

Puente sobre el río Danubio en Bratislava (Autopista D4). Viaducto de Acceso Este, construido vano a vano mediante autocimbra.

*Bridge over the Danube river at Bratislava (Motorway D4). East Approach bridge,
built up span by span using a movable scaffolding system.*

José M Simón-Talero Muñoz^a, Ramón M^a Merino Martínez^b,

Ángel Carriazo Lara^c, Javier Domínguez Martínez^d, David Walias Sánchez^d,

Wojciech Wlodzimirski^e, Luis Martín-Tereso López^f

^a Doctor ingeniero de caminos, canales y puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Consejero Delegado.

^b Ingeniero de caminos, canales y puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Jefe de Proyectos.

^c Ingeniero de caminos, canales y puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Director Técnico.

^d Ingeniero de caminos, canales y puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Ingeniero de Proyectos.

^e Ingeniero de caminos, canales y puertos. FERROVIAL AGROMÁN, SA. D4R7 ppp, Structures Design Manager.

^f Ingeniero de caminos, canales y puertos. FERROVIAL AGROMÁN, SA. Engineering Services, Head of Bridges & Structures II.

RESUMEN

El viaducto de Acceso Este al puente sobre el Danubio es un puente continuo de canto constante, de hormigón pretensado, de 1250.5m de longitud total y 35m de ancho. La sección tipo del puente se construye en dos fases, mediante autocimbra y carro de alas. El estudio detallado de la distribución no lineal de tensiones en la sección ha permitido optimizar la cuantía de pretensado necesaria, permitiendo definir únicamente pretensado interior adherente en la sección. Se ha eliminado la necesidad de definir pretensado exterior en el interior del cajón, como sucede en otras realizaciones recientes comparables.

ABSTRACT

East Approach viaduct to the bridge over the Danube river is a continuous prestressed concrete bridge, 1250.5m long and 35m wide. The bridge typical section is built up in two phases, using a movable scaffolding system and a wing traveler. A detailed study of the non-linear stress distribution on the deck typical section has been useful to optimize the prestressing steel quantification, in order to define a single internal bonded post-tensioning tendon system, not being necessary to design an extra external prestressing system inside the deck box core, as usual in other comparable recent realizations.

PALABRAS CLAVE: Hormigón pretensado, Cajón, Voladizos, Vano a vano, Autocimbra, MSS, Torroja.

KEYWORDS: Prestressed concrete, Box girder, Overhangs, Span by span, Movable scaffolding system.

1. Generalidades

El consorcio D4R7, fruto de un contrato ppp, está construyendo en Bratislava la nueva

autopista D4, que circunvala Bratislava por el sur entre las localidades de Jarovce (en la frontera con Austria) e Ivanka pri Dunaji, y la nueva autopista R7 que nace en Bratislava y discurre

paralela al río Danubio por su margen izquierda, en dirección sudeste, hasta la localidad de Dunajská Streda, próxima a la frontera con Hungría. El contrato incluye otras actuaciones, como la remodelación del enlace de Prievoz de la autopista E58, en el casco urbano de Bratislava. Como parte del proyecto constructivo de la nueva autopista de circunvalación de Bratislava D4, se ha diseñado, y está actualmente en construcción, el paso de la autopista D4 sobre el Danubio. Dicho paso consta de 4 viaductos consecutivos, con una longitud conjunta de 2.932,5m:

- El viaducto de Acceso Oeste, en la margen derecha del río Danubio, tiene una longitud total de 782m.
- El viaducto del Kayak atraviesa un canal olímpico para la práctica de piragüismo, y tiene una longitud total de 470m.
- El viaducto principal, o del Danubio, salta sobre el cauce habitual del río Danubio, y tiene una longitud total de 430m.
- El viaducto de Acceso Este, en la margen izquierda del río Danubio, pasa por encima de la llanura de inundación del río y de distintos ramales fluviales del Danubio, entre los que destaca el Biskupické, y tiene una longitud total de 1250,5m.



