

# Puente sobre el río Danubio en Bratislava (Autopista D4). Viaducto principal, construido por avance en voladizo.

*Bridge over the Danube river at Bratislava (Motorway D4).  
Main bridge, built up using the balanced cantilever method.*

José M Simón-Talero Muñoz<sup>a</sup>, Ramón M<sup>a</sup> Merino Martínez<sup>b</sup>,

Ángel Carriazo Lara<sup>c</sup>, Javier Domínguez Martínez<sup>d</sup>, David Walias Sánchez<sup>d</sup>,

Wojciech Wlodzimirski<sup>e</sup>, Luis Martín-Tereso López<sup>f</sup>

<sup>a</sup> Doctor ingeniero de caminos, canales y puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Consejero Delegado.

<sup>b</sup> Ingeniero de caminos, canales y puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Jefe de Proyectos.

<sup>c</sup> Ingeniero de caminos, canales y puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Director Técnico.

<sup>d</sup> Ingeniero de caminos, canales y puertos. TORROJA Ingeniería, SLP. Ingeniero de Proyectos.

<sup>e</sup> Ingeniero de caminos, canales y puertos. FERROVIAL AGROMÁN, SA. D4R7 ppp, Structures Design Manager.

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

## RESUMEN

El viaducto principal de la autopista D4 sobre el río Danubio es un puente continuo de canto variable, de hormigón pretensado, de 430m de longitud total y 35m de ancho. La sección tipo del puente se construye en dos fases, mediante carro de avance en voladizo 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

The D4 Main viaduct over the Danube river is a continuous prestressed concrete bridge, defined with variable depth, 430m long and 35m wide. The bridge typical section is built up in two phases, using two travelers, for the deck box core and for the wings. 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, Avance en Voladizo, Dovela, Torroja.

**KEYWORDS:** Prestressed concrete, Box girder, Overhang, Balanced cantilever method, Segment.

## 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.



Figura 1. Vista aérea del paso de la autopista D4 sobre el Danubio desde la margen izquierda del río.

- El viaducto de Acceso Oeste, en la margen derecha del río Danubio, pasa por encima de la llanura de inundación del río y del ramal fluvial Jarovecké, y 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, construidos mediante autocimbra, mientras que los viaductos centrales son puentes construidos 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 principal 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.

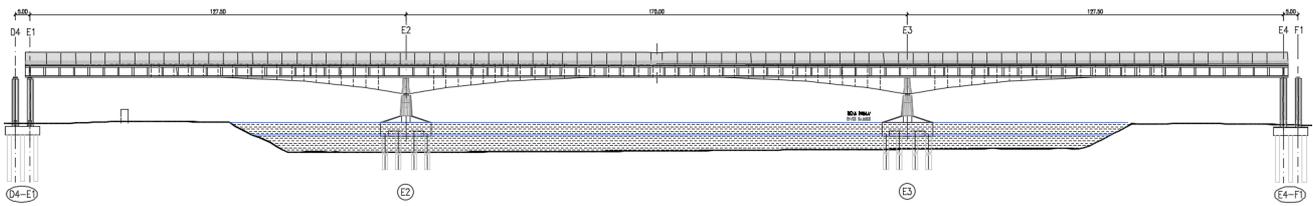


Figura 2. Alzado del viaducto principal sobre el Danubio.

## 2. Tablero

El viaducto principal del puente sobre el Danubio tiene 430m de longitud total, dividida en 3 vanos de 130+170+130m de luz. El viaducto salva el propio cauce del Danubio, alcanzando una altura sobre el terreno de las márgenes del cauce de 20.0m, en el centro del vano principal. El tráfico fluvial circula bajo el

vano principal, habiéndose definido unos gálibos mínimos horizontal de 150m y vertical de 10m.

El tablero es continuo de canto variable, 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 jabalcones prefabricados de hormigón armado.

