

Bases de diseño y tipologías de puentes: Autopista R7 en Bratislava

Basis of the design, and bridge typologies: R7 highway in Bratislava

Alberto Fernández Álvarez ^a, Ángel Carriazo Lara ^b, Álvaro Mazariegos Borobio ^c,
Juan Carlos del Olmo González ^d, Wojciech Włodzimirski ^e

^aIngeniero de proyectos. Torroja Ingeniería SLP. ICCP.

^bDirector técnico. Torroja Ingeniería SLP. ICCP.

^cIngeniero de proyectos. Torroja Ingeniería SLP. ICCP.

^dIngeniero de proyectos. Torroja Ingeniería SLP. ICCP.

^eStructures design manager D4R7. Ferrovial Agroman S.A. ICCP.

RESUMEN

La D4R7-Bratislava Bypass es un proyecto PPP para el diseño, construcción, financiación y operación de 27 km de la autopista D4, que circunvala Bratislava, y de 32 km de la autopista radial R7, adjudicado en el año 2016 a Ferrovial Agroman - PORR. En este artículo se describen los puentes diseñados en la R7 por Torroja Ingeniería S.L.P, y se comparan con las prácticas habituales de la ingeniería estructural de Eslovaquia.

ABSTRACT

The D4R7- Bratislava Bypass is a PPP project, which comprises the design, construction, financing and operation of 27 km of the D4 motorway around Bratislava, Slovakia, as well as of 32 km of the R7 expressway, awarded in 2016 to Ferrovial Agroman - PORR. This article describes the bridges designed in the R7 by Torroja Ingeniería S.L.P, and compares them with the common practices of structural engineering in Slovakia.

PALABRAS CLAVE: D4R7, Bratislava, Puentes, Vigas.

KEYWORDS: D4R7, Bratislava, Bridges, Beams.

1. La autopista R7

La D4R7-Bratislava Bypass es un proyecto que comprende la construcción de unos 59 km de autopista, 14 enlaces, y más de un centenar de nuevas estructuras.

La R7 se corresponde con la radial de 32 km de longitud que, partiendo de Bratislava, se aleja en dirección sudeste del núcleo urbano. Se divide en tres tramos diferenciados.

El primer tramo, Bratislava Prievoz - Ketelec, tiene una longitud de 6.3 km, y 15 estructuras. Comienza en el enlace de Prievoz y salva un canal de agua llamado Malý Dunaj, para acabar

en el enlace de Ketelec, donde la R7 conecta con la D4. Son de interés en este tramo el enlace de Prievoz, el enlace de Ketelec, y el puente de la Refinería, que se sitúa junto a las instalaciones de la Slovnaft, la compañía eslovaca de refinación de petróleo.

El segundo tramo, Ketelec - Dunajská Lužná, tiene una longitud de 8.4 km y extiende la autopista hasta el enlace de Dunajská Lužná. En este tramo se incluyen 10 estructuras.

El tercer tramo, Dunajská Lužná - Holice, tiene una longitud de 17.4 km, y cuenta con 12 puentes.

2. Puentes en Eslovaquia

2.1 Contexto histórico

Eslovaquia es un país soberano desde el año 1993. Miembro de la Unión Europea desde el año 2004.

Si bien la formación del estado es reciente, la ingeniería de puentes de este país es heredera de una larga tradición.

Muchas de las estructuras construidas antes de la Segunda Guerra Mundial fueron verdaderamente singulares para su época, como por ejemplo el Viaducto Ul'anka, que con 55 metros de luz fue el mayor arco de hormigón armado para un puente ferroviario en Europa del Este (construido en el año 1939).

Sin embargo, durante la Segunda Guerra Mundial se destruyeron en torno al 70% de los grandes puentes preexistentes en aquella época.

Las precarias condiciones que siguieron a la guerra dieron lugar a la proliferación de muchos puentes temporales, que posteriormente, poco a poco, fueron sustituidos por otros ya permanentes.

