

D4R7. Presentación general y criterios de proyecto

D4R7. General Overview and Design Criteria

Luis Martín-Tereso ^a, Carlos Bajo ^b, Wojciech Włodzimirski ^c, Jose Simón-Talero ^d, Angel Carriazo ^e, Alvaro Mazariegos ^f, Javier Gras ^g, Alberto Serrano ^g, Pablo Carrión ^h

^a Ing. Caminos, canales y Puertos. FERROVIAL AGROMÁN SA. Engineering Services. Jefe de Departamento II de Puentes.

^b Ing. Caminos, Canales y Puertos. FERROVIAL AGROMÁN SA. Engineering Services. Jefe de Área de Puentes.

^c Ing. Caminos, Canales y Puertos. FERROVIAL AGROMÁN SA. D4R7 PPP. Structures Design Manager.

^d Dr. Ing. Caminos, Canales y Puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Consejero Delegado.

^e Ing. Caminos, Canales y Puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Director Técnico.

^f Ing. Caminos, Canales y Puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Ingeniero de Proyecto.

^g Ing. Caminos, Canales y Puertos. FERROVIAL AGROMÁN SA. Engineering Services. Ingeniero de Proyecto.

^h Ing. Caminos, Canales y Puertos. D4R7 PPP. Structures Design Engineer

RESUMEN

El Proyecto D4R7 consiste en la ejecución de una nueva circunvalación de Bratislava en su tramo Sur-Este (D4) junto con una nueva autopista radial desde la capital (R7), que nace en el enlace de Prievoz y discurre paralelamente al Danubio por la orilla Norte. El proyecto tendrá un gran impacto beneficioso, facilitando una autopista de circunvalación y descongestionando el tráfico que pasa por el centro de la ciudad. Este artículo presenta las soluciones de diseño aplicadas en las estructuras típicas del proyecto, no abordadas en otros artículos específicos.

ABSTRACT

The D4R7 project consists of the execution of a new Bratislava ring road in the south-east side of the city (D4) and a new radial expressway connecting with the city center (R7), which starts in Prievoz interchange and runs parallel to the Danube River along the north shore. The project will have a great beneficial impact on the city by improving connectivity and decongesting the traffic that passes through the city of Bratislava. This article presents the design solutions applied in the typical structures of the project, not addressed in other specific articles.

PALABRAS CLAVE: Danubio, Bratislava, hormigón, pretensado, vigas, pérgola, prefabricados.

KEYWORDS: Danube, Bratislava, concrete, prestressing, beam, pergola, precast.



Figura 1. Enlace de Ketelec en construcción (Nov 2019)

1. Introducción

La capacidad del circuito interior de Bratislava, que consiste en la autopista D1, el puente Harbour (“Prístavný most”) con una intensidad de tráfico que excede los 100,000 vehículos, y la autopista D2 con el tunel de Sitina, ha sido largamente sobrepasado.

Este hecho y el “boom” de construcción de áreas residenciales en los municipios a lo largo de la I-63, paralela a la futura R7 (con intensidades de tráfico multiplicadas en los últimos 15 años) son las razones últimas que justificaban la construcción de una nueva circunvalación de Bratislava.



2 Descripción de proyecto

El Proyecto D4R7 comprende 2 tramos (27km) de la futura nueva circunvalación de Bratislava (D4) y los 3 primeros tramos (32km) de una nueva autopista radial desde la capital (R7), que nace en el enlace de Prievoz y discurre paralela al Danubio por la orilla norte desde Bratislava hasta Holic.

Desde el punto de vista constructivo, el proyecto se divide en 5 tramos:

- Sección 1. Autopista D4 desde nudo de Jarovce (conexión con D2) to Ivanka

Sever (conexión a D1), incluido el nudo de Ketelec (conexión D4 y R7).

Esta sección de la autopista desviará el tráfico de tránsito del interior del país hacia Austria y Hungría, que actualmente usa la D1 y cruza el interior de la ciudad de Bratislava. Esto mitigará los atascos diarios en los barrios adyacentes.