REZ A-A/SECTION A-A  
 1:150

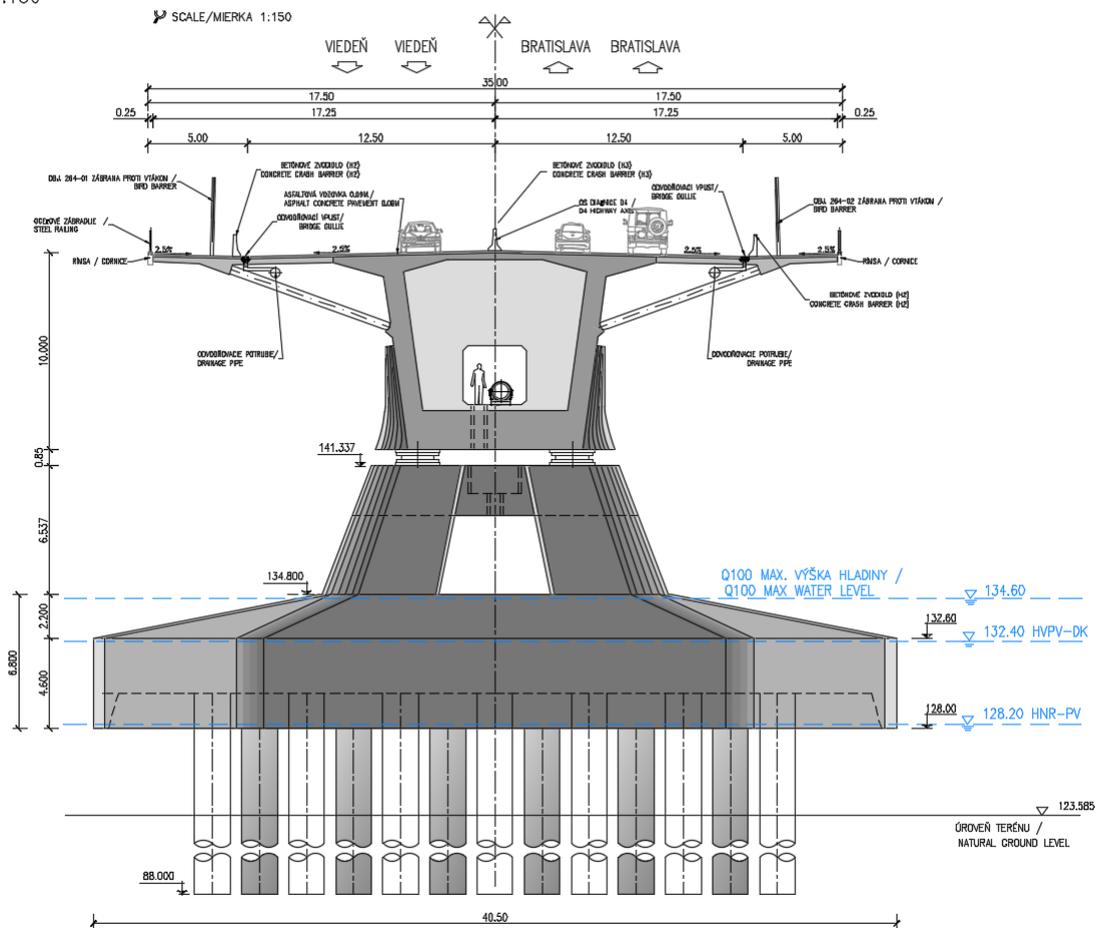


Figura 3. Sección tipo del viaducto por pila principal.

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 jabalcones, acero pasivo B550 S y acero activo Y1860 S7.

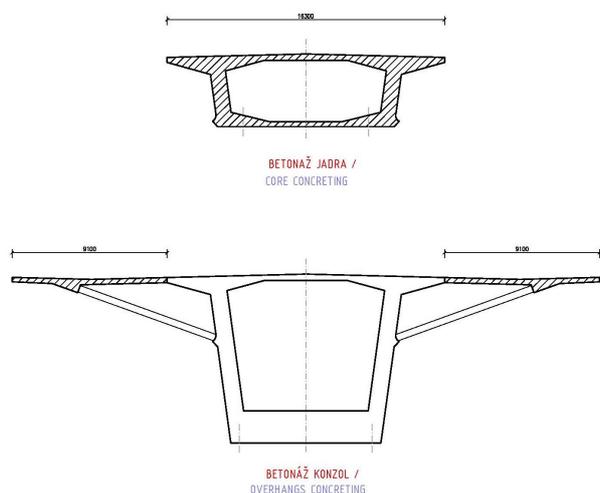


Figura 4. Fases de construcción de la sección tipo del tablero. Arriba se define el cajón central del tablero de 16.3m de ancho, y abajo se definen los voladizos de 9.1m de ancho.

