

## PUENTE SOBRE EL RÍO DANUBIO EN VIDIN-CALAFAT. ASPECTOS RELEVANTES DEL PROYECTO

### Javier MANTEROLA ARMISÉN

Dr. Ingeniero de Caminos  
Carlos Fernández Casado, S.L.  
[jmanterola@cfcsl.com](mailto:jmanterola@cfcsl.com)

### José Luis ÁLVAREZ POYATOS

Ingeniero de Caminos  
FCC Construcción  
[jlalvarez@fcc.es](mailto:jlalvarez@fcc.es)

### José Ignacio DÍAZ DE ARGOTE CERVERA

Ingeniero de Caminos  
FCC Construcción  
[jiidac@fcc.es](mailto:jiidac@fcc.es)

### Antonio MARTÍNEZ CUTILLAS

Dr. Ingeniero de Caminos  
Carlos Fernández Casado, S.L.  
[amartinez@cfcsl.com](mailto:amartinez@cfcsl.com)

### Juan Antonio NAVARRO GONZÁLEZ VALERIO

Ingeniero de Caminos  
Carlos Fernández Casado S.L.  
[janavarro@cfcsl.com](mailto:janavarro@cfcsl.com)

### Borja MARTÍN MARTÍNEZ

Ingeniero de Caminos  
Carlos Fernández Casado, S.L.  
[bmartin@cfcsl.com](mailto:bmartin@cfcsl.com)

## RESUMEN

El puente está formado por tres estructuras claramente diferenciadas: cruce del canal principal de navegación, viaductos de acceso en el cauce del río y prolongación del puente de ferrocarril fuera del mismo.

El puente principal en el canal navegable del río es un puente extradosado continuo, con cinco vanos de luces 124, 3x180 y 115 m. Para mejorar el comportamiento estructural de los vanos centrales, se han incluido puntales inclinados.

El viaducto de acceso en el cauce del río tiene una longitud de 612 m, con siete vanos de 80 m y uno lateral de 52 m.

El viaducto de acceso del ferrocarril tiene una longitud de 400 m, compuesto por 9 vanos de 40 m y uno final de 32 m, con un tablero in-situ de hormigón, con canto 2.0 m y ancho 8.60 m.

**PALABRAS CLAVE:** Puente extradosado de hormigón pretensado, puente de dovelas prefabricadas, construcción por voladizos, puente de carretera, puente de ferrocarril.



Figura 1. puente sobre el río Danubio entre Vidin y Calafat

## 1. Descripción general, aspectos formales

Nuestra propuesta para el Nuevo puente entre Bulgaria y Rumanía se basa en dos ideas básicas:

### 1.1. Primera idea –concepción funcional del puente

El concepto fundamental que subyace en nuestra propuesta para un puente combinado de ferrocarril y carretera sobre el Danubio es que el tren circula en el centro del puente entre las dos calzadas. El eje conjunto en planta del ferrocarril y de la carretera permite la construcción de un único tablero.

En nuestra opinión, esta propuesta tiene muchas ventajas. Se construye un único puente en vez de dos, y las acciones del ferrocarril actúan en el eje del tablero evitando las fuertes torsiones que provocaría que el ferrocarril discurriera sobre uno de los voladizos. Además, el resultado formal es mucho mejor.

Al cruzar la parte navegable, la pendiente del puente de carretera y del ferrocarril es la misma. Desde la isla hacia Bulgaria, la menor pendiente del ferrocarril obliga a utilizar una estructura adicional de dos vigas longitudinales con una losa transversal apoyadas en pilas ovaladas dispuestas sobre el puente principal de carretera. Es fácil para esta estructura pasar por encima de la carretera donde las alineaciones en planta se cruzan, añadiendo pérgolas transversales (Fig. 2-3).

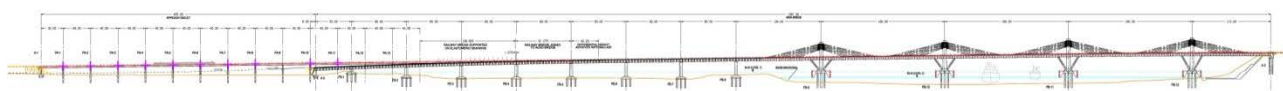


Figura 2. Alzado completo del puente

### 1.2. Segunda idea – concepción estructural

Morfológicamente, el proyecto del puente se divide en tres zonas bastante independientes.