- Sección 2. Autopista D4 desde Ivanka Several nudo de Rača. Esta sección se continuará en un futuro tramo del anillo, fuera del presente contrato, en túnel bajo el Male Tatra.
- Sección 3. Autopista Radial R7 desde el nudo de Prievoz (conexión con D1 y entrada a la ciudad) hasta el nudo de Ketelec (conexión D4).
- Sección 4. Autopista Radial R7 desde Ketelec hasta Dunajska Luzna.
- Sección 5. Autopista Radial R7 desde Dunajska Luzna a Holic.

Enlaces: Jarovce, Prievoz, Ketelec, Ivanka-Sever, Ivanka Zapa.

El Proyecto incluye más de 100 estructuras nuevas de paso de todo tipo: Pasos superiores de vigas, viaductos de losas postesadas, pasos inferiores, pórticos de pasos de fauna, pasarelas, etc...

Además, incluye la rehabilitación y mejora de otras existentes en el enlace de Prievoz.

La estructura más emblemática del proyecto es el Cruce del Danubio, lo que supondrá el sexto cruce del Danubio en la ciudad de Bratislava.

Los m2 de tablero del proyecto eran 190000m2, de los cuales cerca de la mitad correspondían al Cruce de Danubio.

Estructuras de Proyecto:

Por obstáculo salvado:

- Puentes sobre agua: 14
- Puentes sobre FFCC: 8
- Puentes sobre carreteras secundarias: 38
- Ecoductos y Otros: 56

Por Posición:

- Viaductos: 51
- Pasos Superiores: 18
- Ramales enlaces: 24
- Otros: 23

Por Construcción (diseño D4R7):

- Puente de Voladizos: 2
- Puente con autocimbra: 2
- Puentes in situ con cimbra: 28
- Puente de Vigas Prefabricadas: 66
- Ecoductos (bovedas prefabricadas): 13
- Puentes metálicos: 5

Total Estructuras: 116

3. Proceso de Diseño

El proceso de desarrollo de un proyecto en Eslovaquia tiene 3 etapas con una aprobación a su conclusión: Zoning Permit (anteproyecto donde se evalúa principalmente los impactos medioambientales), el Building Permit (proyecto “preliminar” a un nivel que permite aprobar la geometría, los espacios afectados y la validez del diseño realizado), y finalmente los planos tecnológicos de la ejecución (que recogen los últimos detalles del diseño, p.ej.: accesorios, barreras, etc.). Para el Diseño de Referencia, la Administración Eslovaca realizó y tramitó parcialmente, entre 2012 y 2015, la documentación del Zoning Permit y Building Permit de los objetos de diseño.

El análisis de los fondos necesarios para abordar el proyecto llevó a elegir el modelo de PPP (Public Private Partnership). En verano de 2015 tuvo lugar un concurso internacional, entre los 4 grupos pre-cualificados, para desarrollar el

proyecto, que incluía diseño y construcción (duración de 4 años, 2016-2020) y la concesión del mantenimiento y la conservación (30 años).

El concurso público de concesión incluía la responsabilidad del Diseño (contrato “Design & Build”) y permitía cambios en los objetos de diseño pre-establecidos (“Building Objects”) para optimizar las soluciones técnicas y obtener el diseño más competitivo, en base a las experiencias previas y conocimientos de los consorcios participantes, y de acuerdo a unos requerimientos técnicos, medioambientales, legales, etc... a cumplir en las propuestas.

La propuesta técnica, que forma parte del acuerdo contractual, resultó en gran cantidad de cambios en todos los objetos decisivos del proyecto; cambios en la alineación vertical y en planta de los enlaces de la autopista, cambios estructurales en los puentes, ajustes del sistema de drenaje, etc...

El proyecto fue adjudicado a mediados de 2016 a “Zero Bypass Bratislava” (ZBL, consorcio de Cintra, Macquarie y Porr), para la financiación, diseño, construcción y operación del proyecto. ZBL encargó el Diseño y Construcción del proyecto a la compañía D4R7, compuesta por Ferrovial Agromán y Porr.