## 2.1. Cajón central

El canto del tablero es variable, siendo máximo de 10.0m sobre pila y mínimo de 4.3m en centros de vano y estribos. La variación de canto es parabólica entre la sección de pila y la sección a 85m de pila, que coincide con el centro del vano principal. En los vanos laterales, los 45m de tablero próximos al estribo se definen con 4.3m de canto constante.

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 2.5m, hasta alcanzar 0.85m en la unión con las almas.

El forjado inferior se define de canto variable, con un espesor máximo sobre pila de 1.95m y un espesor mínimo de 0.29m en centros de vano y estribos. El forjado inferior está acartelado entre almas, con tres zonas diferenciadas: una central de espesor variable según se ha comentado, y a cada lado de ésta sendas zonas con transición lineal de espesores en una longitud variable, máxima de 2.5m para el espesor de forjado mínimo, hasta 0.9m en la unión con las almas.

Por fuera del cajón se construyen en primera fase sendos voladizos de 2.5m de longitud y canto variable, entre 1.2m en el entronque con el alma y 0.3 m en sus extremos.

El cajón central y los citados voladizos completan un ancho central de 16.3m de tablero que se construye en primera fase, como más adelante se explicará. Por fuera de esta banda central se construyen sendos voladizos de 9.1m de ancho en segunda fase, que completan el ancho total del tablero de 35m.

Las almas tienen espesor variable, 1.0m en las inmediaciones de pila, y 0.7m en los centros de vano y estribos. Localmente en estribos se regruesan hasta 1.2m.

En pilas y estribos se definen diafragmas de 3.0m y 3.8m de espesor, respectivamente. El diafragma de pila se define con un paso de hombre de 3.2m de ancho y 3.0m de altura. Los diafragmas de estribo 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 laterales 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. En las pilas principales se ha diseñado un acceso a las mismas desde el tablero a través de un paso de hombre en el diafragma de pila.

A lo largo del tablero discurre una tubería de agua potable de 1.2m de diámetro.

## 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 9.1m de ancho sustentada cada 5m mediante jabalcones 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 5.35m 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 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. No se define ningún tipo de elemento pasante entre jabalcón y cajón.

Todos los jabalcones del tablero se definen con la misma inclinación, habiéndose definido sus apoyos alineados a lo largo del tablero. En las zonas de tablero de canto menor, los jabalcones apoyan directamente contra el forjado inferior, mientras que en las zonas próximas a pila, de mayor canto, los jabalcones apoyan directamente contra el alma. Es de destacar que no ha sido necesario definir ningún tipo de elemento de rigidización en el interior del cajón entre almas, en la zona de apoyo de los jabalcones.

El contacto entre jabalcón y cajón se materializa en unos cajeados diseñados expresamente 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, 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.

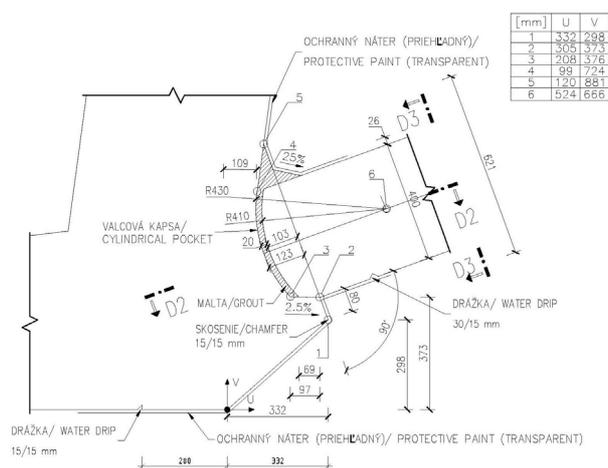


Figura 5. Detalle del contacto entre jabalcón y cajón

## 2.3. Pretensado longitudinal

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



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.

## 2.4. Pretensado transversal

Dada la tipología y las dimensiones de los voladizos del tablero, ha sido necesario definir un pretensado transversal a través de la losa forjada

superior del tablero, consistente en tendones compuestos por 4 cordones de 150 mm<sup>2</sup>, dispuestos cada 0.8m de tablero.