Se contabilizan hoy en día unos 23000 puentes en total [1]. La distribución por décadas en las que su construcción fue completada es la que sigue:

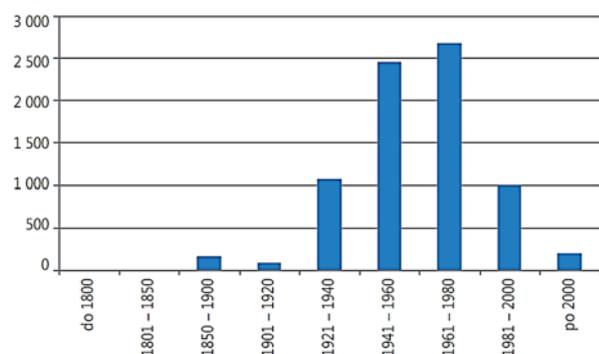


Figura 1. Fechas de construcción de los puentes existentes en Eslovaquia.

2.2 Puentes convencionales

En la actualidad el sector de la construcción se encuentra en un proceso de modernización, auspiciado por la entrada en vigor de los Eurocódigos en el año 2010.

La mayoría de los puentes convencionales construidos en la última década corresponden a la tipología de vigas prefabricadas de hormigón. Los orígenes de esta tipología en el país se remontan a la década de los 50, siendo la I-62 la primera viga de sección normalizada tipo doble-T.

A partir de la implementación de los Eurocódigos se introduce el HPC (High Performance Concrete) en la fabricación de vigas prefabricadas. Su uso hasta entonces había sido muy limitado, pues no estaba cubierto por las normativas locales STN.

El primer fabricante que introduce una serie de vigas con hormigón C55/67 es Doprastav, con la serie DPS. Son vigas de canto máximo 1.40 m, típicamente espaciadas entre sí 1.50 metros, para una luz máxima de 30 metros [2].

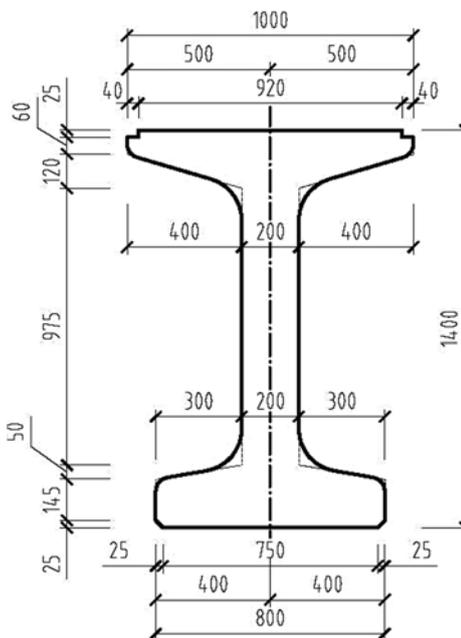


Figura 2. Sección tipo de viga. Doprastav. Serie DPS.

Para luces mayores, de hasta 42 metros, se ensamblan varios tramos de vigas aplicando un postesado que le da continuidad al conjunto.

Dada la elevada anchura de las alas superiores de las vigas, las prelosas suelen ser de dimensiones reducidas, no colaborantes, y se apoyan sobre un cajeadado en el borde del ala superior.

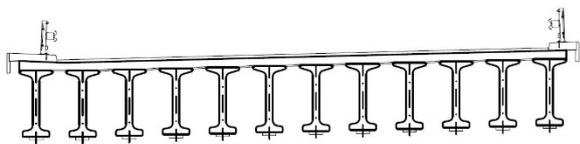


Figura 3. Sección transversal típica de puente de vigas en Eslovaquia.

Los tableros de vigas se resuelven típicamente en Eslovaquia con diafragmas de igual anchura que el tablero, tanto en estribos como en pilas.