TORROJA Ingeniería fue el Consultor de estructuras durante la fase de concurso y, conjuntamente con el equipo de diseño de Ferrovial-Porr, fue el responsable de preparar la propuesta optimizada de estructuras.

Una vez adjudicado, el núcleo del equipo de Diseño de Construcción se amplió con DOPRAVOPROJEKT (“DPP”, consultor principal y de estructuras, Eslovaquia), TORROJA Ing. (estructuras, España) y BGG (geotecnia, Austria).

TORROJA Ing. hizo el Diseño de Detalle de las estructuras nuevas de la R7, parte del Cruce del Danubio (Viaducto Este y Puente del Danubio) y la rehabilitación de los puentes existentes en Prievoz. DPP, junto con consultores locales, se encargaron de las estructuras de la D4.

4. Puentes “no singulares”. Estrategia de Diseño. Puentes de Vigas.

El diseño del Proyecto de Referencia incluía una gran variedad de soluciones tipológicas para condiciones de partida similares; losas postesadas continuas y vigas prefabricadas, estribos de gravedad y muros verdes (gaviones), ecoductos ejecutados in situ, etc...

La propuesta de optimización durante el concurso fue aplicar soluciones de vigas prefabricadas isostáticas con losa continua y muros de suelo reforzado en todos los casos donde fuese posible. Esto se aplicó en viaductos, pasos superiores e inferiores.

Este criterio presentaba las siguientes ventajas:

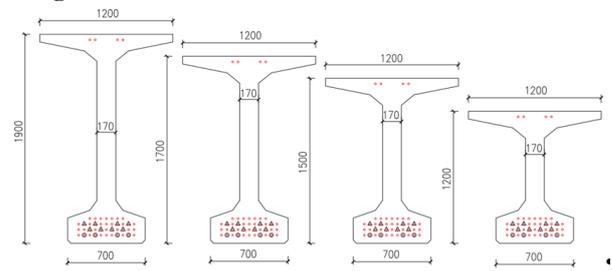
- Optimización de costes de las estructuras.
- Construcción de tableros más rápida y eficiente (los plazos del proyecto eran bastante estrictos).
- Generar suficiente volumen de vigas para justificar la implantación de un parque de prefabricación propio, con las geometrías de vigas optimizadas diferentes de las habituales del país.

Se comprobó que estos cambios eran admisibles según los requerimientos del concurso, aunque existía un riesgo de plazo en el proceso de aprobaciones de las nuevas estructuras.

Un análisis en detalle llevó a la conclusión que la tramitación del Cambio del Building Permit (desde el Diseño de Referencia, una vez aprobado), era compatible con los plazos de Diseño Final de la estructura a partir del diseño preliminar.

La optimización estructural resultó en el diseño de una nueva serie de optimizadas vigas prefabricadas (secciones no habituales para Eslovaquia) con diferentes cantos y sección transversal. 2 tipos de vigas (A y B) fueron diseñadas en función de la anchura de alas superiores e inferiores, y variando de 800 a 1900mm de canto. Con un intereje aproximado de 2.0m, estas vigas cubren un rango de tableros

entre 19 y 39m de luz. Más de 1000 vigas prefabricadas se han previsto con este diseño para construir 66 diferentes puentes, con una longitud total de 32km.



Una vez adjudicado el concurso, DPP (como diseñador de detalle de parte de las mismas) asumió la propuesta de estructuras y las vigas del concurso después de una revisión conjunta post-tender que llevó a unificar y adaptar algunos detalles a la normativa local.

La fabricación de las vigas diseñadas se adjudicó a un prefabricador local, DOPRASTAV. Los muros de suelo reforzado (solución poco conocida y aplicada hasta la fecha en Eslovaquia) fueron adjudicados a VSL.



Figura 3. D4. Paso superior. Montaje de Vigas

Los detalles del diseño final de las vigas y muros de estribo de suelo reforzado (topes laterales antisísmicos, flejes metálicos, paso de inspección en estribos, etc...), así como de otras tipologías y puentes citados aquí, se pueden encontrar en una ponencia aparte del congreso: “Bases de diseño y tipología de puentes. Autopista R7 en Bratislava” (aplicados a la R7).



