puentes completos y, una vez arriostradas ambas semivigas gemelas, se

ensamblan ambos semivanos en uno solo (Figura 10).

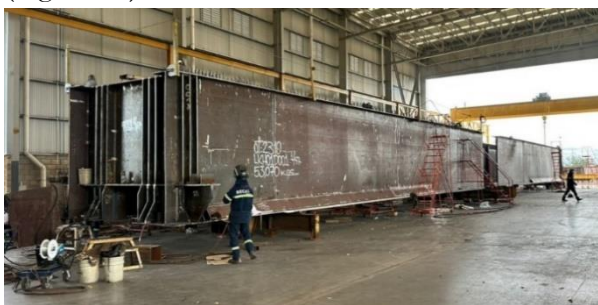


Figura 10. Ensamblaje de los medios vanos en un vano completo. Fuente: RECAL

Una vez en la obra, las vigas gemelas de acero se apilan bajo su posición definitiva con plintos provisionales y, a continuación, se izan con grúas (Figura 11).



Figura 11. Elevación de las vigas de acero

El proceso de producción y construcción de los vanos tipo U varía ligeramente, ya que no cumplen las limitaciones antes mencionadas para el transporte. Por ello, en este caso, cada viga gemela se fabrica, transporta a la obra e iza por separado (Figura 12). Después, ambas vigas se unen mediante el montaje de puntales horizontales y arriostramientos utilizando uniones atornilladas (como se muestra en la Figura 6).



Figura 12. Elevación independiente de cada viga gemela del vano en U

La secuencia de construcción de cada vano individual continúa con la colocación de las prelosas de hormigón de ancho completo (Figura 13), lo que permite colocar la armadura en toda la anchura de la losa a la vez y verter el hormigón sin utilizar cimbras. Además, las prelosas tienen aberturas que coinciden con la distribución de los pernos conectadores soldados en el ala superior de las vigas. Con todo ello, se puede industrializar la fabricación, agilizando y simplificando la construcción de las losas.



Figura 13. Prelosas de hormigón de vanos mixtos bijácenos.

Por último, se vierte la losa de hormigón (Figura 14) y se instalan la impermeabilización, el balasto y otros elementos de acabado.



Figura 14. Vertido de la losa superior

3 Rehabilitación de los puentes existentes

Como resultado de la inspección inicial realizada en las estructuras de la línea, se concluyó que los puentes a mantener y rehabilitar, teniendo en cuenta su importancia, estado de conservación,

edad de construcción y vida útil restante asociada, son los de tipología celosía metálica soldada y estructura metálica tipo U de construcción relativamente reciente (en el entorno de 15 años), que componen un total de 14 puentes. (Figura 15).



Figura 15. Vista general de cerchas soldadas y vanos tipo U a mantener

3.1 Plan de actuación para la rehabilitación de puentes

En general, pueden distinguirse tres tipos de intervenciones para la rehabilitación de puentes:

- Refuerzo total del puente.
- Refuerzo parcial de puentes.
- Refuerzo de la superestructura, total o parcial, con sustitución completa de la subestructura.

En primer lugar, en aquellos puentes constituidos en su totalidad por vanos de los tipos a mantener y con una subestructura en buen estado de conservación, se realizará un refuerzo total del puente. La intervención consiste en conservar toda la subestructura y toda la superestructura, reparándolas y reforzándolas.



Figura 16. Puente para rehabilitación total

Por otro lado, en puentes compuestos por vanos de diferentes tipologías y contruidos en

diferentes épocas, se realizará un refuerzo parcial del puente. En este caso, la intervención consiste en conservar la superestructura y la subestructura más recientes y sustituir las demás. Pueden ser necesarias operaciones especiales de apuntalamiento temporal para los vanos que se vayan a mantener y que estén apoyados en pilares que se vayan a sustituir.

El último tipo de intervención es un caso particular del anterior en el que no se puede rehabilitar ninguna parte de la subestructura, conservando la superestructura más reciente y sustituyendo la superestructura más antigua y toda la subestructura. Las nuevas cimentaciones se construirán desplazadas con respecto a las existentes para evitar interferencias y acelerar la construcción. Esto hace necesario el apuntalamiento longitudinal de los tableros a conservar en todos estos puentes.

La solución adoptada para los nuevos vanos a utilizar en los puentes rehabilitados que requieren la sustitución de parte de sus vanos son los vanos tipo U sin losa. La diferencia entre estos vanos y los vanos estándar tipo U utilizados en puentes nuevos es que no tienen losa de hormigón ni balasto, y la vía se apoya mediante traviesas de madera en el entramado metálico. Esto permite mantener el canto de las estructuras por debajo del nivel del carril, ya que al igual que en la nueva propuesta, los vanos existentes tienen las traviesas de ferrocarril directamente apoyadas sobre la estructura de acero.