Una costumbre muy arraigada consiste en disponer aparatos de apoyo tipo POT entre el diafragma de tablero y el elemento de subestructura.

Se aplica tanto en pilas, como se ilustra a continuación.



Figura 4. Detalle de aparatos de apoyo tipo POT en pilas.

Como en estribos, donde se dejan los apoyos de neopreno provisionales embebidos dentro de un diafragma, para luego sustentar el tablero sobre aparatos de apoyo tipo POT.



Figura 5. Detalle de estribos con diafragma en Eslovaquia.

3. Detalles constructivos en puentes de la R7

3.1 Innovación en el diseño de las vigas

Como parte de los trabajos de redacción del Proyecto Constructivo de los puentes tanto de la D4 como de la R7, se efectuó el diseño *ad hoc* de un nuevo tipo de viga que permitiese superar las limitaciones de los catálogos existentes.

Establecidos unos requisitos de durabilidad caracterizados por la clase resistente C50/60 XC4, XD3, XF2 del hormigón de acuerdo con Eurocódigo 2, se determinaron unos espesores de recubrimiento de 5 cm en las superficies expuestas.

Se estudiaron en detalle las concentraciones de tensiones en la zona de transmisión del pretensado, y se dimensionó consecuentemente la armadura necesaria frente a fenómenos locales (bursting, spalling).

Se definieron el número máximo de cordones rectos a disponer en el ala superior e inferior de cada viga. Para aumentar la cuantía de pretensado, incrementar el alcance y mejorar la eficiencia de las vigas se dispusieron cordones envainados en ambos extremos.

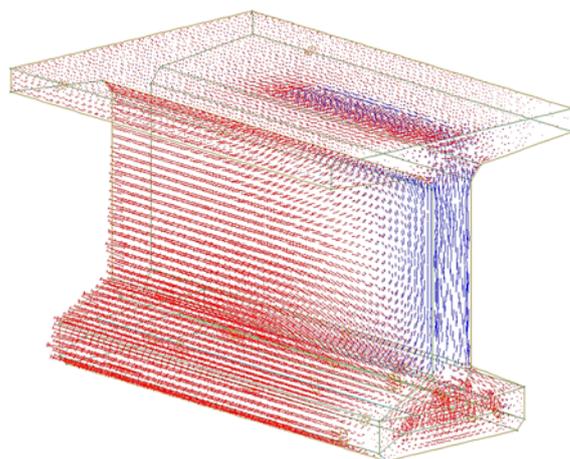


Figura 6. Tensiones principales en el extremo de la viga, en la zona de transmisión de la fuerza de pretensado.

Como resultado de este estudio se generó un nuevo catálogo de vigas, dividido en una serie de cantos reducidos (800 - 1000 mm), y otra de

cantos elevados (1200 - 1900 mm) con los que se alcanzan luces de vanos de hasta 38 metros.

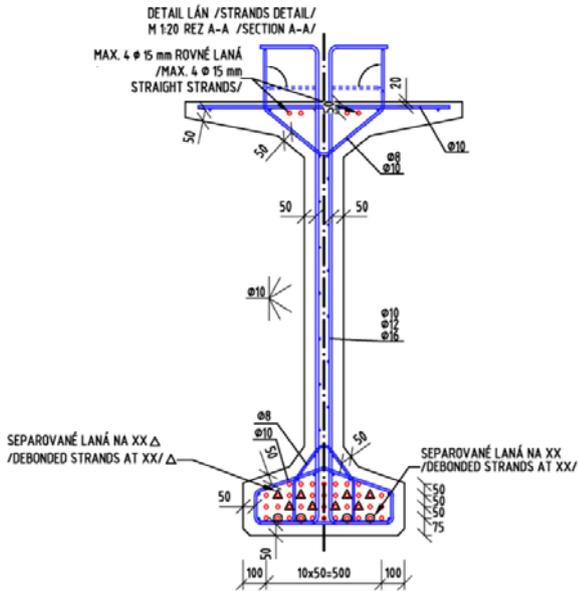


Figura 7. Sección tipo de las vigas desarrolladas para D4R7.