Fig.4 Puente de la Refinería (concurso). Modelo 3D

5. Otros puentes “no singulares”.

5.1 Puente de la Refinería.

El Diseño de Referencia proponía un viaducto de doble tablero de viga cajón de hormigón postesada de una longitud aproximada de 700m. Se trataba de una estructura de baja altura en la periferia de la ciudad (zona degradada de casas aisladas sin protección ambiental ni calles urbanizadas ni necesidad de paso) sin obstáculos bajo ella salvo en sus 200m finales de trazado en curva que cruza esviado un canal de salida del Danubio (Male Dunaj). En ese último tramo, multitud de servicios (incluido un futuro ferrocarril) cruzan la traza dificultado la posición de los apoyos.

Ningún requerimiento impedía acortar el puente, así que la propuesta en concurso fue acortar la estructura a esos 200m finales, sustituyendo el puente por muro de suelo reforzado en el perímetro de la sombra de tablero.

El motivo de este muro era evitar que el derrame del terraplén se saliese de la zona de proyecto (lo que implicaría ser considerado un cambio “mayor” con aprobaciones más dilatadas en el tiempo). En fase de concurso había incertidumbre respecto a la zona de exclusión de las pilas junto al canal y por tanto del vano principal resultante; sólo cuando se confirmó la posición admisible de las pila-pilote, se asumió la tipología final de puente de vigas. La multitud de condicionantes ha motivado un encaje en curva, de vanos variables (entre ellos y variable según el ancho) y líneas de apoyo esviadas.



Fig.5 Puente Refinería (nov 2019). Vista aérea



Fig.6 Puente Refinería. Pilas-pilote junto a canal.

5.2 Pérgola.

En el inicio de la D4 antes de llegar al Danubio, la autopista cruza sobre una carretera local con un ángulo muy esviado y en curva. El proyecto además debía incluir un futuro carril bici paralelo a la carretera.

La propuesta del Diseño de Referencia era un paso normal con luces desproporcionadas; a pesar de ser la primera estructura de este tipo en el país, se decidió proponer una pérgola como la solución “natural” a este encaje.

En el diseño de detalle, asignado a diseñadores locales, se tuvo que hacer algunas adaptaciones de la geometría por motivos de expropiaciones; en Eslovaquia, solo se expropia las zonas expresamente ocupadas por las pilas del puente (no la sombra del tablero) y hay una gran fragmentación en la propiedad de la tierra. Este caso, hubo que hacer la luz variable de la pérgola a lo largo de su longitud para dejar bajo ella un trozo inverosímil de tierra no expropiada.



Figura 7. Pérgola. Colocación de vigas.



Figura 8. Pérgola. Abanicado de vigas en curva.



Figura 9. Pérgola. Danubio al fondo.

5.3. Ecoductos.

En el Diseño de Referencia, los ecoductos eran pórticos masivos de hormigón in situ. Esto requería importantes cimentaciones y cimbras para su ejecución.

Como una optimización habitual en este tipo de estructuras, manteniendo la geometría exterior abovedada, se han realizado finalmente como elementos prefabricados (ABM) en forma de bóvedas nervadas simétricas articuladas.

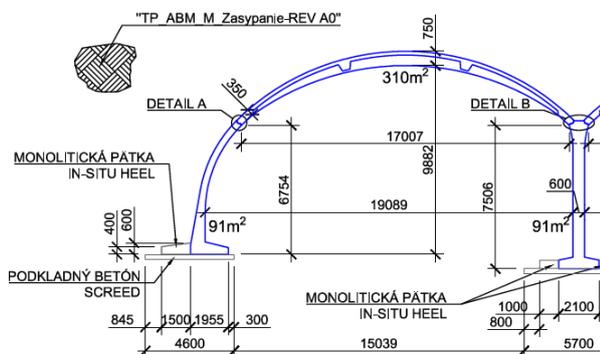


Figura 10. Arcos prefabricados

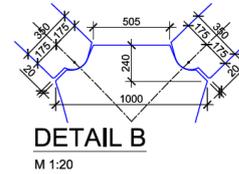


Figura 11. Detalle de las articulaciones

El ancho tipo de estos elementos es de 2.490m, teniendo cada anillo superior dos nervios separados 1.250m. La conexión en longitudinal de estos segmentos se hace también de manera articulada, disponiendo de una capa impermeabilizante entre la estructura y el relleno exterior.

