D4R7. Cruce del Danubio. Definición de la solución y aspectos constructivos

D4R7. Danube Crossing. Description of the solution and construction methodology

Luis Martin-Tereso [a], Carlos Bajo [b], Wojciech Wlodzimirski [c], Jose Simón-Talero [d], Angel Carriazo [e], Ramón Merino [f], Juraj Kopčák [g], Adrián Chalupec [g], Petr Novotný [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. Jefe de Proyectos.

[g] Ing. Caminos, Canales y Puertos. DOPRAVOPROJEKT. Jefe de Proyecto.

[h] Ing. Caminos, Canales y Puertos. STRASKY, HUSTI & PARTNERS. Jefe de Proyecto.

RESUMEN

El proyecto D4r7 tendrá un impacto beneficioso en Bratislava con la creación de una nueva autopista de circulación a la ciudad. La parte más emblemática del proyecto es el Cruce del Danubio. El artículo presenta las restricciones de diseño y las principales características de la solución adoptada para los puentes del Danubio, y el razonamiento que llevó a cada una de las decisiones de diseño desde un punto de vista integral teniendo en cuenta similares proyectos en el mundo, el estado del arte de los métodos constructivos y la optimización del diseño y los plazos constructivos.

ABSTRACT

The D4r7 project will have a beneficial impact in Bratislava providing a new highway ring to the city. The most emblematic part of this project is the Danube Crossing. The paper presents the design constraints and main features of the solution adopted for the Danube Crossing bridges, and the reasoning that lead to each design decision from an integral point of view taking into account current similar projects in the world, state of art of construction methodologies, and the optimization of design and construction times.

PALABRAS CLAVE: Danubio, hormigón, pretensado, voladizos, autocimbra, jabalcones, tablestacas.
KEYWORDS: Danube, concrete, prestressed, cantilever, MSS, struts, sheetpiles

Figura 1. Cruce del Danubio. Modelo en 3D.

1. D4R7 aspectos generales

1.1 Descripción del proyecto.

El proyecto D4R7 comprende la circunvalación de Bratislava (D4) junto con a 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.

Tendrá un impacto beneficioso al mejorar el tránsito de la capital (del interior del país hacia la orilla sur y Austria) sin pasar por el centro de la ciudad. El proyecto incluye más de 100 nuevas estructuras de diferentes tipos: vigas, losas postesadas, pasos inferiores y superiores, ecoductos, pasarelas, etc… además de la rehabilitación y mejora de otras, especialmente en el enlace de Prievoz. La estructura más emblemática del proyecto es el 6th Cruce del Danubio en Bratislava.

Figura 2. Cruce del Danubio. Vanos del Oeste.

En el verano de 2015, un concurso internacional para desarrollar el proyecto tuvo lugar como PPP Project (Private Public Partnership), que incluía diseño y construcción (duración estimada de 4 años, 2016-2020) y la concesión del mantenimiento y conservación (30 años).

A mitad de 2016 se seleccionó la propuesta del consorcio "Zero Bypass Bratislava" compuesto por Ferrovial (España) y Porr (Austria).

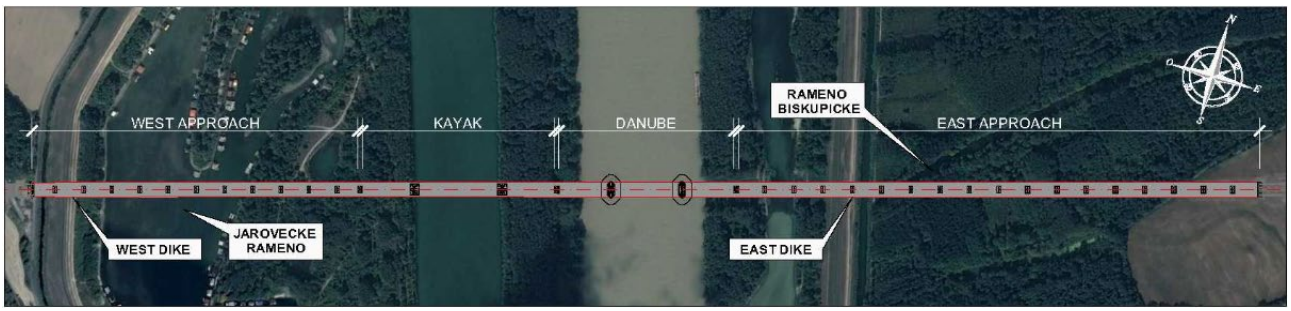
Torroja Ingeniería fue el diseñador de estructuras en la fase de concurso. Una vez adjudicado, se añadió el resto del equipo. El núcleo del equipo de Diseño de Construcción está formado por Dopravoprojeckt (DPP, consultor principal y de estructuras, Eslovaquia), Torroja Ing. (estructuras, España) y BGG (geotecnia, Austria). El diseño del Cruce del Danubio también contó con la colaboración técnica de Strasky, Husty & Partners (SHP, estructuras, Chequia), por su experiencia local en esta tipología de puentes.

