

Construcción del Puente Zezelj en Novi Sad (Serbia)*

*Erection of the Zezelj Bridge in Novi Sad (Serbia)***

Jorge Cascales Fernández ^{*, a}, Antonio Mora Muñoz ^b, Juan Pérez Torres ^c, Sergio

Couto Wörner ^d, Jose Antonio Agudelo Zapata ^e y Ricardo Rico Rubio ^f

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. k2 Estudio de Ingeniería S.L. Director técnico

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Azvi S.A. Jefe de Obra

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Azvi S.A. Director técnico

^dIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. k2 Estudio de Ingeniería S.L. Director general

^eIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Pontem Engineering Services S.L. Director de Proyectos

^fIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. k2 Estudio de Ingeniería S.L. Director de Ingeniería

RESUMEN

El puente Zezelj es una estructura de 474 metros de longitud y 31.44 metros de ancho para tráfico rodado y ferroviario que salva el río Danubio a su paso por la ciudad de Novi Sad (Serbia). Los dos vanos centrales se resuelven con dos arcos metálicos tipo bowstring con péndolas en configuración network de 180 y 220 metros de luz y un tablero mixto. Los dos arcos, de 4800 y 6400 toneladas, se construyeron sobre tierra, cada uno en una orilla, para posteriormente proceder a su empuje hasta la posición definitiva mediante skid-shoes traseros, utilizando además una pontona delantera para realizar la navegación sobre el río Danubio.

ABSTRACT

Zezelj bridge is a 474 meters long and 31.8 meters wide structure for road and railway traffic over the Danube river in Novi Sad (Serbia). Two steel bowstring arches with network hangers, of 180 and 220 meters, with a composite deck were designed for the main spans. Both arches and the decks, weighing 4800 and 6400 tons, were fully assembled on the riverbanks, on each side, and later launched using skidshoes for the rear end and a barge in the front to sail across the Danube river until reaching the central pier.

PALABRAS CLAVE: arco, empuje, skidshoes, pontona.

KEYWORDS: arch, launching, skidshoes, barge

1. Introducción

El nuevo puente Zezelj en Novi Sad (Serbia) es una estructura de 474 metros de longitud, formada a partir de 4 vanos isostáticos, 27.0+178.5+220.5+48.0, y una sección transversal de 31.44 metros para tráfico

ferroviario y de carretera, incluyendo unas aceras laterales para tráfico peatonal y ciclista. La estructura se sitúa en la misma localización del original puente Zezelj, construido entre 1957 y 1961, y derribado durante los bombardeos

efectuados por la OTAN en el año 1999. En el año 2000 se construyó un puente metálico provisional, tanto para carretera como ferrocarril que fue sustituido por el nuevo puente en el año 2018. Durante los años 2018 y 2019 se procedió al desmontaje del puente provisional, operación objeto de otra ponencia de este congreso.

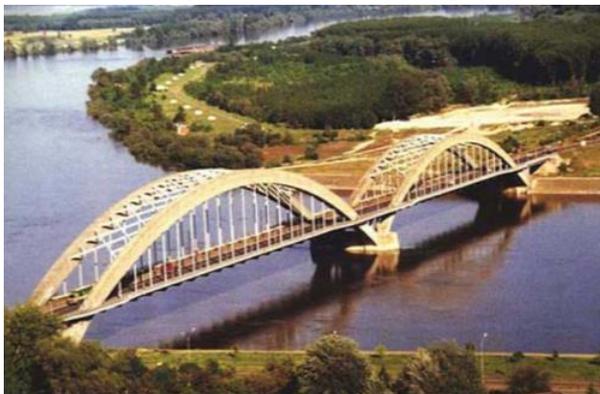


Figura 1. Puente Zezelj original



Figura 2. Puente Zezelj. Daño provocado por los bombardeos

La Administración Serbia convocó un concurso en el año 2010 para la realización del proyecto constructivo y la obra del nuevo puente, que fue ganado por el Consorcio AZVI-TADDEI-Horta Coslada. El proyecto se debía desarrollar siguiendo una serie de condicionantes y para ello el Consorcio contrató a la ingeniería local DEL ING doo:

- El nuevo puente debería mantener la localización del antiguo.
- La imagen de los arcos originales debería mantenerse, si bien el material de los mismos tendría que ser el acero.
- En la medida de lo posible se debería aprovechar la cimentación del puente original.