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

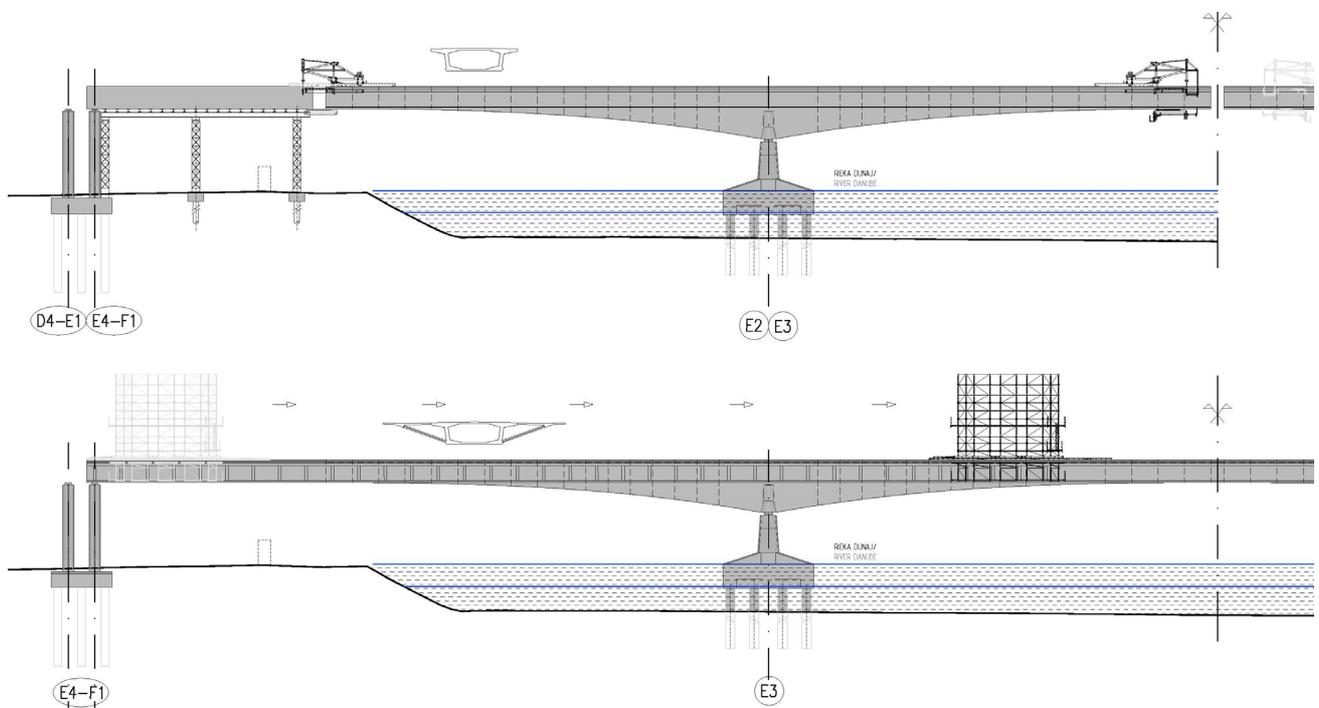


Figura 9. Detalle de las distintas fases del proceso constructivo: construcción del cajón central en las inmediaciones de pila mediante carro de avance en voladizo, y en las inmediaciones de estribo mediante cimbra convencional apoyada en el terreno. Construcción de los voladizos mediante carro de alas en segunda fase.

## 2.5. Proceso constructivo

Atendiendo a la sección tipo, el tablero se construye en dos fases. Según se ha explicado ya, en una primera fase se construye el ancho central del tablero, o núcleo central, de 16.3m de ancho. En segunda fase se construye el sistema de puntal-jabalcón que constituye los voladizos, de 9.1m de ancho, a cada lado del tablero.

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. Como única excepción, los tramos de tablero laterales, de 45m de longitud, han sido construidos

mediante el empleo de una cimbra convencional apoyada directamente sobre el terreno.

### 2.3.1. Construcción del núcleo central del tablero

La construcción del núcleo central del tablero se realiza mediante el método de avance en voladizo. La construcción del tablero se realiza simultáneamente sobre las dos pilas principales del puente, con lo que son necesarios 4 carros de avance en total, dos por pila. Se han definido 16 parejas de dovelas por cada pila con un límite de peso unitario por dovela de 5000 kN. Las 7 dovelas de mayor canto tienen 4.2m de longitud, mientras que el resto se definen de 5.0m. Las parejas de dovelas se definen simétricas respecto del eje de pila.

Dada la libertad de giro de flexión con que se ha definido el tablero sobre las pilas principales, ha sido necesario diseñar una pila provisional sobre el encepado de las pilas principales, del lado del vano lateral, con el objetivo de anclar el tablero y contrarrestar los importantes momentos de desequilibrio producidos durante la construcción del mismo por avance en voladizo.