Durante los primeros meses del Diseño de Construcción, se estableció una mesa de diseño del Danubio, liderada por el equipo de diseño de la D4R7, con reuniones periódicas para definir de manera coordinada todos los aspectos de un diseño lo más optimizado posible. La gran variedad de puntos de vista (diseñadores de España, Austria, Eslovaquia y Chequia) junto con los tempranos inputs constructivos (Berd y Construgomes además de D4R7), han permitido obtener una solución optimizada y ajustada a los medios constructivos.

Torroja Ing. es el diseñador del Puente del Danubio y Viaducto del Este. DPP ha diseñado del Puente del Kayak y Viaducto del Oeste.

El revisor independiente de los puentes ha sido Fhecor (España) con colaboración de profesores de la universidad de Bratislava (STU).

Actualmente (nov. 2019), el Cruce del Danubio está en plena fase de construcción. En esta fase está involucrados (además de Porr y Ferrovial), Construgomes (constructora especializada en puentes, Portugal), Berd (autocimbras, Portugal), Ulma (carros de alas, España), Silga (revisión de medios auxiliares), entre otros.



2. Cruce del Danubio. Descripción física y requerimientos de diseño.

El Cruce son 3km continuos de autopista elevada sobre el Danubio, su llanura de inundación y áreas adyacentes. Es una alineación recta en planta dentro de un corredor que atraviesa un área de protección medioambiental (Natura 2000), con 4 secciones diferenciadas:

2.1 Vanos de Acceso del Oeste.

Incluye los vanos de acceso que salvan el Dique Oeste y el "rameno" Jarovecke el cual está conectado al cauce principal aguas abajo pero que (salvo inundación) no lleva corriente. Es una zona residencial de casas de recreo flotantes.
El puente no debía tener más de 5 pilas en el rameno (nivel normal) según los requerimientos técnicos. Esto implica luces no menores de 60m.

2.2 Sección del Kayak.

A continuación, se ubica el Canal del Kayak, completamente aislado (nivel normal del rio), rodeado por vegetación de ribera y con forma rectangular de 2000x200m. Es usado para actividades deportivas de piragüismo.
El puente no podía tener ninguna pila en el Canal del Kayak según los requerimientos. Es la condición más restrictiva, con un gálibo horizontal libre de 200m (4m de gálibo vertical).

2.3 Sección del Danubio.

A continuación, se encentra el curso principal del Danubio, de aprox. 300m de ancho y 6m de profundidad, en circunstancias normales.
El puente debe cumplir los gálibos de navegación de 150x10m en el escenario de nivel máximo de navegación (134.2m).

2.4 Vanos de Acceso del Este.

Desde su orilla este, 325m inundables hasta el Dique Este y 225m hasta el cruce esviado con el Biskupicke Rameno. El canal se restaura sin ubicar pilas en su cauce. Esto son 70m de vano.
Los siguientes 650m son bosque protegido de Natura 2000. Se obliga a extender el puente hasta el pk.5+500 (gálibo vertical de 4m de paso de fauna) como margen a la zona protegida.