- La velocidad de diseño para el tráfico ferroviario es de 160 km/h.

En la definición, control y asistencia técnica durante el proceso constructivo colaboraron las empresas ALE, k2 Ingeniería y Pontem.



Figura 3. Nuevo puente Zezelj

2. Descripción de la estructura.

Los cuatro vanos del puente (27.0+178.5+220.5+48.0) están resueltos mediante dos tableros laterales y dos grandes arcos centrales. Los tableros de los 4 vanos están diseñados a partir de un tablero mixto acero-hormigón. En el caso de los vanos laterales el tablero está formado por tres cajones principales de acero, dos laterales y uno central. Los dos arcos centrales de 177 y 219 metros de luz, descontando las entregas de la pila central, tienen 34 y 42 metros de altura, con una relación flecha/luz=5.2. Los arcos son tipo bowstring con péndolas materializadas por tirantes en configuración tipo network. Las principales dimensiones son las siguientes:

- Sección cajón en arcos: 4.0x2.0 para el arco de 177 metros de luz y 4.9x2.0 para el arco de 219 metros.
- Sección cajón en viga de atirantamiento: 2.55x2.00 para los dos arcos.
- La cantidad de acero utilizado en los dos vanos principales es de 11000 toneladas y el tipo de acero es S355, excepto en zonas locales donde se ha utilizado S460.
- La losa de hormigón tiene un espesor de 0.3 metros que se incrementa hasta los 0.4 metros en zona de apoyos.

La cimentación de la pila central, al igual que una de las laterales es la del puente original. En la pila central se realizaron recintos tablestacados, así como un tratamiento de jet-grouting y una estructura metálica auxiliar que permitieron realizar la construcción del alzado de la nueva pila a partir de la cimentación original. Esta pila central se utiliza además como punto fijo de los dos arcos ante las acciones horizontales de diseño.

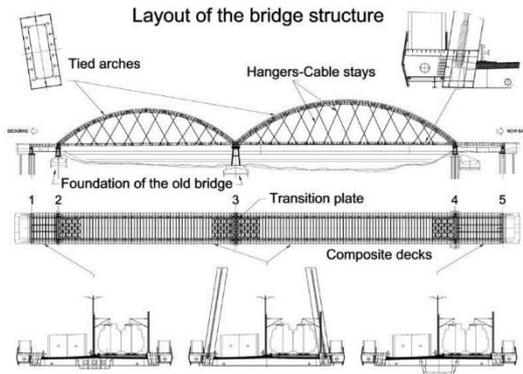


Figura 4. Esquema estructural

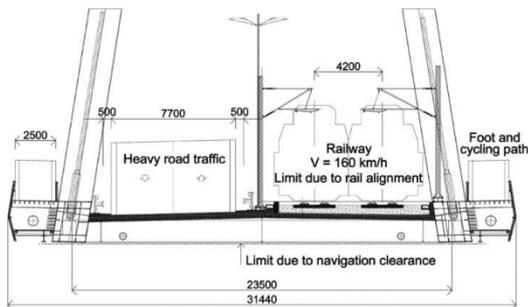


Figura 5. Sección transversal en vanos centrales



Figura 6. Ejecución de pila central

3. Proceso constructivo

3.1. Montaje de tableros metálicos

Las estructuras metálicas se fabricaron en el taller metálico de TADDEI SpA en L'Aquila (Italia) para posteriormente transportarlas a Obra y realizar el montaje in situ. En las fotografías siguientes se pueden observar diferentes fases del proceso:



Figura 7. Montaje en Obra (1)



Figura 8. Montaje en Obra (2)

El montaje incluyó un primer tesado de las péndolas así como la instalación de una serie de columnas temporales de refuerzo situadas en aquellas zonas donde se iba a producir el apoyo en las diferentes fases del empuje.



Figura 9. Situación previa al empuje

3.2. Empuje del primer arco

El proceso de empuje, quizás más bien de traslación debido a que la posición de los apoyos se fija para cada fase, es complejo y consta de diferentes etapas. El resumen de los elementos auxiliares utilizados para el empuje es el siguiente:

- Operaciones de gateo: gatos de 500 y 300 toneladas para una capacidad total de gateo de 8200 toneladas.