Los viaductos de acceso son puentes ejecutados por fases, contruidos mediante autocimbra, mientras que los viaductos centrales son puentes contruidos mediante el método de avance en voladizo.

El paso de la autopista D4 sobre el Danubio tiene una anchura total de 35m, y alberga el tronco de la autopista, una vía ciclista y otra peatonal. La calzada de la autopista ocupa los 25m centrales del tablero: 4 carriles de 3.75m de ancho, una banda central sobre mediana de 2m de ancho, arcenes interiores de 1.0m y exteriores de 3.0m. Como requerimiento de diseño, en situación de emergencia o a futuro, la calzada puede redefinirse para albergar 6 carriles de 3.5m de ancho, 3 por sentido, y arcenes interiores y exteriores de 1.0m de ancho.

A cada lado de la calzada, la banda de 5.0m de ancho de tablero restante se divide en dos zonas diferenciadas. Una primera zona próxima a la calzada, de 2.0m de ancho que sirve para albergar la barrera de tráfico, una barrera antiviento y una zona técnica entre ambas que sirve, al igual que la banda central sobre mediana, para la ubicación de distintos elementos del puente, como anclajes de pórticos de señalización, cámaras de vigilancia, estaciones meteorológicas, farolas... La segunda zona, exterior a la primera, tiene 3.0m de ancho y se extiende hasta el borde del tablero. Permite materializar la vía ciclista y la acera, al lado derecho e izquierdo del tablero, respectivamente.

Los puentes se diseñan con un trazado en planta recto. En alzado, el acceso desde los dos viaductos de acceso hacia los centrales se define con rampas ascendentes de pendiente suave variable entre el 0.5% y el 1%. El punto alto del trazado se produce en el centro del vano central del puente sobre el Danubio, sobre un acuerdo convexo, en el que la rasante discurre un mínimo de 18m por encima de la lámina de agua calculada para la situación de avenida estimada para un periodo de retorno de 100 años.

Los tableros se definen en toda su longitud con un peralte transversal en bombeo de 2.5%, a excepción de la vía ciclista y la acera, definidas con peralte del 2.5% hacia el eje del tablero. De esta manera, los imbornales de desagüe del tablero se disponen en la calzada, próximos a la barrera de tráfico exterior.