2.5 Requerimiento de Trazado.

La sección funcional de la autopista debía ser:

- 2+2 carriles de tráfico con arcenes ampliados para permitir 3+3 carriles en situaciones excepcionales.
- 2 evacuaciones de 1.5m, entre la barrera de seguridad y de protección de pajaros.
- 2 carriles exteriores de 3.0m para uso de peatones (un lado) y ciclistas (otro lado).

Esto supone una plataforma útil de 34.5m de ancho. En los primeros vanos del oeste, es aún más ancha por un carril de incorporación.

3. Diseño de la solución. Criterios adoptados y aspectos constructivos.

El Diseño de Referencia empleaba diferentes tipologías estructurales (atirantados, viga-cajón), materiales (acero, hormigón), procedimientos constructivos, secciones transversales (doble y simple tablero), etc… En la fase de diseño, el equipo de "Zero Bypass Bratislava" estudió en detalle los requerimientos para desarrollar una propuesta propia satisfactoria y competitiva (en coste y prestaciones). Los principales criterios de diseño fueron los siguientes:

3.1 Armonización en cada sección.

Se planteó lograr el diseño óptimo para cada localización y aplicarla en todas las secciones con los mismos condicionantes.
Era claro que las secciones de Vanos de Acceso del Este y Oeste, por un lado, y Kayak y Danubio por otro lado, comparten unos mismos condicionantes y por tanto debían tener iguales o similares soluciones de diseño.

3.2 Ajustes geométricos. Planta y alzado.

Se acortó la longitud hasta el canal de drenaje Oeste (respecto al Diseño de Referencia) evitando una longitud innecesaria de puente.
Además, se ajustó la altura la rasante cumpliendo los gálibos requeridos. Esto redujo el coste y el impacto medioambiental (visual y de pájaros).

3.3 Estrategia de construcción.

Por el exigente plazo de construcción, se asumió la ejecución de cada sección del Cruce del Danubio de manera independiente y simultánea, con diferentes equipos y medios auxiliares, de manera que un retraso de una sección no pusiese en riesgo la finalización del resto de secciones.

3.4 Encaje de vanos.

3.4.1. Vanos de Acceso

Los cambios de la luz y, en general, cualquier variación de la geometría entre vanos adyacentes requiere adaptaciones de medios auxiliares (p.ej. encofrados y cambios en las autocimbras) que suponen paradas y retrasos en la construcción.
Por ello, el criterio de optimización en los Vanos de Acceso fue eliminar juntas intermedias y unificar la luz de todos los vanos para mejorar los rendimientos de construcción (Viaducto del Este, 16 vanos iguales de 70m de luz y Viaducto del Oeste, 10 vanos iguales de 67.5m de luz). Por condicionantes de borde, los vanos extremos no cumplen la relación óptima estructural respecto al tipo. Este inconveniente (i.e. pretensado de refuerzo) se compensa por los beneficios de la uniformización (los vanos laterales en cualquier caso son ciclos "atípicos" de ejecución).

3.4.2. Vanos Principales

La luz principal mínima requerida (170 y 210m) y resto de restricciones llevó a 2 opciones válidas:

- Opción 1: 2 puentes con 3 vanos cada uno (130+210+130//130+170+130).
- Opción 2: 1 único puente con 3 vanos principales, 2 laterales (120+3x220+120)

La primera opción prioriza el criterio de "mínima luz" (asumido como el de menor coste de tablero) mientras que el segundo criterio prioriza el criterio de "armonización".
Se hicieron diversos comparativos preliminares (incluidos apoyos, pilas, cimentaciones y tramos de tablero cimbrados al suelo), y después de algunas consideraciones, se optó por Opción 1.

