

# Diseño, evaluación y ampliación de estructuras en proyectos de mejora de autopistas con carriles rápidos.

## I-77 Express Lanes.

*Design, evaluation and widening of bridges on express lanes projects. I-77 Express Lanes.*

Manuel A. Correia Santos<sup>a,\*</sup>, Ángela Martín Ochoa<sup>b</sup>, Javier Fernández-Dívar Sanchez<sup>b</sup> Iván Campo Rumoroso<sup>b</sup>, Roberto Escalona de la Fuente<sup>b</sup> y Óscar Ramón Ramos Gutiérrez<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. P.E. WSP Spain. US Projects.

<sup>b</sup>Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. WSP Spain. Bridge Department.

<sup>c</sup>Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos. Universidad de Cantabria

### RESUMEN

El proyecto I77 Express Lanes con una longitud de 26 millas amplía la capacidad de la autopista I77 con dos carriles rápidos en cada dirección. Las estructuras proyectadas incluyen varias tipologías, algunas de ellas poco habituales. La ponencia se centra en las complicaciones que aparecen para diseñar puentes compatibles con trazados existentes y futuros con la mínima interrupción del tráfico actual. Teniendo en cuenta que los proyectos de diseño, evaluación y ampliación de carreteras habituales en Estados Unidos son cada vez más frecuentes en España, y son un punto clave en la planificación actual de la infraestructura nacional, el aprendizaje obtenido será de gran ayuda.

### ABSTRACT

I77 Express Lanes project increases the capacity of the I77 highway along 26 miles adding two express lanes each direction. The designed structures include different structural types, some of them non-common. The paper is focus on the complexity of design new bridges taking into account the existing roadways and future roadways and, minimizing the interruption of traffic during construction. Design, evaluation and widening projects in US are becoming more frequent in Spain, and they are a key point in the national infrastructure plans. Therefore, lessons learned in this kind of projects may become very helpful.

**PALABRAS CLAVE:** Vigas prefabricadas, ampliaciones de puentes, pilas pórtico, AASHTO LRFD.

**KEYWORDS:** Precast Girders, Bridge Widening, straddle bents, AASHTO LRFD

## 1. Introducción

La Interestatal 77 es una autopista de trazado norte-sur ubicada en el este de Estados Unidos. A su paso por Carolina del Norte, el North Carolina Department of Transportation (NCDOT) sacó a licitación su ampliación en el entorno de ciudad de Charlotte, como proyecto

de Design&Build. I-77 Mobility Partners LLC ganó el proyecto y la construcción fue gestionada por Sugar Creek Construction LLC.

El proyecto I-77 Express Lanes, con una longitud de 26 millas (42 km), amplía la capacidad de la autopista con uno o dos carriles

de peaje. Los nuevos carriles pretenden mejorar la conectividad entre Charlotte y las regiones de Lake Norman, utilizando un sistema de tarifas variables en función del tráfico. Con varios tramos ya abiertos, se espera que el proyecto finalice a principios de 2020.

Las 18 estructuras diseñadas por WSP Spain- APIA XXI en el proyecto I77-Express Lanes incluyen las siguientes tipologías.

- 8 puentes nuevos de vigas prefabricadas de hormigón pretensado.
- 2 rehabilitaciones y ampliaciones de puentes de vigas metálicas doble T.
- Rehabilitación y ampliación de un puente de vigas prefabricadas de hormigón pretensado.
- 5 marcos cerrados, 4 de ellos para el paso de agua y uno de paso peatonal.
- 1 marco cerrado de tránsito vehicular.

Los proyectos de ampliación de capacidad de una vía y en particular el proyecto I-77 Express Lanes tiene una serie de condicionantes añadidos que se deben tener en cuenta a la hora de proyectar las estructuras. En primer lugar, los puentes diseñados deben ser compatibles con el trazado proyectado y con el trazado existente que formará parte del proyecto. Por otro lado, durante la construcción se debe minimizar las interrupciones del tráfico. Al tratarse de una vía en uso se debe evitar en la medida de lo posible afectar al tráfico existente. Además, los puentes diseñados también tienen que ser compatibles con el trazado futuro. En Estados Unidos, en algunos proyectos se define un trazado futuro conocido como “ultimate”. Este trazado se corresponde con la ampliación de capacidad de la vía en función del tráfico esperado. Este trazado debe ser respetado y las estructuras proyectadas deberán ser compatibles.