3.2 Líneas generales de reparación y refuerzo

En cualquiera de los tres tipos de intervenciones descritas anteriormente, será necesario realizar operaciones de reparación y refuerzo de los vanos y subestructura mantenidos.

Se pueden distinguir dos líneas generales de actuación en función de su finalidad:

- Actuaciones dirigidas a reparar defectos relacionados con el deterioro y durabilidad de la estructura.

-Actuaciones de refuerzo de elementos no preparados para soportar acciones sísmicas, principalmente, y también acciones de tráfico.

En cuanto a la reparación de elementos, las actuaciones consistirán en: eliminación de óxido, pintura, reparación de grietas y pérdida de recubrimiento en elementos de hormigón, etc.



Figura 17. Rehabilitación de cerchas

Respecto al refuerzo de tableros, las actuaciones más relevantes son:

-Refuerzo en vigas transversales, montantes verticales y largueros por el incremento de sobrecarga ferroviaria.

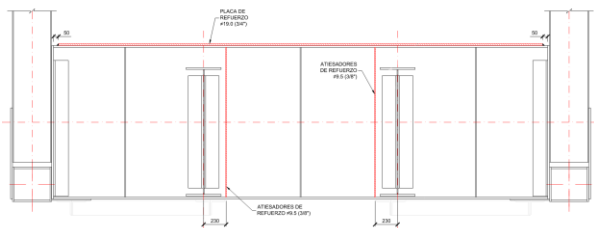


Figura 18. Refuerzo de vigas transversales

-Refuerzo de arriostramientos transversales de vigas de acero.

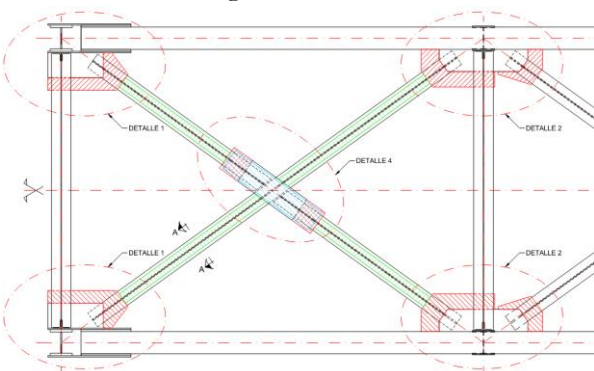


Figura 19. Detalle de refuerzo de arriostramientos transversales

-Refuerzo de los pórticos extremos de las celosías para transmitir las fuerzas sísmicas horizontales desde el plano superior de la celosía hasta los apoyos.

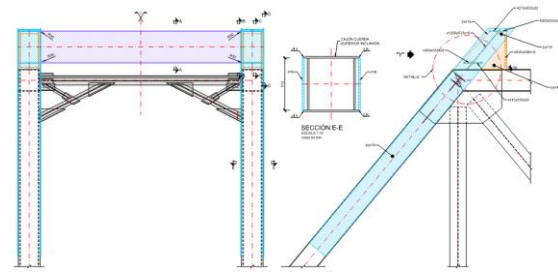


Figura 20. Detalle del refuerzo del marco extremo de la cercha

-Sustitución de los apoyos de acero existentes por nuevos apoyos elastoméricos.

-Instalación de nuevos topes longitudinales, transversales y de anti-levantamiento.

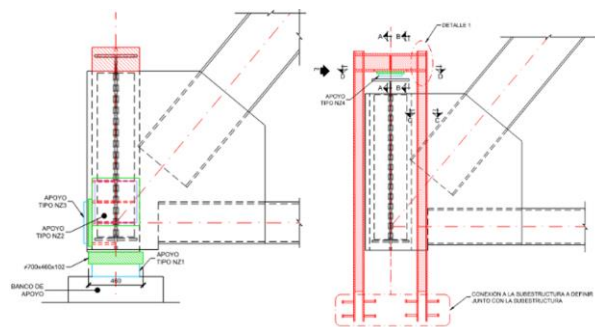


Figura 21. Nuevos topes longitudinales, transversales (izquierda) y de levantamiento (derecha) en una celosía.

Respecto al refuerzo de la subestructura, las actuaciones más relevantes son:

- Ejecución de nuevos pilotes y entramado de vigas horizontales para la transmisión de las cargas a la cimentación de nueva ejecución.
- Materialización de topes sísmicos, longitudinales y transversales.
- Ejecución de recrecidos en los fustes para la transmisión de cargas, especialmente las sísmicas, a la cimentación.