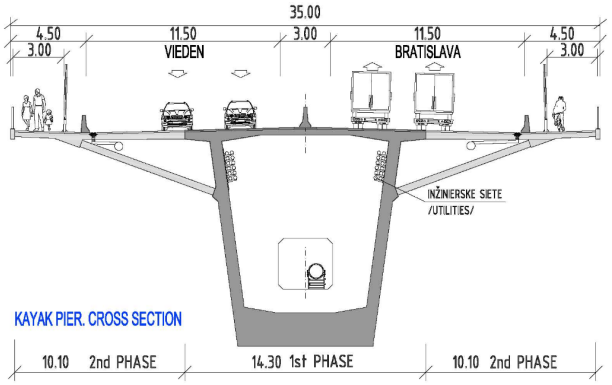
3.5 Tipología estructural del puente

La tipología estructural preferida, en todas las secciones donde fuese posible, fue vigas-cajón postesas, como la solución óptima desde el punto de vista del coste y durabilidad.

3.5.1. Vanos Principales (Kayak/Danubio)

La longitud de vano requerida (210m en Kayak y 170m en Danubio) son compatibles con la tipología de viga-cajón de hormigón postesado construida mediante dovelas "in-situ" en avance en voladizo desde las pilas principales.

Aun estando en el rango alto de la tipología (record actual 301m, Noruega), hay ejemplos de puentes similares con luces mayores, y anchos de tablero relevantes ([1], Brisbane, 260m). Por tanto, no era necesario usar la tipología de puente atirantado (Diseño de Referencia) que hubiese resultado una solución menos competitiva (para este rango de luces).



3.5.2. Vanos de Acceso (Oeste/Este)

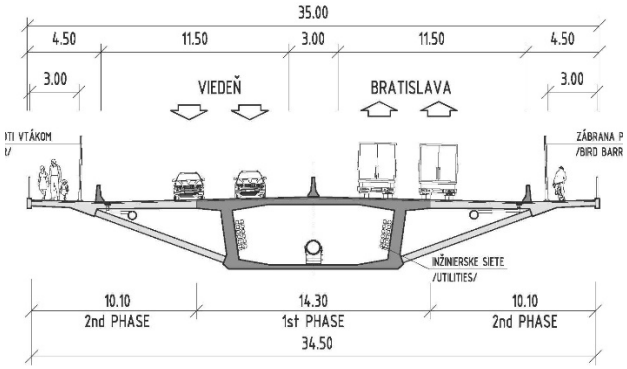
La longitud de vanos requerida para los viaductos de acceso (aprox. 70m) encaja bien con una viga-cajón postesada, que podría construirse con las siguientes metodologías:

- Dovelas prefabricadas.
- Empuje.
- Autocimbras.

Las primeras 2 alternativas fueron descartadas por no ser su rango óptimo de aplicación: las dovelas debían ser colocadas en voladizo (70m es demasiado para "span-by-span"), y este procedimiento es más lento que otras opciones (para esta luz y número de vanos). Además, tenía problemas logísticos de ubicación del parque de prefabricación y el transporte de dovelas entre orillas. Respecto a los empujes sucesivos, es una longitud excesiva para lanzar por el único lado accesible (estribo) en pendiente ascendente.

El método constructivo mediante autocimbra fue elegido porque los equipos actuales en el mercado permiten esta luz (70m) y la longitud del puente justifica la inversión; muchos vanos idénticos en alineación recta [8].

Referencias locales similares fueron claves en la decisión ([2] SHP/BERD, Eslovaquia).



3.6 Tipología de la sección transversal

Se estudiaron dos alternativas:

- 2 Tableros (2 vigas-cajón separadas e independientes).
- 1 Tablero (1 única viga-cajón de 35m de ancho de plataforma)

La primera opción tiene una plataforma de 17.5m de ancho en cada puente a construir en una fase. La segunda opción requiere una construcción de la sección transversal "evolutiva"; primero se construye el núcleo de la viga cajón por medio de autocimbra (Vanos de Acceso) o carros de voladizo (Vanos Principales) y después, un carro de alas finaliza en segunda fase los voladizos transversales ("overhangs"). Éstos apoyan contra el cajón mediante jabalcones, más efectivo que costillas o cajones multicelulares para estas dimensiones.