Los 45m de longitud de núcleo central próximos a las pilas-estribo, se han construido in-situ, con la ayuda de una cimbra convencional apoyada sobre el terreno.

### 2.3.2. Construcción de los voladizos del tablero

Los voladizos se construyen por fases, habiéndose definido un total de 23 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 forjada.

El carro de alas empleado es el mismo utilizado en la construcción del Viaducto de Acceso Este, que se realiza con anterioridad. Una vez finalizada la construcción de los voladizos de este viaducto adyacente, el carro de alas se transporta sobre el tablero del viaducto principal y continúa la ejecución de los voladizos, desde el estribo hasta la sección de tablero a 30m del centro del vano principal sobre el Danubio. En este punto, el carro de alas interrumpe la construcción de los voladizos y se transporta hasta el estribo opuesto. En esta posición se invierte el sentido de la marcha del medio auxiliar, y se reanuda la construcción de los voladizos desde el estribo hasta el centro del vano principal, quedando para el final la construcción de los voladizos de los 60m centrales del vano principal.

Hay que tener en cuenta que durante la construcción de la segunda fase del tablero, el nivel tensional en los voladizos recién ejecutados es muy próximo a cero. Se ha definido un pretensado longitudinal adicional del tablero en tercera fase, a sección completa, para limitar la aparición de tracciones longitudinales en los

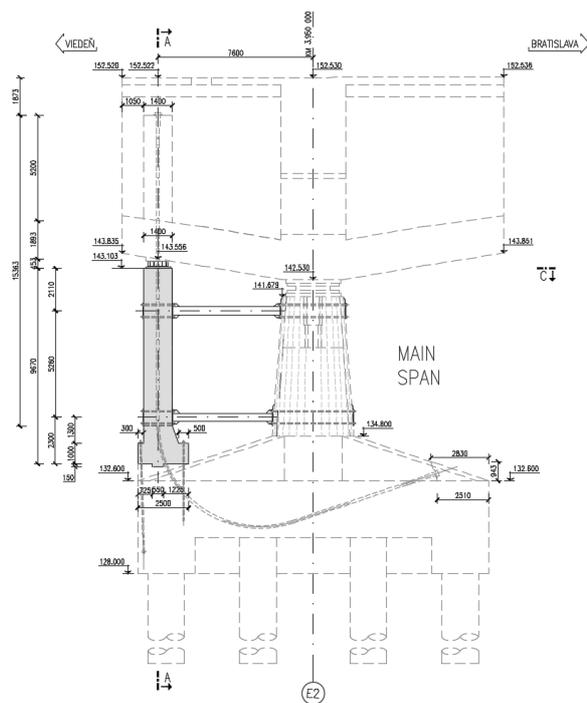


Figura 10. Vista lateral de una pila principal durante la construcción del tablero, dotada de pila provisional.

voladizos a tiempo cero. Este pretensado ha de introducirse en el tablero una vez construidos los voladizos en todo el tablero, a excepción de los 60m centrales del vano principal. Una vez introducido este pretensado se procederá a terminar la construcción de los voladizos del vano principal. A lo largo de la vida de la estructura se producirá una transferencia de tensiones del núcleo central del tablero hacia los voladizos, con lo que el nivel tensional de los voladizos mejorará. Mediante la secuencia de hormigonado definida se ha controlado la aparición de tracciones en el hormigón de los voladizos a edades tempranas, reduciéndose al mínimo la cuantía necesaria de acero de pretensar de tercera fase.

A grandes rasgos, el proceso constructivo del tablero se resume a continuación:

- Construcción de los tramos de Tablero en T sobre pila principal mediante avance en voladizo. Pretensado isostático de primera fase.
- Construcción de los tramos laterales de 45m in-situ sobre cimbra. Pretensado parcial de continuidad en el forjado inferior. Una vez construidos dichos tramos se retira la cimbra, y quedan apoyados isostáticamente en sus dos extremos, sobre el estribo y sobre una torre provisional.
- Conexión de las T sobre pila y los tramos laterales de 45m. Pretensado de continuidad lateral, o de segunda fase.
- Eliminación de las pilas provisionales de las Ts.
- Conexión de las dos T en el centro del vano principal. Pretensado de continuidad central, o de segunda fase.
- Construcción de los voladizos por fases, en avance desde estribos hacia centro de vano, a excepción de los 60m centrales del vano principal.
- Pretensado longitudinal de tercera fase.
- Construcción de los voladizos de los 60m centrales del vano principal.