#### Primera zona. Cruce del canal principal del río

Esta es la parte navegable del río, donde, por obligación, debemos dejar tres canales de 150 m de ancho para el tránsito de barcos. Este es el primer factor determinante de la solución.



Figura 3. Puente de aproximación del ferrocarril, transición

Si se selecciona un vano libre de 180m, además de satisfacer los requerimientos de navegación, creamos tres vanos correctamente compensados con el canal principal del río (Fig.4).

En lo que respecta al diseño del puente, es bueno establecer un concepto que unifique completamente el puente sobre el río. Elegimos un tablero con un canto constante de 4.50 m, configurado con un cajón único de hormigón sobre el que circularía el ferrocarril, y dos voladizos con puntales inclinados sobre los que circularía el tráfico de carretera.



Figura 4. Vista del puente principal

Este tablero cubre la longitud completa del río, tanto en su parte principal como en las secundarias. Para esta última, se seleccionaron vanos de 80 m. Sin embargo, para el canal principal del río, es obvio que es imposible pasar 180 m con una tablero de 4.50 m. Por lo tanto, aquí aparece otra de las características principales de nuestro proyecto que le dota de sentido estructural y formal. Incluimos un sistema de atirantamiento de cables paralelos alojados entre la separación entre el ferrocarril y la carretera, que permite mantener un único tablero para todo al ancho del puente. Los cables están separados 8.50 m, por lo que ayudan para la rigidez a torsión necesaria para el tráfico de carretera.

Los cables se conectan a los pilonos apoyado en las pilas principales, a una altura moderada de 19.4m sobre el tablero.

Para limitar las variaciones de tensiones en tirantes propias de un puente de ferrocarril, se añaden dos puntales longitudinales dispuestos de tal manera que no interfieran con el tráfico de barcos.

Este tramo se construye por voladizos sucesivos desde las pilas, con dovelas prefabricadas de 4.186 m. No es necesario ningún apoyo provisional durante la construcción.

#### Segunda zona. Cruce del cauce secundario del río

Para cruzar el cauce secundario del río Danubio en la parte búlgara, se mantiene el mismo tablero utilizado en el cauce principal sin ningún atirantamiento, con vanos de 80 m.

Son vanos adecuados a la envergadura del río, pero no excesivos, que mantienen la coherencia visual, resistente y formal esencial para la configuración estética del puente.

Estos vanos se construyen con dovelas prefabricadas de 2.15 m, utilizando una autocimbra para colocarlas.

#### Tercera zona. Viaducto de acceso del ferrocarril

En el cruce principal del río, tanto el ferrocarril como la carretera utilizan el mismo tablero. Sin embargo, una vez pasada la isla, cuando la carretera baja para encontrar la orilla con una pendiente excesiva para el ferrocarril, éste se eleva respecto de la carretera mediante una estructura de 8.60 m de ancho formada por dos vigas longitudinales conectadas por una losa de 25 cm. El balasto se dispone sobre esta plataforma.

La separación entre las dos plataformas, la carretera y el ferrocarril, se conforma con pilas ovaladas de 0.80 mx0.90m que se apoyan a su vez a cuartos de luz del puente principal. Se crea un puente de 40 m que sale gradualmente del puente de carretera.

Estos vanos se construyen utilizando una cimbra apoyada en el suelo.

## 2. Puente principal sobre el río Danubio

### 2.1. Tablero

El puente principal sobre el río Danubio tiene una longitud total de 1391 m. Lo forman tres tipos de tableros dependiendo de la longitud del vano. El puente de carretera tiene 80 y 180 m, el de ferrocarril 40 m con apoyos intermedios a cuartos de luz del puente de carretera de 80 m. La distribución de vanos es: 52.0 + 7x80.0 + 124.0 + 3x180.0 + 115.0 m. (Fig.-5). El tablero es un cajón único con puntales transversales hecho de hormigón pretensado. El cajón tiene un canto de 4.50 m y un ancho de 31.35 m.

La sección transversal cumple los requerimientos de proyecto.(Fig.5) Consta de dos calzadas independientes de 7.50 de ancho con dos carriles cada una. En la parte derecha hay una acera para peatones y bicicletas de 2.50 m de ancho, mientras que en el lado izquierdo tiene 0.75 m, con sitio adicional para la colocación de señalización, electrificación y mantenimiento. Se disponen varias barreras para preservar las condiciones de seguridad.

cajón único tiene una losa inferior de ancho 7.20 m y espesor variable entre 0.45 m a 0.75 m. Las almas tienen un ancho de 0.50 m que aumenta hasta 1.30 m sobre las pilas. Para completar la sección transversal hay dos familias de puntales transversales inclinados para apoyar los voladizos de la losa superior, situados cada 4.30 m en los vanos de 80 m y cada 4.186 m en los vanos de 180 m.