La ponencia se centrará en el diseño de las estructuras más singulares del proyecto desde un punto de vista del proceso constructivo.

## 2. Rehabilitaciones y ampliaciones

Se ha proyectado la rehabilitación de tres puentes en el enlace entre la I-77 y la I-85. Dos de los puentes, el 111E y 113W datan de principios de los años 2000 y se construyeron durante el proyecto de construcción de un carril de alta ocupación HOV. El tercero de ellos, 110W data de finales de los años 60, y fue ampliado en los años 90. Materializa el cruce de la calzada dirección sur sobre la calzada dirección norte (SBL over NBL).

### 2.1 SBL over NBL

Se trata de un puente mixto de aproximadamente 131 m (429.5 ft) de longitud dividido en un vano central de 58.6 m (192.25 ft) y cuatro vanos de aproximación de longitudes que varían entre los 14 y los 21.4m (47-71.25 ft). Los vanos laterales están conformados por perfiles comerciales tipo WF, reforzados en el caso del proyecto original de 1969; mientras que el vano central está formado por vigas armadas. Cada uno de los vanos tiene 10 vigas, 7 del proyecto original y 3 del primer proyecto de ampliación. Una de las singularidades de este puente radica en su fuerte esviaje, que varía entre los 51 y los 72 grados, medidos respecto a la perpendicular al eje del puente.



Figura 1. Puente SBL over NBL.

Antes de proyectar la ampliación, el primer paso fue realizar la evaluación del puente existente. Para ello se llevó a cabo la inspección visual del puente y posteriormente se realizó la evaluación de la estructura de acuerdo con el *Manual for Bridge Evaluation* [1].

A partir de la inspección visual se pudo desarrollar el proyecto de rehabilitación. En general, el estado del puente era satisfactorio, y únicamente se observaron deficiencias en juntas, barreras y apoyos. En el caso concreto de los apoyos, se proyectó su sustitución por otros acordes a los estándares actuales, debido a que los apoyos existentes presentaban ciertas deficiencias y a que se trataba de apoyos que no satisfacen los requerimientos de seguridad actuales.



Figura 2. Apoyos puente existente.

La evaluación estructural también resultó satisfactoria, y por lo tanto se pudo proceder a ampliar el puente. El ancho a ampliar eran 11 m (36 ft). A pesar de que por requerimientos de trazado no fue posible que la nueva traza fuera paralela al eje del puente, y dada la complejidad geométrica del puente existente, se optó por una ampliación de ancho constante y con un peralte en prolongación del existente.

Se propuso la construcción de 6 nuevas vigas por vano, espaciadas 1.8 m. (5.91 ft) con el fin de independizar las nuevas vigas de las existentes, la primera de las vigas se dispuso a 1.5 m (5 ft) m del tablero existente, lo cual, sumado al hecho de que hubiera más de 3 vigas, permitió evitar los diafragmas de conexión entre vigas.

El fuerte esvía de la estructura obligó a analizar distintas estrategias para la colocación de los marcos. Siguiendo las recomendaciones del *NCHRP Report 725* [2] se modeló la estructura

utilizando elementos tipo lámina en losa y almas y tipo viga en el resto de elementos. Gracias a este análisis se pudo determinar que la utilización de marcos alternos reducía los esfuerzos en los marcos, pero que era necesario colocar los marcos más cercanos al apoyo después de colocar toda la carga muerta para poder controlar la flexión en la platabanda inferior. Adicionalmente, se pudieron obtener las contraflechas con un nivel de precisión superior al de los modelos de vigas, y teniendo en cuenta el proceso constructivo y la deformada final de las vigas tan relevante en estos puentes.

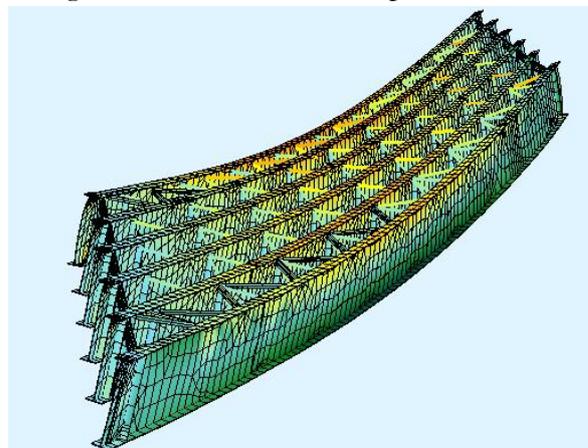


Figura 3. Modelo estructural.