### 3. Subestructura

Las pilas-estribo del tablero tienen forma de U. A semejanza de las pilas de los viaductos de Acceso, se definen dos columnas independientes, una bajo cada alma, unidas en su base mediante un diafragma de hormigón armado. Están cimentadas en profundidad mediante 15 pilotes de 1.2m de diámetro y una longitud entre 25 y 30m.

Las pilas principales se definen dentro del cauce permanente del río Danubio. Tienen forma de U invertida, y están cimentadas mediante 26 pilotes de 1.8m de diámetro. El encepado tiene forma hidrodinámica hexagonal en planta y se define a la altura de la lámina de agua. De esta manera actúa de defensa de la propia pila frente a colisiones de barcos. Se ha definido con un canto total de 6.8m que incluye un faldón inferior de hormigón armado, con lo que se asegura que la superficie del agua intersectará siempre a la altura del encepado en todos los escenarios hídricos posibles. Los pilotes tienen una longitud entre 35 y 40m.

La construcción de las dos pilas principales dentro del cauce se ha ejecutado desde la coronación de sendas islas artificiales, materializadas por recintos de tablestacas rellenos de grava del propio lecho del río.

El punto fijo longitudinal del tablero se materializa en una de las pilas principales. El tablero apoya en esta pila sobre dos aparatos de apoyo esféricos, uno fijo y otro guiado transversalmente. En el resto de pilas el movimiento longitudinal del tablero es libre.

En sentido transversal, todas las pilas disponen de coacción al desplazamiento. En las pilas-estribo, la altura de la pila y la inercia a flexión de las columnas permiten disponer coacción al desplazamiento en las dos columnas. En las pilas principales, la coacción transversal se materializa únicamente en uno de los dos apoyos.

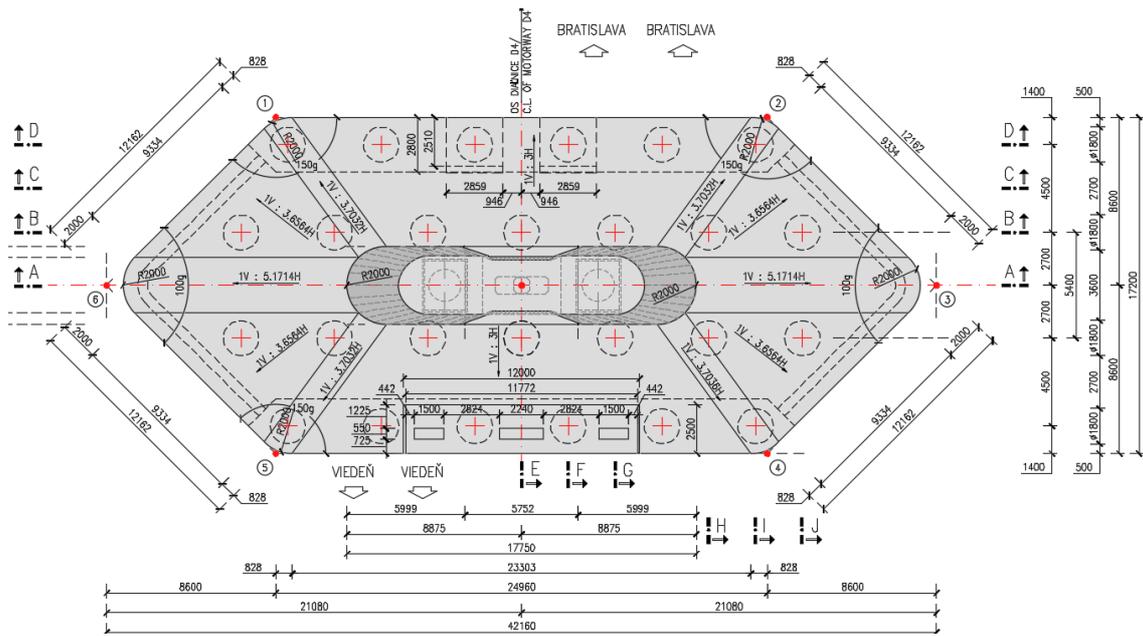


Figura 11. Vista en planta de una pila principal y de su encepado.



#### 4. Actividad desarrollada por Torroja

Figura 12. Aspecto actual de las obras.



Figura 13. Perspectiva de una de las pilas principales durante la construcción.