Paralelamente se diseñaron prelasas colaborantes de hormigón armado, con armado en celosía, que permitieron incrementar los interejes entre vigas hasta los 2.50 metros.

3.2 Diseño de los diafragmas de tablero

Con el fin de reducir los costes y simplificar la construcción, se decidió sustituir el detalle eslovaco de diafragma apoyado en aparatos de apoyo tipo POT, por una solución alternativa.

El criterio de diseño a considerar, para el dimensionamiento de los diafragmas del tablero, es la situación sísmica. Los anejos nacionales a los Eurocódigos establecen un espectro de demanda sísmica tal, que el comportamiento transversal del tablero ha de ser objeto de estudio.

Se diseñan diafragmas parciales en tablero, que unen solidariamente las dos vigas centrales con la losa, y cuya forma se adapta a la de los tope que se sitúan en pilas y estribos.

Se permite cierta holgura entre diafragma y tope, para que pueda existir desplazamiento libre bajo deformaciones impuestas o cargas de servicio.

En caso de evento sísmico, el tope coarta los desplazamientos transversales del tablero, e impide que este se caiga.

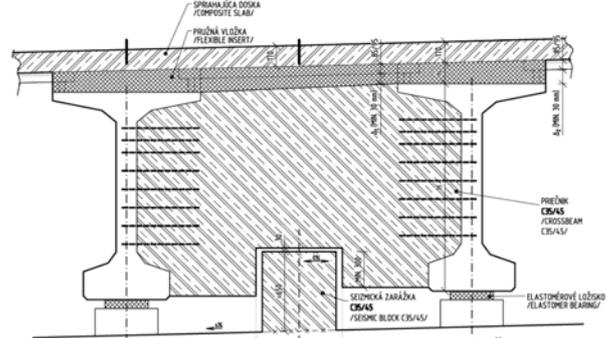


Figura 8. Diafragmas parciales en tableros de puentes en D4R7.

La presencia de estos diafragmas evita que el resto de vigas del tablero trabajen como pórtico frente a cargas transversales.

3.3 Diseño de los estribos anclados al terreno

Los terraplenes de la R7 generalmente son contenidos por muros de tierra estabilizada mecánicamente con flejes de tipo polimérico. Al llegar a una estructura, estos muros se cierran en vuelta, pasando por delante de los cargaderos.

En algunos sectores de la autopista R7 se precisó dotar de cimentación profunda a los estribos de los puentes. En esos casos, el pilote se ejecutó a través del material de relleno en el trasdós del muro.

Como criterio de diseño, se optó por cambiar a flejes de tipo metálico aquellos muros debajo de estribos, por ser éstos menos deformables. Y, adicionalmente, disponer flejes metálicos anclados en el propio cargadero, para reducir las flechas en cabeza de los pilotes.



Figura 9. Flejes en cargaderos de estribos

4. Los puentes de la R7

4.1 Puente de la Refinería



Figura 10. Puente de la Refinería junto a las instalaciones de la Slovnaft (Octubre 2019).

El Puente de la Refinería permite el paso de la R7 sobre el canal Malý Dunaj, y sobre una futura línea de ferrocarril. Recibe su nombre por la proximidad a una refinería de petróleo.

Consiste en un puente de 8 vanos de 202 metros de longitud total que soporta la calzada dirección norte. Y en paralelo otro puente, de 6 vanos, de 176 metros de longitud total, que soporta la calzada dirección sur.

Los tableros se resuelven con vigas pretensadas de canto 1.70 metros, espaciadas 2.43 metros entre sí, para una luz máxima de 35 metros.

El diseño originalmente planteado por parte de la administración, en la fase de concurso, consistía en dos puentes de sección cajón de hormigón pretensado, de 823 y 810 metros de longitud, con una luz máxima sobre el canal de 76 metros.