Además de las singularidades propias del puente y su tipología, al tratarse de una ampliación hubo que tomar en cuenta consideraciones adicionales derivadas de su proceso constructivo:

- Durante la fabricación, se han de tener en cuenta en las contraflechas tanto el proceso constructivo con exactitud, como la rasante existente, dado que al finalizar la construcción las losas de los tableros deben quedar a la misma cota.
- En la unión entre ambos tableros se deja una franja de alrededor de 1 m que es lo que se hormigona en última fase, cuando las cargas muertas han actuado y la flecha diferida se ha estabilizado. Esto sucede aproximadamente un mes después de la colocación de las cargas muertas. La unión permite además reducir los problemas causados por las vibraciones debidas al tráfico existente en el

tablero, principalmente durante el hormigonado, dado que en ningún momento se corta el tráfico en el tablero existente.

## 2.2 Puentes HOV

Los puentes de la HOV Lane son dos: uno de ellos compuesto por 2 vanos de hormigón de alrededor de 38 m y el otro por un vano biapoyado mixto de 33 m. de longitud. En ambos casos la anchura del puente existente era de 9.34 m y contaban con 4 vigas. En la siguiente figura se pueden observar los puentes en el carril en construcción de la izquierda.



Figura 4. Puentes HOV Lanes.

Al datar del año 2003, el estado de conservación era bueno y el proyecto de reparación contemplaba únicamente reparación de pequeños desperfectos. La evaluación estructural también fue satisfactoria, si bien hubo que considerar el puente de hormigón como biapoyado, a pesar de ser continua a carga viva, tal y como permite la AASHTO LRFD [3].

La ampliación en ambos casos se realizó añadiendo dos vigas en el lado derecho, conectadas en este caso con el tablero existente. Se tomaron en cuenta las consideraciones explicadas para el caso del SBL over NBL.

En las tres ampliaciones, la conexión entre losas se realizó cortando la losa existente y perforando unos agujeros donde se dispusieron

las barras de espera tal y como se muestra en la siguiente figura:

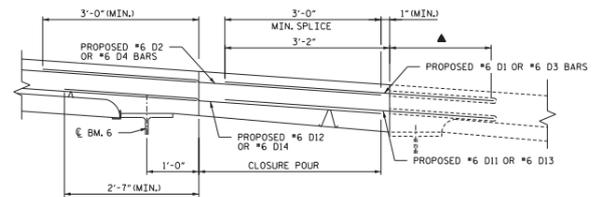


Figura 5. Detalle de conexión.

## 3. Pasos superiores con rampas de salida

En proyecto I-77 Express Lanes incluye dos pasos superiores con rampas laterales que sirven de entrada y salida de los carriles rápidos de peaje de la autopista.

Ambas estructuras soportan una intersección controlada por semáforos que permite la entrada y la salida de los nuevos carriles de peaje en ambos cruces. En los dos puentes se permiten a totalidad de los movimientos junto con el paso de peatones. Los radios de giro necesarios hacen que en las dos estructuras las rampas sean de ancho variable. En cada uno de los puentes se ha resuelto con una solución distinta.

Las dos estructuras son puentes de vigas prefabricadas de hormigón pretensado con ciertas particularidades que se analizan de forma individual.

Estas estructuras, no muy habituales en Estados Unidos, lo son menos en Europa y España donde no es común ampliar las autopistas con carriles interiores.

Los puntos problemáticos comunes a ambas estructuras son la adaptación de un puente no convencional a los estándares habituales para puentes de vigas junto con la necesidad de adaptarse al proceso constructivo en fases necesario para afectar lo menos posible al tráfico.

### 3.1 Puente sobre I-77 en Hambricht Road

El puente sobre I-77 en Hambricht Road es un paso superior con rampas laterales que, además de permitir el cruce de una vía secundaria, crea una intersección semaforizada de la vía secundaria con los nuevos carriles rápidos del proyecto.

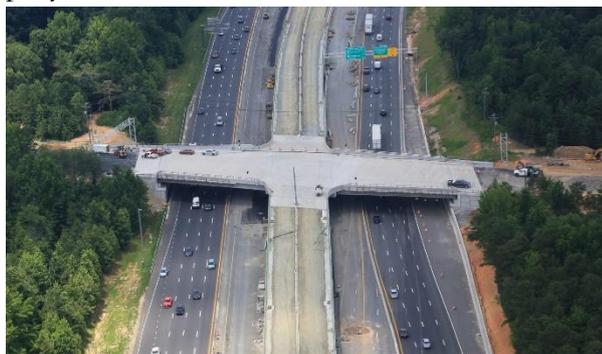


Figura 6. Puente sobre I-77 en Hambricht Road.