La opción de 1 tablero "evolutivo" fue elegida al ser efectiva en construcción (menos equipos y

ciclos de trabajo) y diseño (mejor optimización de tablero, pilas y cimentaciones).
Este esquema evolutivo (núcleo de viga-cajón con jabalcones en segunda fase) tiene su origen en Alemania hace décadas (Kochertal Brücke, 138m, 1979) y es una tendencia en los últimos proyectos en el mundo ([2],[3],[4],[5],[6],[7]).
Finalmente, por razones estéticas, la geometría transversal y otros detalles (jabalcones, cajón, overhangs) fue unificada entre los Viaductos de Acceso y los Viaductos Principales.

3.7 Tipo de pretensado

El pretensado interior (adherente) es preferido frente al pretensado exterior (no adherente):

- Mayor excentricidad que el PT exterior (que va por dentro del cajón).
- El PT exterior se realiza después del cajón (más fases y retraso constructivo).
- El sistema completo (vainas, inyección) es más económico y presenta menos dudas respecto a su durabilidad.

En los Viaductos de Acceso, se prefiere anclajes accesibles por solape de tendones en lugar de usar acopladores embebidos. El 50% de cables se solapan por cajetín, uno a cada lado de pila. Los acopladores requieren más tiempo de colocación y su fallo tiene difícil reparación (demolición parcial de la losa).
En todos los puentes, el trazado del pretensado longitudinal no atraviesa los cercos de las almas para evitar detalles de armado difíciles y laboriosos de ejecutar correctamente.

3.8 Apoyos esféricos

Se han elegido apoyos esféricos (Maurer) en lugar de los habituales tipo Pot por su mayor tensión de trabajo, que permite mayor capacidad a igualdad de tamaño. Esto era obligado en las pilas principales del Kayak y Danubio (carga máxima vertical ULS 210MN, diám. 2.5m).
Por otro lado, tienen una mayor vida útil. En el caso de apoyos de estas dimensiones, las operaciones de reemplazo son aspectos muy importantes en el diseño de la solución. Todas las pilas del cruce (incluidas las principales del Kayak y Danubio), se han diseñado para permitir la maniobra de cambio de apoyos.

3.9 Sismo

Las últimas modificaciones normativas eslovacas han obligado recientemente a comprobar el sismo en todo el país (antes estaba bajo el mínimo requerido para el cálculo), con un espectro de respuesta local bastante gravoso. Esto ha tenido 2 impactos en el diseño:
En las pilas principales (Kayak/Danubio), por la gran masa movilizada, mayores requerimientos a los apoyos esféricos (guiados y fijos).
En el Viaducto del Este, por su longitud, 1250m (y masa movilizada), obligó a reforzar las 4 pilas fijas centrales y una comprobación con métodos más refinados (demanda por capacidad).

4. Aspectos relevantes de la solución.

4.1 Vanos Principales (Kayak y Danubio)

El Puente del Kayak es una viga-cajón continua de 3 vanos (130+210+130m). El canto varía de 4.3m (vanos laterales y centro de vano central) a 13.0m en las pilas principales.
El Puente del Danubio es una viga-cajón continua de 3 vanos (130+170+130m). El canto varía de 4.3 m a 10.0m en las pilas principales.
La metodología de construcción del núcleo de viga-cajón (1ª fase) es avance en voladizo mediante dovelas desde una dovela-cero ejecutada cimbrada sobre el encepado de las pilas principales (PT 1 fase, de voladizo). Se cierran vanos laterales (con los tramos cimbrados en el estribo) y se cierra luego el vano central (PT 2 fase, continuidad). Se ejecutan los "overhangs" mediante Carro de Alas (ver 4.2.3) apoyando con jabalcones al cajón y con pretensado transversal. Finalmente, se tesa el pretensado de 3ª fase, a sección completa.

Figura 7. Kayak. Ejecución de encepado.

Figura 8. Kayak. Ejecución de fustes.

4.1.1 Conexión pila-tablero (Kayak/Danubio)

La conexión tablero-pilas principales es articulada al giro en servicio (una única línea transversal de 2 apoyos esféricos). Esto libera a la cimentación de los momentos desequilibrados de construcción (fase de avance en voladizo) y evita riesgos de levantamiento comparados con el esquema de doble línea de 2 x 2 apoyos (empotrado a flexión). Esto es importante al ser pilas bajas y cimentación profunda (trabajando parcialmente por fuste) con asientos elásticos relevantes e inciertos.