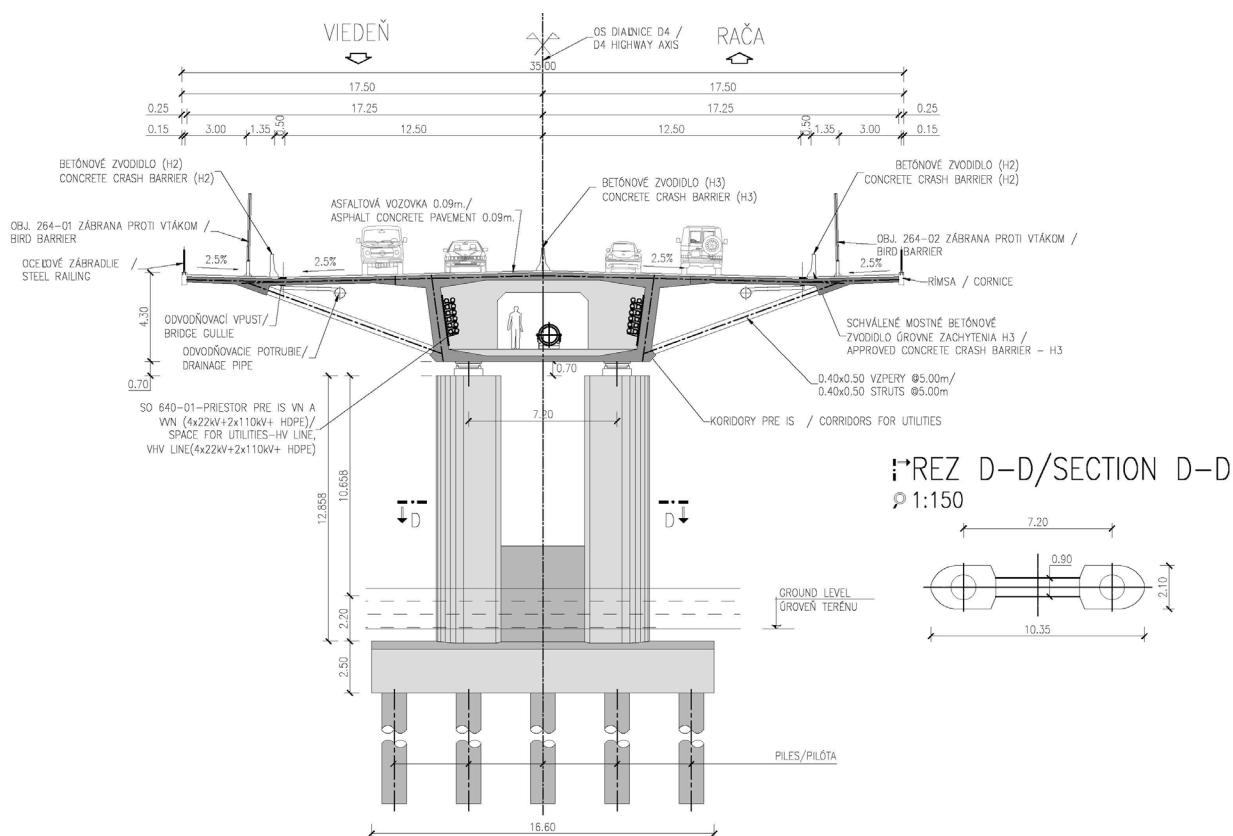


Figura 2. Sección tipo del viaducto por pila.

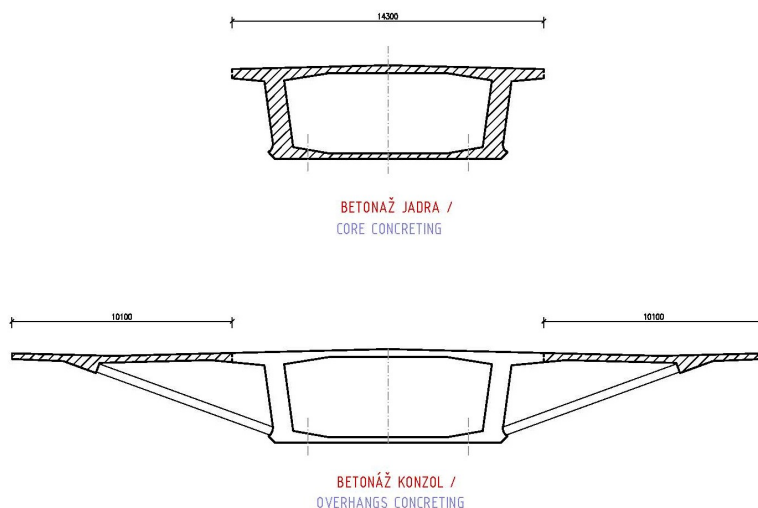


Figura 3. Fases de construcción de la sección tipo del tablero. Arriba se define el cajón central del tablero de 14.3m de ancho, y abajo se definen los voladizos de 10.1m de ancho.

2. Tablero

El viaducto de Acceso Este del puente sobre el Danubio tiene 1250.5m de longitud total, dividida en 18 vanos de 65.0+16x70.0+62.5m de

luz. El viaducto salva la llanura de inundación de la ribera este del Danubio y varios ramales fluviales del propio río, alcanzando una altura sobre terreno de 18.5m, en el entronque con el viaducto que cruza el cauce del río Danubio.

El tablero es continuo de canto constante, de hormigón pretensado tanto en dirección longitudinal como en dirección transversal.

Tiene una anchura total de 35m. La sección tipo del tablero está constituida por un cajón central ampliado lateralmente por sendos voladizos sustentados sobre jabalones prefabricados de hormigón armado.