Hambricht consiste en un puente de vigas prefabricadas de hormigón pretensado. Debido a su longitud, 90.7 m (296 ft), fue necesario establecer 3 vanos de 36.25+16+31.1 m (119+52+125 ft). Además, la distribución irregular de luces debida a la geometría ha hecho necesario el empleo de losa de continuidad, frente a la continuidad a carga viva a través de un diafragma de hormigón más habitual en Carolina del Norte.

Esta tipología permite además adaptarse de una forma adecuada a los requerimientos del trazado, creando una conexión adecuada del puente principal con las rampas centrales. Los vanos laterales son vanos de ancho variable donde se abanican las 12 vigas tipo 72” Prestressed Concrete Modified Bulb Tee. El vano central consta de 12 vigas del mismo tipo y se proyectó recto para una mejor conexión con las rampas laterales. Los estribos son estándar y las dos pilas centrales consisten en pilas pórticos con 7 fustes circulares y cimentación profunda mediante encepados de perfiles metálicos.

Las rampas laterales conectan las rampas de salida de la autopista I-77 con el enlace. Ambas rampas se resuelven mediante losas de hormigón armado apoyadas sobre goma

elastomérica y atadas con barras verticales. Las losas se apoyan en los estribos y en una pila lateral pórtico con 4 fustes y cimentación similar a las pilas principales. La losa se conecta con la estructura principal gracias a un voladizo. En la unión entre ambos se ha dispuesto una junta de dilatación.

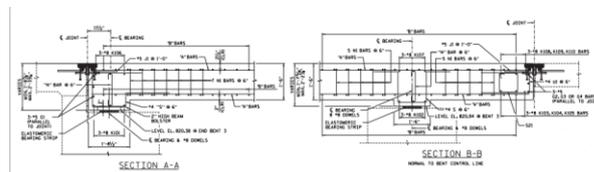


Figura 7. Rampa lateral de acceso.

Para adaptar las rampas laterales al acuerdo vertical del puente principal, la losa armada se diseña con un canto variable en la zona de conexión. Además, la geometría de la losa se definió en prolongación del puente principal.

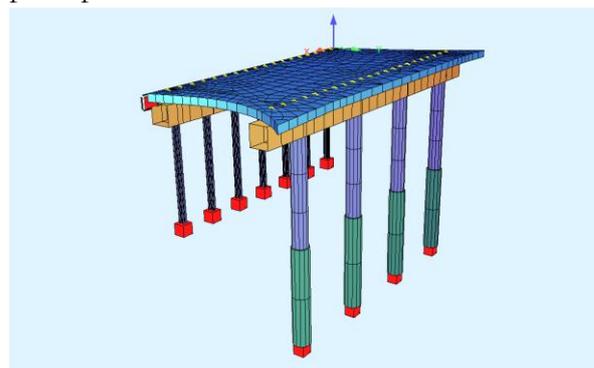


Figura 8. Modelo de las rampas de acceso.

### 3.2 Puente sobre I-77 en Lakeview Road

El puente sobre I-77 en Lakeview Road es un puente similar a Hambricht, un paso superior con rampas laterales que permite el cruce de Lakeview Road al mismo tiempo que permite la entrada y la salida de la Interestatal 77.

La estructura consiste en un puente de vigas prefabricadas de hormigón pretensado. La geometría en este caso resultó más favorable, lo cual permite materializar el puente principal mediante 2 vanos rectos de 39 m (128 ft) cada uno y 10 vigas tipo 72” Prestressed Concrete Modified Bulb Tee. El puente principal cuenta con estribos estándar y una pila pórtico con 5 fustes circulares y cimentación pila-pilote.

En Lakeview las rampas laterales se resuelven con un vano de ancho variable que se adapta a los giros requeridos por trazado. El vano consta de 10 vigas prefabricadas abanicadas de hormigón pretensado tipo AASHTO TYPE II. Las rampas laterales cuentan con estribos estándar.

Una de las circunstancias que condicionó el diseño de Lakeview fue el proceso constructivo. En la ubicación donde ahora se encuentra el nuevo puente sobre I-77 en Lakeview Road se encontraba previamente un puente existente con menor capacidad.