- Empuje: 24 skidshoes de 500 toneladas, 16 gatos de empuje, 740 metros de raíles de deslizamiento y 500 apoyos de neopreno-teflón.

- Navegación: 3 pontonas de 66x11.4x3 metros, estructura metálica auxiliar de soporte de 400 toneladas, 4 gatos de 500 toneladas, 4gatos de 650 toneladas, 9 bombas de entre 150 y 380 m³/h de capacidad y 7 cables con cabrestantes para 20, 45 y 60 toneladas.

Se realizó en primer lugar el empuje del arco de 177 metros de luz y 4800 toneladas de peso. A continuación se describen las etapas del proceso de empuje de dicho arco:

- La posición de partida inicial se corresponde con los arcos, construido cada uno de ellos en su respectiva orilla, apoyados provisionalmente en los mamparos de apoyo.

- Se realiza un gateo en dos fases para elevar el puente hasta la cota de empuje y poder situar los skidshoes bajo las columnas de refuerzo temporal situadas en posición central. Para repartir las cargas de los gatos en el tirante inferior se diseñaron varios castilletes metálicos, de diferentes alturas y dimensiones, denominados IST. Esta maniobra de gateo sirvió para tener un primer orden de magnitud del peso de la estructura a empujar, la situación del centro de gravedad, así como para verificar la rigidez y su comparación con los modelos de cálculo realizados.

- Se procede a trasladar la pontona desde el puerto de montaje de la estructura metálica auxiliar que va sobre ella hasta la zona de empuje. Se realiza una prueba de navegación verificando

el nivel de control de la pontona con cables de amarre ayudados por cabrestantes y un remolcador para actuar en caso de incidente.



Figura 10. Gatos de levantamiento y estructura IST



Figura 11. Skidshoe y estructura IST

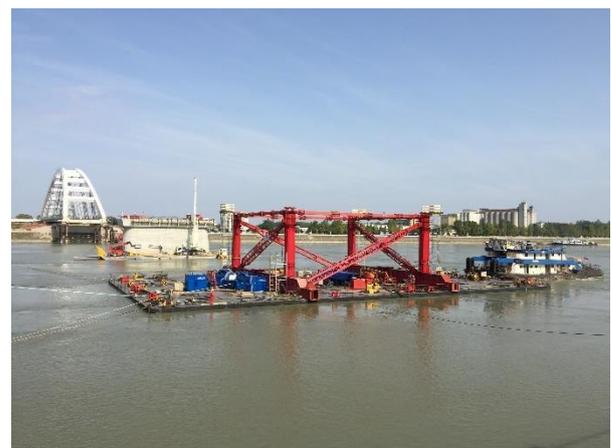


Figura 12. Prueba de navegación y control de pontona



Figura 13. Pontona y estructura auxiliar

- Un vez situada la estructura sobre los skidshoes, y la pontona, en situación de recibir las cargas, se debía elegir el momento adecuado para empezar el empuje. Para tomar esta decisión se debería conocer la cota prevista del Danubio así como la variación de la misma durante los días de navegación. El sistema de navegación diseñado tenía una holgura limitada para adaptarse a una variación de cota del río durante el empuje, por lo que era importante conocer con antelación la cota prevista. Además, había que solicitar el corte de navegación en el Danubio con antelación suficiente, por lo que era necesario planificar toda la maniobra, así como los escenarios posibles durante la misma. La holgura del sistema de empuje venía dada por la carrera de los gatos sobre la estructura metálica de la pontona (400 mm), las diferentes configuraciones con las estructuras IST (300 a 1280 mm) y el lastre de la pontona (330 mm).

- A continuación se procedía a realizar el primer empuje de 61.0 metros hasta llegar a la posición donde se podía realizar la transferencia de cargas a la pontona. El control del empuje se realizaba a partir de las lecturas de las presiones y carreras de los gatos verticales y horizontales en cada embolada, así como la medición por topografía de las 4 esquinas de la estructura en el mismo instante. El coeficiente de rozamiento obtenido era del orden del 3-4% en el empuje en tierra y algo menor durante la navegación de las fases posteriores.