Se opta por reducir en lo posible la longitud de puente necesaria, conteniendo los terraplenes resultantes en los accesos con muros de tierra estabilizados mecánicamente.

El diseño de la subestructura se adapta a la gran cantidad de canalizaciones y conducciones de agua y gas presentes en el emplazamiento. Se definen pilas porticadas, con cargaderos tipo T-invertida sustentados sobre pilas-pilote.

La posición de las pilas mantiene un ritmo constante a lo largo del puente, solo alterado allí donde los pilotes se desplazan ligeramente para respetar la distancia mínima horizontal exigida respecto a una canalización enterrada.

En los estribos, los muros que contienen los terraplenes se sitúan por detrás y por debajo del cargadero, en vez de por delante. Se disponen flejes metálicos en el trasdós, para contrarrestar los empujes de tierras aplicados directamente sobre murete y cargadero.

El diseño de este puente mejora la propuesta inicial, no sólo abaratándola, sino adaptándose mejor a los condicionantes existentes, dado que las cimentaciones diseñadas evitan cualquier conflicto con las numerosas canalizaciones preexistentes.

4.2 Puentes de Prievoz



Figura 11. Puentes de nueva construcción en el enlace de Prievoz (Octubre 2019).

El Enlace de Prievoz se encuentra al comienzo de la R7, dentro de la ciudad de Bratislava. El alcance de los trabajos comprende la rehabilitación de algunas estructuras, y la ejecución de dos nuevos puentes, que son los que se describen aquí.

El primero de ellos, numerado como 202, consistía, de acuerdo con la propuesta planteada por la administración durante la fase de concurso, en un puente de 20 metros de longitud en el vano inicial, que se bifurcaba en dos ramales que se extendían 75 y 130 metros, añadiendo 3 y 5 vanos más respectivamente. El tablero se resolvía con una losa continua de hormigón sin aligeramientos.

Durante la redacción del proyecto se reduce en lo posible la longitud de los puentes, sustituyendo los vanos prescindibles por terraplenes contenidos por muros de tierra estabilizados mecánicamente. Se ejecutan finalmente dos puentes independientes de un vano, de 20 metros de luz en ambos casos, resueltos con vigas prefabricadas de 1.20 metros de canto.

El segundo puente, numerado como 201, consiste en una losa maciza de hormigón, continua a lo largo de 7 vanos, con una longitud total de 167 metros.

La sustitución de losas macizas continuas por tableros de vigas doble-T convencionales se aplica profusamente en la práctica totalidad de los puentes de D4R7.

Sin embargo, no es este el caso. Dada la gran curvatura en planta del trazado, y limitaciones derivadas de la tramitación de las expropiaciones, se decide mantener la solución original: losa de hormigón postesada.

La losa del tablero se ejecuta sobre cimbra cuajada, en tres fases: primero se ejecuta el tercio central, y luego los vanos extremos.

Las pilas, cuya sección es un hexágono irregular, están centradas en el tablero, excepto la pila 4, que es doble y se empotra en el tablero.

En el resto de pilas se disponen aparatos de apoyo guiados que permiten deslizamientos.

Se suplementa el pretensado del tablero sobre la pila 4 con barras pretensadas, efectuando cajetines en las alas de la losa a tal efecto.

También se practican unos cajetines, esta vez en los laterales de la losa, para el enfilado de los cordones de pretensado de la segunda y tercera fase.

La cimentación de pilas y estribos es profunda. Se definen encepados de 4 pilotes. El encepado se achaflana en algunos casos para adaptarse a los límites exactos del terreno expropiado.

4.3 Puentes del enlace de Ketelec



Figura 12. Puentes en el enlace de Ketelec (Octubre 2019).

El enlace de Ketelec resuelve el paso de la autopista R7 por encima de la D4.

Se describen aquí los tres pasos superiores que soportan el tronco.