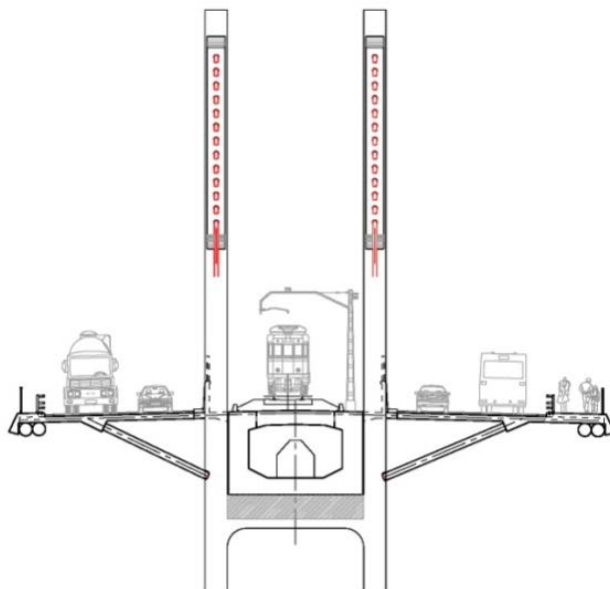


Figura 5. Sección transversal en las pilas principales

La construcción del cajón central tablero de 180 m se realiza por voladizos sucesivos atirantados con dovelas prefabricadas de 4.186 m izadas desde el río con un carro de avance. El resto de la sección transversal se hormigona in situ con un carro especial.

Los vanos de 80 m se construyen por avance en voladizo con una autocimbra. Las dovelas tienen 2.15 m.

El trazado de pretensado se adapta a este tipo de construcción. Un primer grupo de cables están en la losa superior para la construcción en voladizo. Hay un segundo grupo de cables en la losa inferior para completar el pretensado en centro de vano en condiciones de servicio.

El sistema de tirantes se ha proyectado como extradadosado, requiriendo una importante reducción en las oscilaciones de tensión debido a las sobrecargas; para ello se han diseñado:

- Pequeña altura de pilas de alrededor de 1/10 del vano, esto es, unos 19 m de altura para un vano de 180 m.
- Un tablero de elevada rigidez: El canto del tablero, 4.50m, es considerable cuando se compara con disposiciones clásicas de puentes atirantados. Por ejemplo, el puente sobre la Bahía de Cádiz tiene un canto de 3.00 m para una luz de 540 m.
- Se han considerado dos opciones para limitar la oscilación de tensiones en los cables, canto variable del tablero o puntales longitudinales. La segunda es mucho más efectiva.
- Sillas en los pilonos para el paso del sistema de atirantamiento.
- Tirantes de pequeña longitud, siendo la máxima de 90 m.

Esta reducción del rango de tensiones incrementa la capacidad de los cables ante la fatiga. Se pueden utilizar los sistemas de pretensado exterior y las sillas de acero especiales pero sencillas en la parte superior de los pilonos (Fig.6)

Estas especificaciones reducen los costes tanto para la construcción como para el mantenimiento. Los tubos de acero de la silla se han diseñado para permitir la sustitución de cada cable en caso de ser necesario.

## **2.2. Pilas**

En el puente principal hay tres tipos de pilas diferentes. Las pilas pB1 a la pB8 soportan los vanos de 80 m, con alturas que varían de 3.10 a 20.8 m, la sección transversal es un cajón de 4.20x7.20 m y espesor de almas de 0.75 m y 1.00. Las pilas PB9 a la PB12 son para los vanos de 180 m. Soportan tanto el tablero como los pilonos para el sistema de atirantamiento. Se trata de un cajón de ancho 9.70 m y dimensión longitudinal variable entre 4.90 a 5.40 m, con almas de 1.00 y 1.20 m. Los pilonos sobre el tablero son dos secciones rectangulares de ancho 1.20 m y dimensión longitudinal variable entre 4.50 a 4.90 m. La altura total varía entre 38.7 a 44.8 m. Desde el encepado parten un par de puntales inclinados que conectan el tablero con el mismo a una distancia de 14.70 m desde el eje de la pila. Las pilas pA11 a la pA13 son columnas ovaladas con dimensiones 0.80x0.90 m.