Los materiales empleados en la construcción del tablero son: hormigón C50/60 en el cajón central y los voladizos laterales, hormigón C45/55 en los jabalones, acero pasivo B550 S y acero activo Y1860 S7.

2.1. Cajón central

El cajón central tiene 11.3m de ancho total a nivel de rasante y 4.3m de canto constante. Las almas del cajón se definen inclinadas, con lo que el ancho del cajón en su base se reduce hasta 10.4m.

El forjado superior se define acartelado entre almas, con tres zonas diferenciadas, una central de espesor constante de 0.3m, y a cada lado de esta sendas zonas con transición lineal de espesores en una longitud de 2.265m, hasta alcanzar 0.6m en la unión con las almas.

De igual manera se define el forjado inferior, acartelado entre almas, con tres zonas diferenciadas, una central de espesor constante de 0.25m, y a cada lado de esta sendas zonas con transición lineal de espesores en una longitud de 2.265m, hasta 0.575m en la unión con las almas.

A lo largo de los 13m de tablero próximos al eje de pila el espesor del forjado inferior se define linealmente variable entre 0.25m y 0.575m, en el entronque con el diafragma de pila.

Por fuera del cajón se construyen en primera fase sendos voladizos de 1.5m de longitud y canto variable, entre 0.6m en el entronque con el alma y 0.42 m en sus extremos.

El cajón central y los citados voladizos completan un ancho central de 14.3m de tablero que se construye en primera fase, como más adelante se explicará. Por fuera de esta banda central se construyen sendos voladizos de 10.1m

de ancho en segunda fase, que completan el ancho total del tablero de 35m.

Las almas tienen 0.7m de espesor constante, regruesándose localmente hasta 0.9m en las inmediaciones de las pilas. A 13m del eje de pila, y a ambos lados de ésta, el espesor de las almas aumenta a 1.25m de espesor, para permitir el cruce y anclaje de los tendones de pretensado longitudinal que discurren por las almas.

En pilas y estribos se definen diafragmas de 3.0m y 2.5m de espesor, respectivamente. Dichos diafragmas se definen con un paso de hombre extraordinariamente amplio, de 4.4m de ancho y 2.75m de altura, con el objetivo principal de permitir el paso de los encofrados interiores del cajón a través de los mismos durante la construcción. Adicionalmente se definen 18 pasatubos circulares de 200mm de diámetro a través del diafragma, para permitir el paso de servicios. Dada la poca altura de las pilas sobre el terreno, y la fácil accesibilidad a las mismas, no ha sido necesario definir un acceso a la cabeza de las mismas desde el tablero.

A lo largo de 550m de longitud el tablero alberga en su interior una tubería de agua potable de 1.2m de diámetro, procedente del puente sobre el Danubio adyacente, que abandona el mismo a través de su forjado inferior en las inmediaciones del diafragma de la pila 8.

2.2. Voladizos laterales

Por fuera del ancho central del tablero, y a cada lado de este, se construyen los voladizos en segunda fase. Cada voladizo se materializa mediante una losa de hormigón de 10.1m de ancho sustentada cada 5m mediante jabalones inclinados.

Se definen tres zonas diferenciadas en la losa de hormigón. En la proximidad del cajón central la losa se define de 0.3m canto constante hasta una distancia de 6.35m de este. A continuación se define una banda, de 1.5m de ancho a lo largo de todo el tablero, en la que el espesor de la losa aumenta hasta 0.805m. En esta