Se trata de tres puentes de 4 vanos, de 124, 120 y 117 metros de longitud, con una luz de vano máxima de 34 metros.

Los tableros se resuelven con vigas doble-T de 1.70 metros de canto, espaciadas hasta 2.4 metros.

El ángulo de esviaje es muy acusado, de hasta 56 grados en el estribo sur.

Se definen apoyos de neopreno circulares, que toleran mejor que los rectangulares los giros del tablero.

Las pilas son convencionales, con un cargadero armado y columnas circulares de diámetro estricto, para adaptarse a las dimensiones de la

mediana de la D4. La cimentación es directa sobre el terreno natural.

En los estribos la cimentación es directa, sobre un terraplén revestido superficialmente con “mineral facing”, y reforzado con flejes. Visualmente se asemeja a un falso muro de gaviones.



Figura 13. Detalle de apoyos en ángulo agudo [3].

4.4 Otras estructuras



Figura 14. Ecoducto en tramo Bratislava Prievoz - Ketelec (Octubre 2019).

En el tramo Bratislava Prievoz – Ketelec se construye un ecoducto de 87 metros de longitud, que consiste en un puente bóveda de 2 vanos,

constituido por ensamblaje de piezas prefabricadas de hormigón armado.



Figura 15. Viaducto en km 5+125 R7, tramo Ketelec - Dunajská Lužná (Octubre 2019).

En el km. 5+125 de la R7, en el tramo Ketelec - Dunajská Lužná, se encuentra un viaducto doble de 3 vanos de 104.5 metros de longitud total, con vanos de longitud máxima de 38 metros. Cada tablero está constituido por 7 vigas de 1.90 metros de canto, separadas 2 metros entre sí.

Los tableros disponen de una losa de continuidad sobre pilas, y diafragmas parciales. Los estribos se resuelven con cimentación directa, y se apoyan sobre el relleno de los muros de tierra estabilizados mecánicamente.



Figura 16. Paso superior en tramo Dunajská Lužná - Holice (Octubre 2019).

Se construyen a lo largo de la traza varios pasos superiores de 2 vanos sobre la R7, todos ellos con características similares:

Se resuelven los tableros con vigas doble-T equiespaciadas, y losa de continuidad sobre pila, con diafragmas parciales y topes sísmicos.

Estribos con cimentación directa sobre rellenos contenidos por muros de tierra reforzada.

Pilas convencionales con fustes circulares. Su cimentación es directa, sobre capas de terreno mejorado.



Figura 17. Puentes de vigas de 1 vano en R7, tramo Dunajská Lužná - Holice (Octubre 2019).

Del mismo modo para solventar los cruces con vías secundarias y pasos de fauna bajo la R7, se construyen varios pasos inferiores.

Se resuelven los tableros con vigas doble-T equiespaciadas y diafragmas parciales con topes sísmicos.

Los estribos cuentan con dos tipos de cimentación, en función del tramo en que se encuentren: cimentación directa sobre rellenos contenidos por muros de tierra reforzada; o cimentación profunda con pilotes a través del relleno del muro de tierra reforzada, con flejes metálicos en cargadero.



Figura 18. Marco ejecutado in situ en tramo Bratislava Prievoz - Ketelec (Octubre 2019).

Se resuelven tres pasos inferiores con marcos ejecutados in situ. En el caso mostrado en la imagen, las aletas en prolongación de los emboquilles son de tierra reforzada. Dado el elevado esviaje de la estructura, se anclan los flejes en los hastiales del marco.

La última tipología empleada en la R7 consiste en un puente integral: un pórtico de hormigón armado sobre cimentación profunda.

Referencias

- [1] Peter Paulík. Bridges in Slovakia. 2014.
- [2] Petra Bujňáková, Miroslav Strieška, University of Žilina. Development of precast concrete bridges during the last 50 years in Slovakia, 2017.
- [3] Elastomeric Bearings. EN-1337-3:2005, European Standard, 2005.