Figura 14. Primer empuje de 61 metros (1).



Figura 15. Primer empuje de 61 metros (2)

- Una vez alcanzada la posición de conexión con la pontona, se procedía al ajuste geométrico de los apoyos, para posteriormente realizar una transferencia de cargas a la nueva posición de los apoyos. Para ello, en la parte delantera se actuaba de forma simultánea con los gatos situados sobre la estructura metálica auxiliar y el lastre de la pontona, y en la parte trasera con los skidshoes traseros.



Figura 16. Transferencia de cargas a pontona

- En esta posición se realizaba una navegación de 103.5 metros empujando con los skidshoes traseros y controlando el frente de la estructura por medio de los cables con cabrestantes.



Figura 17. Navegación (1)



Figura 18. Navegación (2)

- Antes de la llegada a la pila central era necesario realizar un cambio de configuración en los skidshoes traseros y ubicarlos en el mamparo de apoyos, de tal forma que se liberara espacio para situar los apoyos definitivos. Una vez realizado el cambio de skidshoes se realizaba un último tramo de navegación de 11.50 metros y se llegaba a la posición definitiva. Se realizaba un ajuste de la posición longitudinal y transversal de la estructura, por medio de unos gatos adicionales que había en la pila, para lograr el enhebrado con la pieza metálica, que funcionaba como punto fijo, y se hacía la transferencia de skidshoes y gatos de pontona a los apoyos.



Figura 19. Llegada a pila central (1)



Figura 20. Llegada a pila central (2)



Figura 21. Retirada de pontona

3.3. Empuje del segundo arco

El segundo arco tiene una luz entre ejes de apoyos de 219 metros y un peso de 6400 toneladas. Las etapas constructivas del empuje del segundo arco fueron las mismas que el primero. El punto crítico del segundo empuje fue conseguir ajustarse a la variación de cota del río, que tenía una tendencia descendente hasta llegar a valores muy inferiores a los estimados las semanas anteriores. Para ello se recrecieron y reforzaron las estructuras IST hasta prácticamente el límite geométrico máximo compatible con skidshoes traseros y la operación de colocación de la pontona. El día de llegada a la pila central se empujó 100 metros, llegando a velocidades máximas de 15 m/h, incluyendo la operación de cambio de posición de los skidshoes traseros comentada en el apartado anterior para liberar la zona de apoyos, y se llegó a la pila central con una holgura de 5 cm respecto a la cota de apoyo. A continuación se muestran una serie de fotografías del segundo empuje.



Figura 22. Posición inicial de segundo arco

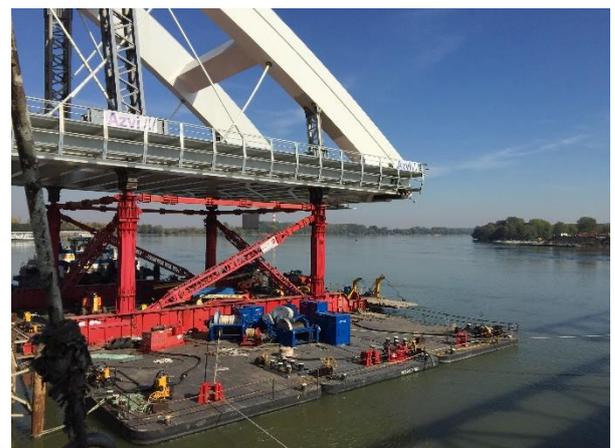


Figura 23. Transferencia a pontona



Figura 24. Navegación



Figura 27. Llegada a pila central (2)



Figura 25. Inicio de navegación de último día de empuje



Figura 28. Llegada a pila central (3)



Figura 26. Llegada a pila central (1)

3.4. Operaciones finales

Una vez colocados los vanos principales se procedió, aprovechando el sistema de carriles y skidshoes instalado, a realizar el empuje de los dos vanos laterales.

Finalmente se realizaron el conjunto de operaciones finales relativas a la desinstalación de las columnas de refuerzo provisionales, montaje de ferralla, hormigonado de losa, control de fuerzas de tesado en péndolas y demás operaciones de acabado.