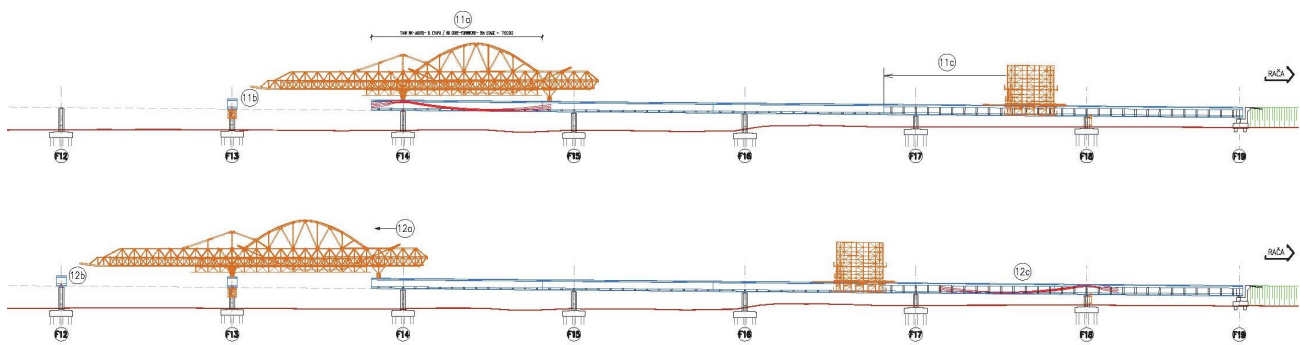


Figura 4. Detalle de las distintas fases del proceso constructivo: construcción del cajón central mediante autocimbra y pretensado del mismo en primera fase, y tres vanos por detrás construcción de los voladizos y pretensado del tablero completo en segunda fase.

zona rigidizada empotran los extremos superiores de los jabalcones. A partir de este nervio longitudinal se materializa un voladizo exterior puro de 2.25m de longitud, de canto variable entre 0.3m y 0.25m en su extremo.

Los jabalcones, prefabricados de hormigón armado, se definen de sección constante $0.5 \times 0.4 \text{ m}^2$ y 8.5m de longitud. Los jabalcones, en su extremo superior empotran en la losa forjado, mientras que en su extremo inferior apoyan en el lateral del cajón, a la altura del centro de gravedad del forjado inferior. No se define ningún tipo de elemento pasante entre jabalcón y cajón.

durante la colocación del jabalcón, éste apoya contra el cajón en unos pequeños tacos de goma interpuestos, que resisten la compresión producida por su propio peso. Dichos tacos de goma materializan un pequeño hueco de 20mm de espesor entre ambas superficies de hormigón. Previamente al hormigonado de la losa forjado se inyecta una pequeña banda de dicho hueco, dejándose para después del hormigonado de la losa la inyección completa del recinto. De esta manera se absorben los pequeños giros producidos en la base del jabalcón debidos a la flexibilidad de los medios auxiliares empleados para la construcción del voladizo.

2.3. Proceso constructivo

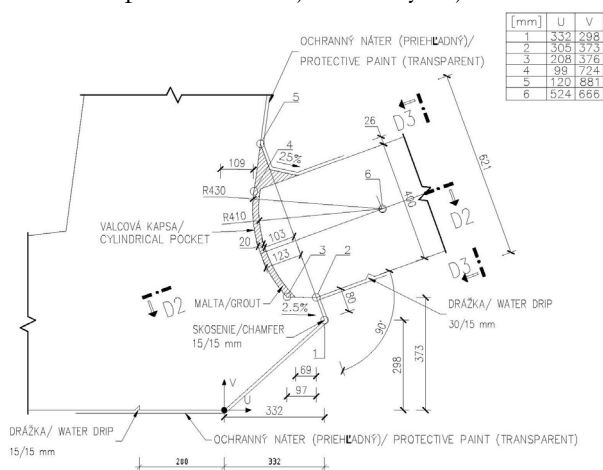


Figura 5. Detalle del contacto entre jabalcón y cajón.

El contacto entre jabalcón y cajón se materializa en unos cajeados diseñados expreso en el propio cajón. El extremo inferior del jabalcón se ha diseñado con una superficie macho cilíndrica que casa perfectamente con la superficie del cajeadado. En fase constructiva,

De acuerdo con los condicionantes de diseño, la construcción del tablero se ha realizado afectando lo menos posible el entorno del viaducto, de alto valor ambiental. Los medios auxiliares empleados solo han requerido de apoyo en la subestructura del puente y en las zonas previamente ejecutadas del tablero.