Los objetivos de las etapas constructivas propuestas fueron el de mantener siempre en tráfico de la vía secundaria y mantener el máximo número de carriles de la Interestatal 77 en funcionamiento.

Para resolver la problemática en la construcción se decidió construir en puente por fases.

En una primera y con el puente existente en uso se construyó la mitad del tablero principal con su respectiva subestructura. Una vez abierto el tráfico en esta parte nueva del puente, se demuele el puente existente y se construye el resto del puente principal y se conecta.

Otra de las particularidades de este puente es que, para no interrumpir el tráfico inferior, y para que las pilas laterales respetarán los gálibos de la I-77, se decidió utilizar pilas pórtico de sólo 2 fustes e importantes voladizos. La sección elegida para el cabezal fue una sección en L, que además de reducir el gálibo, permite una adaptación adecuada al acuerdo vertical del puente principal mediante la variación de la altura de la L.



**Figura 9. Imágenes proceso constructivo Lakeview.**

## 4. Pasos superiores

Aparte de los pasos superiores con rampas mencionados en el anterior apartado, el proyecto incluía dos pasos superiores más a remplazar: Oaklawn y La Salle. WSP Spain-APIA XXI se encargó del diseño de Oaklawn.

El puente existente de Oaklawn consistía en 5 vanos mixtos cuyas longitudes variaban entre los 12 y los 40 m.



Figura 10. Puente existente Oaklawn.

Por requerimientos de contrato, resultaba necesario mantener el tráfico sobre el puente y bajo el puente en todo momento.

Para mantener el tráfico sobre el puente, se decidió demoler la mitad del puente, construir el nuevo tablero, demoler el resto del puente y terminar el tablero, de manera muy similar a Lakewiew. En este caso, por limitaciones de espacio y condiciones de geometría, fue necesario un estudio pormenorizado de todos los elementos del puente. En el tablero se determinó el número mínimo de vigas del tablero existente para resistir un camión HS-20 en Operating (Factor de carga viva según la AASHTO LRFD [3] de 1.35 en vez de 1.75) y el voladizo máximo en construcción. La geometría y disposición de las vigas del nuevo tablero dependió del contorno que definía esta limitación y una distancia de seguridad adicional. Además, fue necesario instalar apoyos auxiliares en algunas de pilas para compensar la

eliminación de columnas por condiciones de geometría.

Respecto al mantenimiento del tráfico inferior, fue necesario ajustar la distribución de luces y carriles bajo el tablero para evitar que la superposición de las pilas existentes con las pilas nuevas que se producía durante la construcción limitara el número de carriles en las vías principales.

La solución final consistió en un puente de 5 vanos formado por vigas de hormigón de distinto canto para ajustarse a los requerimientos de trazado. La distribución de luces pasó de  $12.34+28.52+39.64+20+15.67$  m en el puente existente a  $19.5+39.72+19.7+37+35.5$  m en el puente propuesto.



Figura 11. Construcción Oaklawn.

## 5. Rampas sobre un nudo existente

En proyecto I-77 Express Lanes incluye la ampliación del enlace de conexión entre la Interestatal 77 y la Interestatal 277 en Charlotte. De los tres puentes nuevos que se proyectan en el enlace, WSP Spain-APIA XXI ha sido responsable de las dos nuevas rampas que dan acceso desde la Interestatal 277 a los nuevos carriles rápidos de peaje de la I-77. El enlace inicial se transforma en un enlace de tres niveles que pasarán a ser cuatro con el trazado futuro de “ultimate”.

La problemática principal en el diseño de la ampliación de un enlace es la falta de espacio: ya sea en vertical a nivel de gálibos como en horizontal a nivel de apoyos. Las dos rampas o

flyovers han sido diseñados para adecuarse al trazado proyectado y para respetar el trazado futuro.

Las dos estructuras son puentes de vigas prefabricadas de hormigón pretensado. Para ajustarse a los gálibos disponibles se ha utilizado una viga tipo AASHTO TYPE IV. El flyover 107E consta de 6 vanos con luces de entre 31.7 (104 ft) y 37.8 m (124 ft) y una longitud total de 204.7 m (671.5 ft). El flyover 107W tiene 13 vanos con luces comprendidas entre los 25.6 m (84 ft) y 34.4 m (113 ft) y una longitud total de 389 m (1276.5 ft). La sección tipo consta de 4 o 5 vigas en función de la luz.