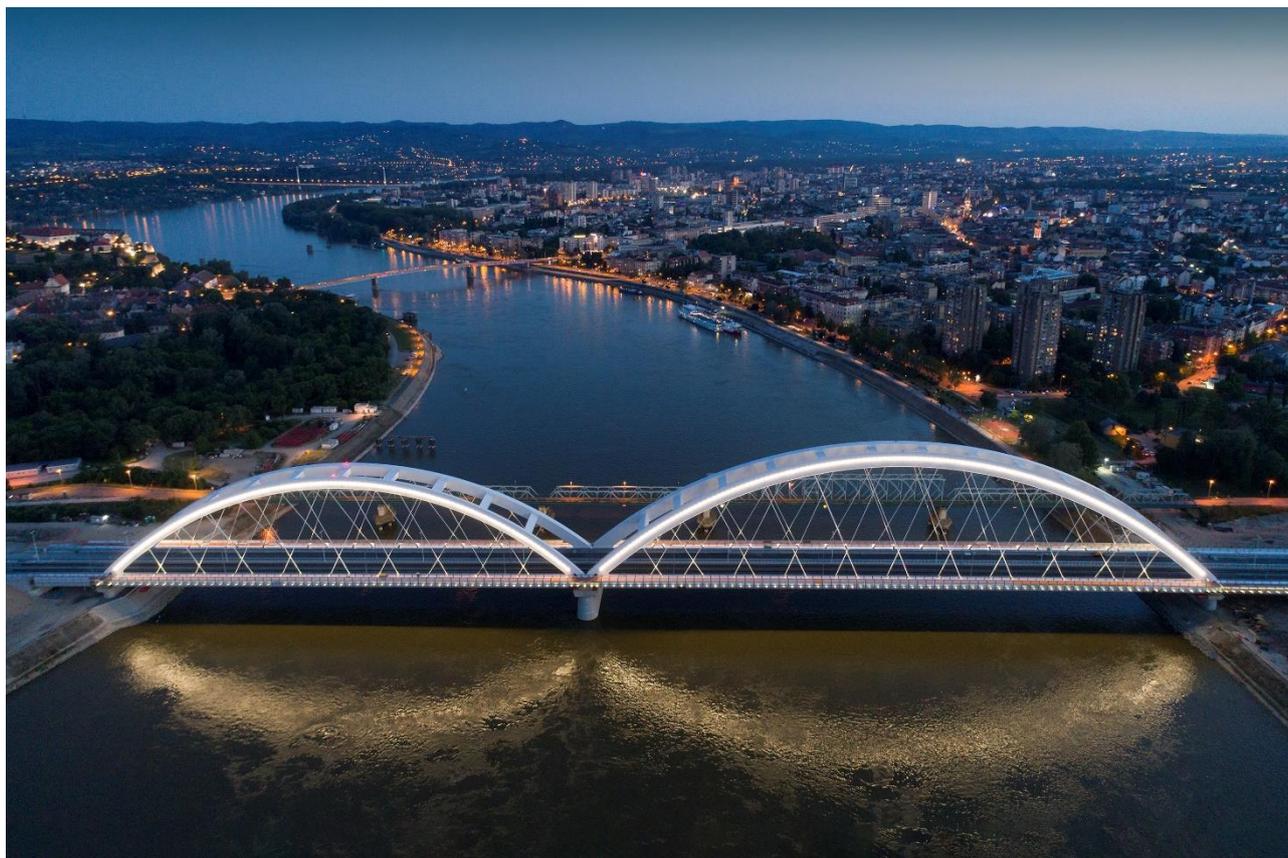


Figura 29. Imagen nocturna del puente acabado

4. Conclusiones

Se han presentado en este artículo las principales características tanto de la obra como del procedimiento constructivo. El empuje de los dos arcos fue una maniobra delicada, con la dificultad añadida de la variación de la cota del Danubio, que gracias a la implicación y trabajo coordinado en equipo de técnicos de diferentes empresas se consiguió solventar con éxito.

Agradecimientos

Se quiere agradecer a todo el personal del Consorcio y en especial a la empresa AZVI la confianza depositada en el equipo técnico para poder vencer todas las dificultades acaecidas en la construcción de una Obra tan compleja como esta.