2.3.1. Construcción del núcleo central del tablero

La construcción del núcleo central del tablero se realiza vano a vano, o por fases, mediante el empleo de una autocimbra. Esta parte central del tablero se ha construido por tanto en 18 fases.

La construcción se ha realizado desde el estribo final del viaducto, más alejado del cauce del Danubio, hacia el inicial, para simplificar el montaje de la autocimbra y evitar conflictos innecesarios con las obras de construcción del viaducto del Danubio.

Por detrás del estribo final se permite un montaje y avance inicial de los medios auxiliares

(cimbra, carro de alas...) más sencillo, sobre el terraplén de la autopista.

El estribo inicial no es convencional, tratándose más bien de una doble pila, o pila estribo, sobre la que apoya también el puente del Danubio. Dadas las posibles interferencias durante la construcción de ambos puentes, que será realizada simultáneamente por dos equipos independientes, se desaconseja el montaje de la autocimbra en este extremo del puente. Además, la inexistencia de terraplén a cota del tablero en este punto, tras el estribo, obligaría a montar la autocimbra bien sobre el tablero del puente del



Figura 6. Vista general de la autocimbra sobre el tablero. A la izquierda se observa una dovela 0 sobre pila.

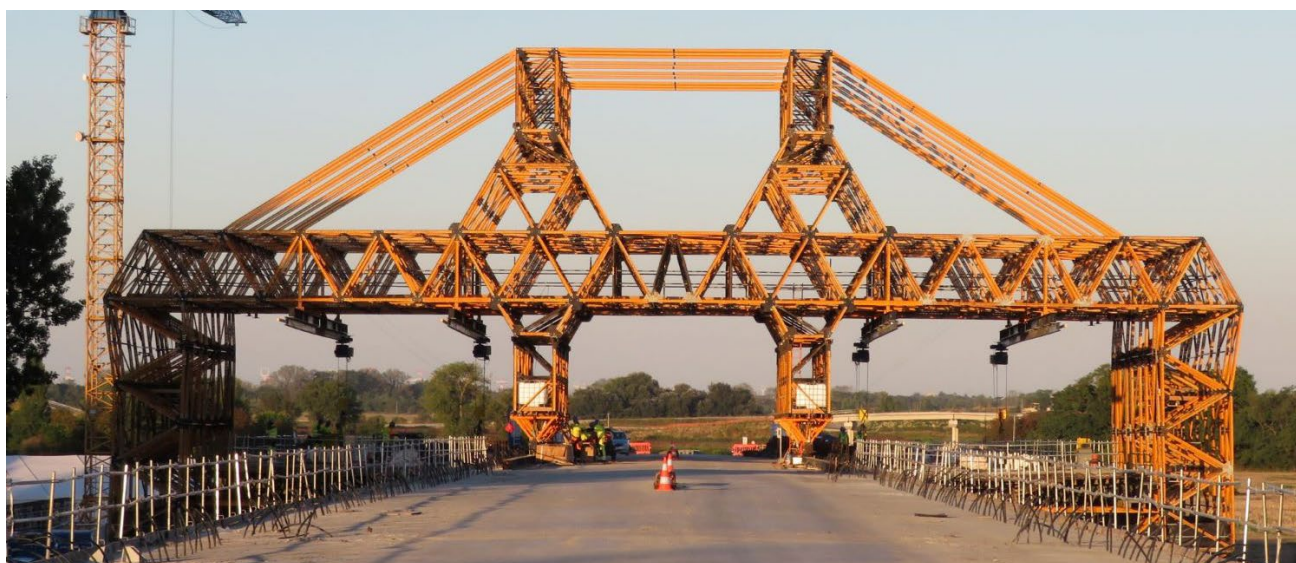


Figura 7. Vista general del carro de alas montado sobre el tablero.



Figura 8. Vista general durante la construcción, en el momento de desencofrado de una fase de cajón central.