Esta configuración, comparada con el escenario empotrado y rango de la constante de muelle de los pilotes ("upper & lower bound"), aporta certeza en las reacciones en los apoyos (valores máximos no muy superiores al otro escenario) y permite una reducción importante en el número de pilotes y dimensiones de encepados.

El tablero está fijo longitudinalmente sólo a una pila principal mientras que transversalmente se fija a todas las líneas de apoyo.

4.1.2 Pilas principales. Fustes (Kayak/Danubio).

La gran carga vertical del tablero debe transmitirse desde los apoyos uniformemente a todos los pilotes de 1.8m dispuestos en los encepados. Para ello, las pilas principales consisten en un par de fustes troncocónicos inclinados transversalmente y empotrados en el encepado. La parte superior de los fustes está atada entre sí con una riostra de 2.5m de canto, creando un pórtico de patas inclinadas para apoyar el tablero y distribuir su carga transversalmente al encepado. La silueta frontal que ofrece frente a la corriente es hidrodinámica en caso de inundación (evita turbulencias y acumulación de flotantes) y fue aprobada por la Autoridad del Danubio (paso requerido para aprobar del diseño final).

Figura 9. Kayak. Dovela cero.

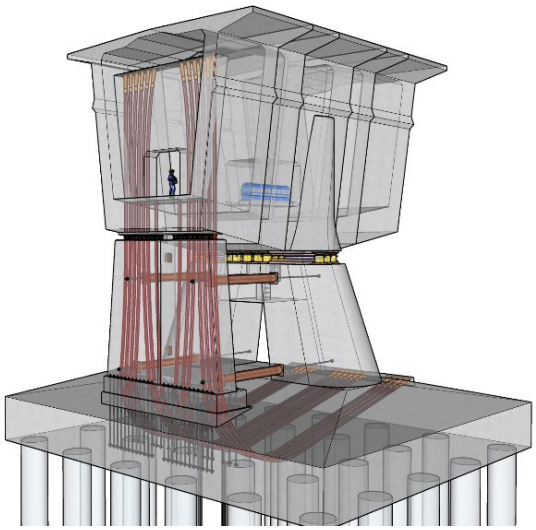


Figura 10. Kayak. Pila principal en construcción.

4.1.3 Kayak. Cimentación de Pilas Principales.

Las pilas principales del Kayak se han ejecutado con tablestacas en ambas orillas del canal y el encepado (27.5x22.6m, 30 pilotes 1.8m diam) bajo la cota del terreno para cumplir el gálibo horizontal exigido (200m libres entre fustes).

Figura 11. Danubio. Carros de voladizos.

4.1.4 Danubio. Cimentación de pilas en el rio.

Las pilas principales del Danubio se encuentran en el curso principal del rio (6m de profundidad a nivel normal). Sus encepados hexagonales (26 pilotes 1.80m diam. 42.2m x 17.2m) con forma hidrodinámica, se han situado a la cota de la superficie del agua e incluyen unos "faldones" exteriores de tal manera que su contorno es visible en todo el rango del nivel de agua en situación de navegabilidad (requerimiento de la Autoridad de Danubio). Los pilotes, colocados al tresbolillo en planta para optimizar las dimensiones del encepado, están exentos bajo el agua hasta el lecho del rio (tanto pilotes como encepados tiene hormigón adecuado para ese nivel de abrasividad). Este diseño proporciona una respuesta robusta al impacto de barcos y facilita la construcción en el rio, al reducir la excavación en el interior del "cofferdam" bajo el agua para ejecutar el encepado. Es una solución empleada en otros grandes proyectos ([6]).

El proceso fue el siguiente: se construyó un recinto de tablestacas mediante pontona y se rellenó de material granular. Se ejecutaron los pilotes desde coronación y, posteriormente, una inyección de jet-grouting al nivel del lecho del rio para impermeabilizar el interior del recinto, que fue entonces excavado; se descabezaron los pilotes y se ejecutó el encepado, retirándose finalmente las tablestacas.