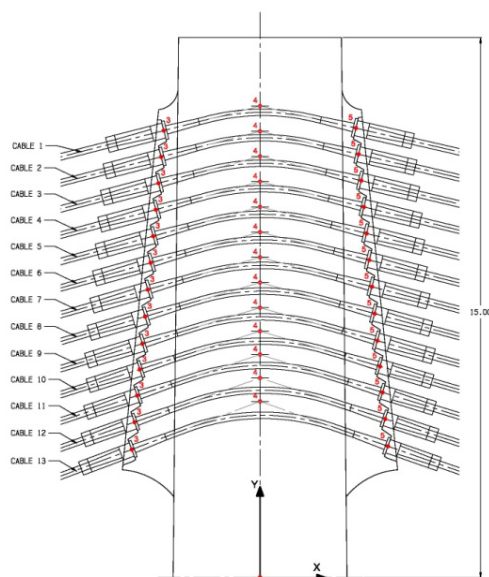


Figura 6. Definición de las sillas de los pilonos para los tirantes extradados

### 2.3. Estribo en la orilla búlgara

El estribo en la orilla búlgara consiste en una pared de 11.4 m, paredes laterales y aletas. El espesor de las paredes verticales es de 3.20 m, y el espesor de las aletas 0.50 m. El estribo está cimentado sobre 18 pilotes de hormigón in-situ de diámetro 1.50 m y 80 m de longitud. El encepado es de 7 m de longitud y 44.0 m de ancho, con un canto de 2.0 m.

### 2.4. Estribo en la orilla rumana

El estribo del el lado rumano consiste en un muro de 6.60 m, paredes laterales y aletas. El espesor de los muros verticales es de 4.35 m, y el espesor de las aletas de 0.50 m. La cimentación del estribo tiene 14 pilotes de hormigón in-situ de diámetro 1.50m y 80 m de longitud. El encepado tiene una longitud de 7.0m, un ancho 32.0 m y un canto de 2.0 m Tanto la localización del estribo como la construcción de la cimentación han sido estudiados para evitar cualquier perturbación de lecho del río rumano.

### 2.5. Cimentaciones

Las pilas pB9 a la pB12 constan de 24 pilotes de hormigón in-situ de diámetro 2.0 m, con un encepado de 15.0 x 40.0 x 6.0 m. Las pilas PB1 a la B8 tienen 7 pilotes de hormigón in-situ de 2.0 m, con encepado de 15.0 x 15.0 x 4.0 m. Todos los pilotes son de 80 m de longitud. Las cuatro cimentaciones pB9 a la pB12 tienen una resistencia muy importante para las cargas horizontales longitudinales debidas a las fuerzas de rozamiento en los apoyos esféricos bajo situación de servicio o las fuerzas sísmicas y el impacto de barcos bajo situaciones accidentales. Todas estas condiciones se han comprobado detalladamente.

### 2.6. Medidas de protección frente al impacto de barcos

Para proteger las pilas frente al impacto de barcos se ha proyectado un emparillado formado por piezas verticales prefabricadas con agujeros para alojar vigas horizontales hormigonadas in situ que dan continuidad a las piezas prefabricadas. El encepado está situado por encima de la cota máxima del nivel del río en situación de emergencia, 36.60 m. Las cimentaciones han sido diseñadas para resistir el impacto de fuerzas de acuerdo al Eurocódigo 1 parte 7(Fig. 7).

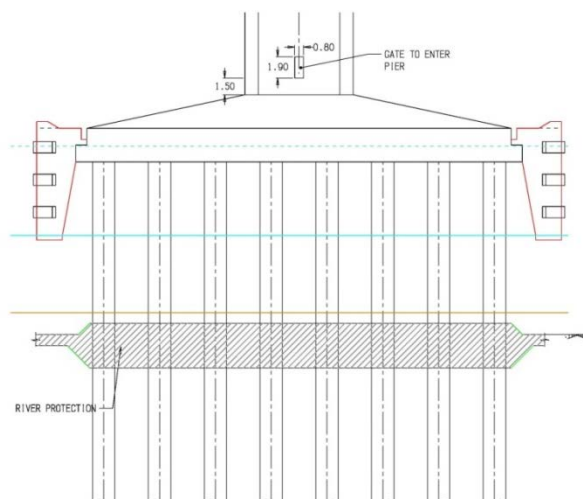


Figura 7. Cimentaciones del puente principal de 180 m y protección frente el impacto de barcos