Danubio previamente ejecutado o bien sobre una cimbra construida expreso sobre el terreno. Ambos casos han sido descartados por su complejidad desde el punto de vista de diseño y constructivo.

La solución de autocimbra empleada ha de apoyar en todo momento sobre las partes del tablero previamente construidas. Por este motivo, con anterioridad a la llegada de la autocimbra, ha sido necesario construir sobre las pilas los tramos de 4.0m del núcleo central del tablero coincidentes con diafragma (Dovelas 0). Estos tramos de tablero se han construido sobre los aparatos de apoyo definitivos, y han sido bloqueados mediante un útil metálico provisional con la intención de evitar deslizamientos y vuelcos durante la construcción. De igual manera se han construido dovelas 0 similares sobre los estribos.

En una primera fase, la autocimbra apoya sobre la dovela 0 de tablero de pila y sobre la dovela 0 de tablero de estribo. Sobre ella se construye el vano inicial y un tramo de 13m de longitud del vano siguiente (18.5% de la luz), que

queda en voladizo. De esta manera las dovelas 0 quedan incorporadas al vano ejecutado, y sus sistemas de bloqueo provisional pueden ser eliminados. A continuación, la autocimbra avanza sobre el tablero previamente ejecutado hasta el vano siguiente, apoya sobre la siguiente dovela 0 de pila y sobre el frente de la fase de tablero recién construida. En esta situación se procede a construir los 57m restantes de dicho vano (79.5% de la luz) y un tramo de 13m de longitud del vano siguiente. La longitud de una fase constructiva coincide con la longitud del vano tipo de 70m. Los frentes de fase, como se ha comentado, se definen a 13m de pila.

2.3.2. Construcción de los voladizos del tablero

Debe existir al menos un decalaje de tres vanos entre las actividades de construcción de las distintas partes del tablero. Es decir, construido el núcleo central del vano 4 podría iniciarse, si así

le conviene a la Obra, la construcción de los voladizos del vano 1.

Los voladizos se construyen también por fases, habiéndose definido un total de 63 fases a lo largo del tablero. La primera y última fases son especiales y se ejecutan in situ sobre cimbra convencional, mientras que el resto de fases tienen 20m de longitud y se construyen utilizando un carro de alas.

El carro de alas desliza sobre el núcleo central del tablero, y permite la colocación de los jабalcones en posición y el armado y hormigonado de la losa forjado.

2.4. Pretensado longitudinal

El pretensado longitudinal del tablero es complejo, resultando uno de los elementos de mayor interés del viaducto.

Atendiendo a la disposición del pretensado dentro de la sección se distinguen tres tipos de pretensado:

- Pretensado longitudinal de almas. Se definen 16 tendones de 31 cordones de 150mm^2 de sección a lo largo de todo el tablero, 8 tendones por alma.
- Pretensado longitudinal del forjado superior. Se definen 6 tendones (8 en las pilas extremas) de 19 cordones de 150mm^2 de sección y 26m de longitud, centrados sobre pila.
- Pretensado longitudinal del forjado inferior. Se definen 4 tendones de 19 cordones de 150mm^2 de sección en los vanos extremos, así como en los 3 vanos centrales que apoyan en las pilas que actúan como punto fijo longitudinal del tablero.

Atendiendo al momento de tesado, podemos distinguir entre aquellos que son tesados una vez construido el núcleo central del tablero, y aquellos que lo son una vez construida la sección completa del tablero, núcleo y voladizos:

- La mitad del pretensado longitudinal de las almas, 4 tendones por alma, se introduce en la sección del núcleo central del tablero, mientras que la otra mitad del pretensado se introduce en la sección completa del tablero.
- Todo el pretensado longitudinal del forjado superior se introduce en la sección del núcleo central.
- El pretensado longitudinal del forjado inferior se introduce en la sección del núcleo central en los vanos extremos del tablero, mientras que en los vanos centrales se introduce en la sección completa.