4.1.5 Construcción en voladizo

Los carros de voladizo empleados pesan unas 170ton con una capacidad de aprox. 430ton.

La discretización de dovelas es simétrica respecto a eje de pila. Su longitud tipo es de 5m con unas dovelas iniciales de menor longitud para compensar su tamaño (Kayak 20 dov. = 6x3.9+14x5m; Danubio 16dov =7x4.2+9x5m).

La dovela cero del Kayak y Danubio se ha realizado de 20m cimbrada sobre el encepado. Esto permite montar simultáneamente los 2 carros (2 x 10m) ahorrando tiempo de montaje; debido a las dimensiones de la dovela cero y a la capacidad de los carros, no se obtenían ventajas ejecutando con media dovela de diferencia.

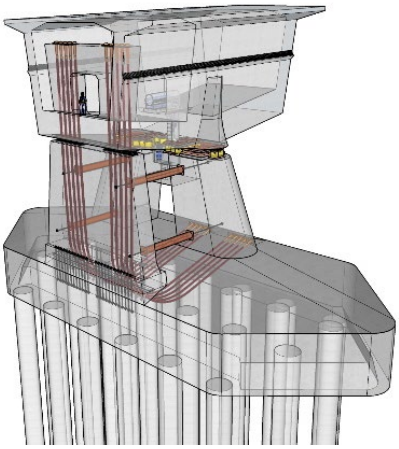


Figura 12. Danubio. Pila principal en construcción.

El bloqueo de la T en voladizo se realiza mediante una pila temporal situada sobre el encepado, en el lado del vano lateral. Contiene unos tendones no adherentes de cosido al tablero para garantizar la reacción al despegue. Debido a las muy exigentes condiciones de equilibrio impuestas (que incluían diferente densidad del hormigón en cada brazo de la T) se tuvo que emplear gran número de tendones (14T31 en Kayak y 10T31 en Danubio), que se anclaban en la parte superior del diafragma de la pila temporal (para evitar obstruir el paso en la losa superior del tablero) y, después de un trazado curvo en 3D bajo la pila permanente, se

anclaron en el lado opuesto del encepado. Debido a la hipótesis pésima de compresión (que agotaba la capacidad de la pila), hubo de proveer parte de la capacidad última a tracción de manera pasiva (tesando los cables al 45%).

4.2 Vanos de Acceso (Oeste y Este).

El Viaducto del Oeste (780.5m) es una viga-cajón continua 53+10x67.5+52.5m y canto 4.3m sobre el Dique Oeste y el rameno Jarovecké.
El Viaducto del Este (1247.5m) es una viga-cajón continua 65+16x70+62.5m y canto 4.3m sobre el Dique Este y el rameno Biskupicke.
Ambos viaductos están pretensados tanto en dirección longitudinal (2 fases) como transversal.

4.2.1 Conexión pila-tablero (Accesos)

El Viaducto del Oeste tiene apoyos fijos en las 3 pilas centrales, sentido longitudinal. Al inicio de la construcción, se bloquea el tablero en el apoyo de la pila anterior a la posición de la autocimbra según esta avanza. El Viaducto del Este tiene apoyos fijos en las 4 pilas centrales y al inicio de la construcción se bloqueó temporalmente una pila junto al estribo.
Todos los apoyos son esféricos; en las pilas libres guiados longitudinalmente. En las pilas más altas se guiaron en ambos fustes para que trabajaran conjuntamente frente a acciones transversales. Por ello, se comprobó las tolerancias disponibles en apoyos, la capacidad de la guía y la carga permanente estuviese centrada en pila.

4.2.2 Construcción Vanos de Acceso. Autocimbra.

En el núcleo de la superestructura (cajón con cartelas exteriores, 14.3m de ancho) se construye con autocimbra. En esta 1ª fase, los tendones longitudinales están pretensados vano a vano.
Estas autocimbras de BERD [8] son especiales: tienen un refuerzo del cordón superior con forma de arco y el sistema OPS (Organic Prestressing System) que activa unos cordones de pretensado en el cordón inferior de la celosía, cuando la flecha en un punto de control alcanza un determinado umbral establecido.