## 2.7. Apoyos

Los apoyos del puente principal son esféricos. La máxima carga vertical varía de 16000 a 57000 kN. Cada pila pB1 a la pB8 tiene dos apoyos libres y una guía adicional para transmitir las cargas horizontales transversales, situada en el centro de la sección transversal. Este esquema proviene de que las almas son muy gruesas y no se han incluido diafragmas en el tablero en esas pilas. Para disminuir la excentricidad entre el apoyo y el eje del alma, los apoyos se han dispuesto muy cerca de la cara externa de las pilas, y se ha considerado más adecuado introducir las fuerzas transversales en el centro de la sección transversal con las guías laterales, debido a que son muy grandes, de hasta 12500kN.

## 3. Tramo de acceso del ferrocarril

### 3.1. Tablero

El viaducto de acceso del ferrocarril tiene una longitud total de 400 m. La distribución de vanos es de  $32.0 + 9 \times 40.0 + 8\text{m}$ . Es un puente que cruza la carretera en el terraplén para alcanzar el eje central de la sección transversal del puente principal (Fig. 8).

El tablero es una viga doble con una losa transversal de hormigón pretensado. Las vigas tienen sección rectangular maciza de canto 1.90 m y ancho 1.0 m. La losa es de espesor 0.25 m. El ancho total es de 8.60 m (Fig. 9). La sección transversal cumple los requisitos de las bases de proyecto: el ferrocarril con un ancho de 6.0 m, dos caminos laterales de mantenimiento de 0.75 m y 0.80 m para la electrificación. El tablero se construye vano a vano con una cimbra apoyada en el suelo. Tanto el pretensado como la armadura pasiva se han adaptado a este tipo de construcción.

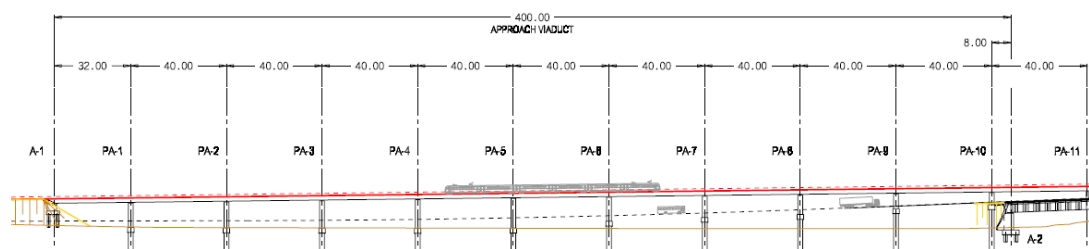


Fig. 8 Alzado del puente de aproximación de 40 m

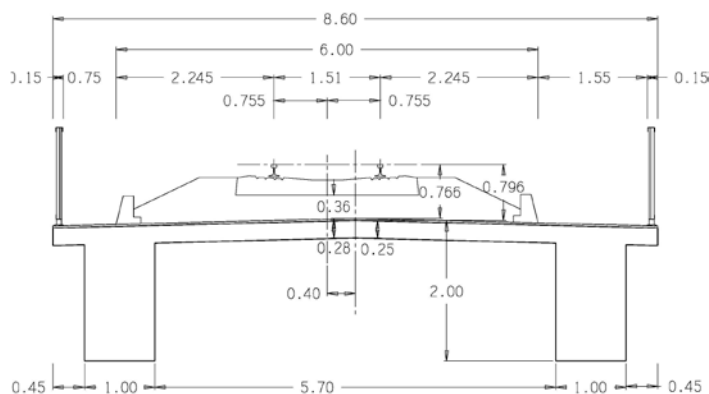


Fig. 9 Sección transversal del puente de aproximación de 40 m

### 3.2. Pilas y estribos

Hay tres tipos de pilas debido al cruce del tablero de ferrocarril sobre el terraplén de la carretera. Las pilas pA1 a la pA4 consisten en dos fustes de hormigón de diámetro 2.0 m. Las pilas pA5 a la pA8 consisten en vigas transversales que trabajan como pérgolas soportadas por dos fustes individuales de hormigón de diámetro 2.0 m. Las pilas pA9 y pA10 son fustes únicos de hormigón y diámetro 2.0 m.

El estribo consta de un muro de 1.60 m alto, paredes laterales y aletas. El espesor del muro es de 2.0 m, con aletas de 0.50 m. El estribo está cimentado sobre 6 pilotes de hormigón in-situ de diámetro 2.0 m de 80 m de longitud. El encepado es de 12.0 x 7.0 x 2.0 m.