En líneas generales, atendiendo al estado tensional longitudinal del núcleo central del tablero, el pretensado introducido en la sección parcial es más eficaz que el introducido en la sección completa, que tiene una mayor área. No obstante, atendiendo al estado tensional longitudinal de los voladizos, que se construyen en segunda fase, y por tanto a tiempo cero no reciben compresión alguna del pretensado introducido con anterioridad a su construcción, es necesario introducir una parte importante del pretensado en la sección completa. El hecho de que la construcción de la sección tipo se realice en dos fases influye notablemente en la cuantía de pretensado resultante.

Se ha realizado un estudio detallado de elementos finitos para analizar la distribución no lineal de tensiones en el ancho de la sección debido al arrastre por cortante. Este estudio ha permitido evaluar de manera precisa el máximo nivel tensional alcanzado en el voladizo. Ha permitido reducir significativamente la cuantía de pretensado longitudinal del tablero, de tal manera que se ha podido definir todo el pretensado interior adherente, evitando la necesidad de definir adicionalmente un pretensado exterior por el interior del cajón, como se ha hecho en puentes similares existentes, comparables en luces y anchos con el puente objeto de este artículo. Este estudio se presenta en un artículo

aparte de este mismo congreso, titulado “Puente del Danubio en Bratislava. Análisis del fenómeno de arrastre por cortante y del complejo proceso constructivo de un tablero de 35m de ancho”.



Figura 9. Detalle del regresamiento de las almas para el cruce y anclaje de los tendones de pretensado de alma.

Los tendones definidos por las almas del cajón se definen de la longitud de un vano. Todos los tendones se cruzan, no habiéndose definido en ningún caso acopladores. Dada la gran densidad de tendones que circula por el alma, se ha definido el anclaje de los mismos, y por tanto la zona de cruce de los tendones que solapan, en dos secciones diferentes del tablero, simétricas respecto del eje de pila. La mitad de los tendones, que se tesan nada más construir el núcleo central del tablero, anclan en el frente de fase construido mediante autocimbra, a 13m de distancia del eje de pila, mientras que la otra mitad de los tendones, tesados a sección completa, anclan en la sección de tablero simétrica respecto del eje de pila, es decir, 13m por detrás de la pila. En ambas secciones se define un regresamiento de las almas para albergar las trompetas de pretensado.

Dada la tipología y las dimensiones de los voladizos del tablero, ha sido necesario definir un pretensado transversal a través de la losa forjado superior del tablero, consistente en tendones compuestos por 4 cordones de 150 mm², dispuestos cada 0.8m de tablero.

Dicho pretensado sirve para contrarrestar la tracción transversal producida en la losa

forjado del voladizo, al actuar como puntal en el sistema puntal-jabalcón diseñado.

Los tendones se disponen en vainas plásticas estancas inyectadas, lo cual ha permitido aceptar cierto grado de fisuración para la combinación frecuente de acciones.



Figura 10. Vista inferior del tablero

3. Subestructura

El viaducto se diseña en zona sísmica.

Las cuatro pilas centrales del tablero materializan el punto fijo longitudinal del tablero. El tablero apoya en estas pilas sobre dos aparatos de apoyo esféricos fijos. En el resto de pilas el movimiento longitudinal del tablero es libre.

En sentido transversal, en función de la altura de la pila, y por tanto de su flexibilidad, se dispone coacción al desplazamiento en una de las columnas o en las dos.

Todas las pilas están cimentadas en profundidad mediante 15 pilotes de 1.2m de diámetro y una longitud media de 20m.

4. Actividad desarrollada por Torroja

Torroja Ingeniería, SLP ha proyectado este viaducto y está desarrollado en la actualidad las labores de asistencia técnica durante las obras de construcción.



Figura 11. Paso de la autopista D4 sobre el río Danubio. Vista general durante la construcción, desde el acceso este.



Figura 12. Paso de la autopista D4 sobre el río Danubio. Vista general durante la construcción del viaducto de acceso este y de parte del puente sobre el Danubio, ambos diseñados por Torroja Ingeniería, SL.