4.2.3 Construcción 2 fase. Carro de Alas.

En la segunda fase, para todo el cruce, se construyen los voladizos laterales para completar todo el ancho en fases longitudinales de 20m. Se colocan los jabalcones prefabricados y se hormigona los "overhangs" soportado por un carro de alas. Esta fase comprende el pretensado de los tendones transversales de la losa superior. A continuación, en los Accesos se tesa la 2ª fase de tendones longitudinales que actúan sobre la sección completa.

Figura 14. Jabalcones y Carro de Alas.

4.2.4 Pilas en Vanos de Acceso. Dovela Cero.

Las pilas de los Vanos de Acceso consisten en dos esbeltos fustes independientes de sección ovoidal (para albergar los apoyos permanentes y

los gatos de reemplazo) y una pantalla inferior entre ellas (por capacidad de la base de los fustes, rigidizar el encepado y mejora hidráulica en inundación evitando acumulación de flotantes).

Este diseño optimizado es consecuencia de la decisión constructiva de usar una "dovela cero"; rebanada de tablero sobre pila (con diafragma) ejecutada previamente sobre los fustes.

Tradicionalmente, las autocimbras superiores sobre tablero presentan la dificultad del apoyo de las celosías en las pilas. Se suelen usar unos pórticos metálicos fijados al capitel de las pilas, quedando embebidos en el tablero y obligando a complicadas extracciones y rellenos de segunda fase de las ventanas dejadas al efecto.

La dovela cero presenta ventajas importantes. Por un lado, la ejecución de la dovela cero y el diafragma del tablero en pila se hace antes de la llegada de la autocimbra, y por tanto fuera del camino crítico de construcción. La ejecución del diafragma u otro elemento discreto transversal (p.e. nervios o costillas) complica la ejecución y aumenta el ciclo constructivo del vano.

Por otro lado, elimina la necesidad de capiteles en las pilas y reduce drásticamente la necesidad de superficie de coronación de pilas.

La dovela cero (ejecutada sobre los apoyos esféricos definitivos) debe estar empotrada a los fustes durante el autolanzamiento de las celosías de la autocimbra y el hormigonado del vano. Para ello, BERD diseñó unos perfiles de apoyo sobre los fustes que cosían la dovela cero al fuste y a su vez sujetaban los encofrados para su propio hormigonado. Por lo estricto del diseño (espacio disponible y la esbeltez de elementos), se implementó un control de excentricidades y flechas para su correcto funcionamiento.

Figura 17. Accesos. Encofrado interior retráctil.

Por último, el paso de hombre del diafragma de la dovela cero se ajustó para el apoyo seguro de los gatos en la maniobra de reemplazo de apoyos y, por otro lado, permitir el paso del encofrado móvil retráctil del cajón (techos y hastiales), en su maniobra de avance al siguiente vano.

Referencias

[1] J. Connal: 2º Gateway Bridge, Brisbane Australia. 34th IABSE Symp. Venice 2010.

[2] J. Strasky: Viaducts with progressively erected decks. Multi-Span Large Bridges. Pacheco & Magalhaes (Eds).

[3] J. Revoltós et al.: Viaducto de Trapagarán. Hormigón y Acero. Nº 274.

[4] J. Llombart et al: Viaducto sobre el barranco de Tenoya. V congreso de ACHE.

[5] F. Millanes et al.: New Pumarejo Bridge in Barranquilla, Colombia. VII Congress. ACHE. La Coruña, Junio 2017.

[6] J. Manterola et al.: Construction and design features of the Bridge over Danube. Bulgaria. 37th IABSE Symposium Madrid 2014.

[7] J. Romo et al.: Mersey Bridge's Conceptual & Detailed Design. VII Congress. ACHE. La Coruña 2017.

[8] P. Pacheco et al.: Overcoming the challenges of multi-span viaducts construction. VII Congress. ACHE. La Coruña 2017.