Como se ha mencionado previamente, la solución habitual en Carolina del Norte es el empleo de continuidad a carga viva reduciendo en número de juntas. Sin embargo, debido a la presencia de cabezales en T invertida para reducir el gálibo, fue necesario proponer el empleo de losas de continuidad. Estos detalles, si bien son habituales en otros países como España, no tenían precedente en el rango de las luces medias en Carolina del Norte.

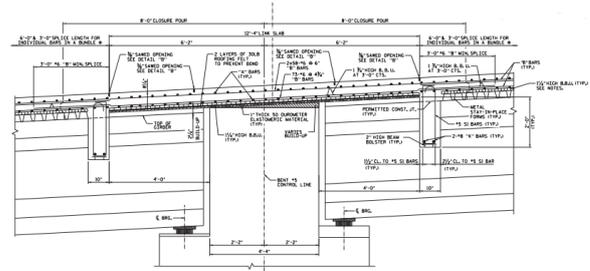


Figura 12. Detalle losa de continuidad

En ambas subestructuras los estribos son estándar y respecto a las pilas cuando no existen limitaciones, la tipología preferida es la solución con pila pilote de varios fustes, también conocida como “multicolumn”. En la ampliación de enlaces u otras obras congestionadas es preferible el uso de pilas martillo con un solo fuste habitualmente rectangular. Cuando es necesario permitir el paso de una o varias calzadas directamente debajo de la nueva estructura, la subestructura se resuelve con un pórtico de dos pilas con la separación suficiente entre ellas.

En las dos rampas encontramos los tres tipos de subestructura mencionados según las necesidades de cada caso.



Figura 13. Imagen rampas sobre nudo existente e indicación “ultimate”





Figura 16. Enlace 277.

En la pila 3 del flyover 107E encontramos un caso particular de pórtico. Se proyecta un pórtico de hormigón armado, pero diseñado y calculado para poder ser ampliado en el futuro, pasando a pórtico postesado. Con el trazado proyectado la pila mencionada no tiene ninguna interferencia con las calzadas inferiores, pero si en el futuro. En consecuencia, no resultaba posible proyectar para el estado actual un pórtico compatible con el “ultimate” porque la consideración de ambos trazados se traducían en un pórtico de más de 40 m, fuera del rango habitual de empleo.

La solución elegida consistió en proyectar un pórtico armado en lugar de una pila convencional con objeto de que su modificación pueda llevarse a cabo sin cortar el tráfico sobre la estructura o hacerlo durante el menor tiempo posible. Para ello se dispone un pórtico armado con las vainas colocadas para que en el futuro y tras su ampliación pueda ser postesado.

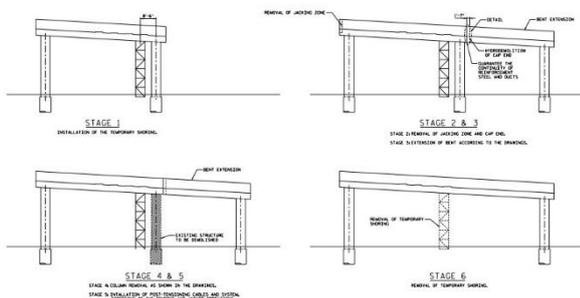


Figura 17. Fases del pórtico ampliable.

## 5. Resumen y Conclusiones

Las tipologías y soluciones aquí mostradas permiten dar solución a los distintos

condicionantes y problemáticas que se dan durante los proyectos de ampliación y construcción de carriles nuevos en vías existentes.

Los proyectos de evaluación, rehabilitación o ampliación son uno de los ejes de la planificación de infraestructuras a nivel nacional, y por tanto el desarrollo de este tipo de proyecto aportan una experiencia y un aprendizaje de gran valor.

### Agradecimientos

Agradecer al equipo técnico de Ferrovial liderado por Luca Redaelli su apoyo durante todas las fases del proyecto.

### Referencias

- [1] AASHTO Manual for Bridge Evaluation, 2nd Edition with 2011, 2013 and 2014 Interim Revision, AASHTO, EEUU.
- [2] NCHRP Report 725 Guidelines for Analysis Methods and Construction Engineering of Curved and Skewed Steel Girder Bridges, Transportation Research Board, USA, 2012.
- [3] AASHTO LRFD, 6th Edition, 2012, AASHTO, EEUU.