Las pantallas laterales y la pila de la mediana van apoyadas sobre un hormigón de limpieza, en donde se conectan unos estabilizadores laterales temporales durante el proceso constructivo.

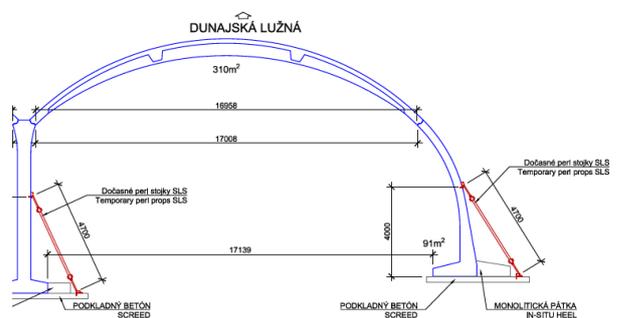


Figura 12. Estabilizadores laterales



Figura 13. Ecoducto. Colocación de anillos.



Figura 14. Ecoducto. Montaje completo.

Una vez dispuesto los anillos, se quitan estos estabilizadores temporales y se procede al relleno exterior de manera simétrica; fase fundamental para garantizar la estabilidad de estos elementos prefabricados.

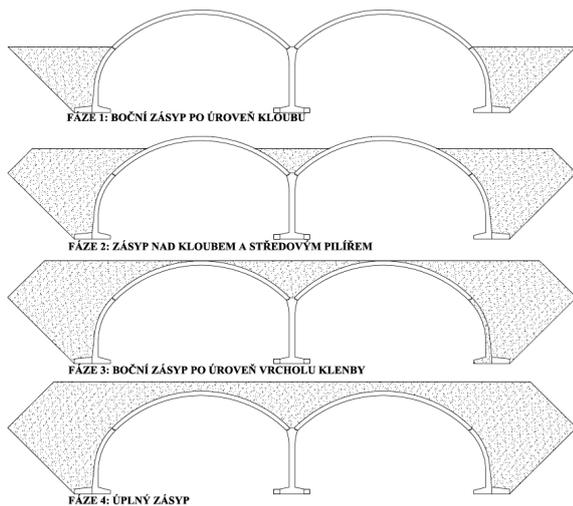


Figura 15. Fases de relleno

Las principales complicaciones a resolver fueron el diseño de las zapatas (in situ “heel”) para conseguir cumplir con los límites de tensiones admisibles en el terreno, así como conseguir encuadrar el paso de fauna superior dentro del límite de expropiación cumpliendo con las pendientes máximas permitidas y disponiendo del mínimo espesor de terreno necesario encima de la clave del ecoducto.



Figura 16. Ecoducto. Última fase de relleno

Agradecimientos

Queremos agradecer a todo el equipo de Diseño que ha participado en la D4R7 (de países y empresas muy diferentes) el esfuerzo realizado conjuntamente durante estos años para sacar adelante este proyecto en común, en unas circunstancias tan especiales para todos (cada uno desde su punto de vista). En especial, a Katarina Jakubekova, Andrej Fedorko y Jozef Antol del equipo de diseño de la D4R7, y equipo de Torroja involucrado en el proyecto desde su inicio, sin cuyo esfuerzo y dedicación no habría sido posible.

Referencias

- [1] L. Nad: “PPP Project D4R7-Part of Zero Bypass of the City of Bratislava-” Fib Konferencia “BetonNaSlovensku2014-2018”
- [2] Peter Paulik. Bridges in Slovakia. 2014.