### 3.3. Cimentaciones

Cada fuste está cimentado con un único pilote de diámetro 2.0 y 80 m de longitud conectado con la cabeza mediante un encepado prismático de 2.70 x 2.70 x 2.00 m.

### 3.4. Apoyos

Todos los apoyos de la PA1 a la pA10 son de neopreno-teflón, libres en la dirección longitudinal y guiados en la transversal. Sus dimensiones van de 600 x 700 x 160 en la pA1 hasta 1550 x 1000 x 400 en la pila pA10. Con esta opción, las fuerzas sísmicas se reducen enormemente y no es necesario conectar los dos fustes de la pilas para que trabajen conjuntamente.

## 4. Principales aspectos del cálculo estructural

### 4.1. Modelos de cálculo

Para el cálculo se ha empleado un modelo completo tridimensional utilizando el método de rigidez elástico lineal. El modelo incluye elementos para el tablero, pilas, pilonos, estribos, cables y cimentaciones, con un programa adecuado para cálculo estático y dinámico de estructuras modelizables con barras en 2 y 3 dimensiones. Los modelos estructurales se analizan mediante el método de rigidez para obtener desplazamientos, fuerzas en los elementos y reacciones de los apoyos. Para modelizar las cimentaciones, se han considerado muelles lineales que simulan el comportamiento del terreno para obtener una matriz de rigidez tridimensional en todos los apoyos.

Se han considerado los efectos no lineales geométricos en los tirantes mediante el modulo de Ernst y la matriz de rigidez geométrica, con respecto a la situación de carga permanente. Se ha

comprobado que la diferencia entre el estado de carga permanente y el de carga máxima es mínima.

Al linealizar estos efectos, los esfuerzos y desplazamientos resultantes, se pueden sumar y combinar para obtener las envolventes en cada sección. Para estudiar los distintos detalles del puente se han desarrollado varios modelos parciales de elementos finitos:

- Elementos placa para analizar la deformación por cortante y los anchos efectivos de la losa superior, tanto para el puente de 80 m como para el de 180 m.
- Detalles estructurales.
- Puntales de la sección transversal.
- Unión entre el tablero y las pilas y puntales.
- Rigidez dinámica y estática de las cimentaciones.
- Protección de las cimentaciones frente al impacto de barcos.

#### **4.2. Interacción suelo-estructura**

El tablero está completamente empotrado en los puntales, permitiendo una configuración integral del puente que resiste las acciones horizontales debido al frenado y a las cargas sísmicas en las cimentaciones de las cuatro pilas principales. Esto también minimiza el número de juntas en el puente, configurándolo con 1791 m sin juntas; solo aparecen tres juntas de dilatación en los tres estribos pB9 a pB12. Esto introduce numerosas ventajas estructurales y de mantenimiento, pero también crea un problema con las deformaciones impuestas de la estructura, principalmente fluencia y retracción y temperatura. Para reducir estos efectos, se ha proyectado una cimentación lo más flexible posible, y ha sido necesario establecer con la mayor precisión posible la matriz de rigidez de la cimentación. Para ello se han desarrollado varios modelos:

- Modelos de barras con muelles lineales representando el terreno.
- Modelos de barras con muelles no lineales, basados en las curvas p-Y para modelizar la rigidez del terreno.
- Modelos de elementos finitos lineales 3D sólidos, conectados a través de muelles basados en leyes p-Y con los pilotes, modelizados con elementos barra.

Se realizó una comparación completa entre los tres modelos, tanto para comportamiento estático como dinámico, para ajustarlos y obtener resultados adecuados. Como las propiedades del terreno tienen muchas incertidumbres, se hicieron análisis de contraste obteniendo dos matrices, una para suelo flexible y otra para suelo rígido. Finalmente, para el sismo, se hicieron matrices de rigidez adicionales para tener en cuenta la posible licuación del terreno.

#### **4.3. Sistema de atirantamiento**

Los cables se han proyectado de acuerdo a las recomendaciones del SETRA. Este documento admite una máxima fuerza en el tirante de  $0.50 F_{GUTS}$  para un puente atirantado clásico, y  $0.60 F_{GUTS}$  para el sistema extradadosado. Ambos límites son válidos solo si se toman medidas especiales para limitar los esfuerzos de flexión de los cables en los anclajes, donde  $F_{GUTS}$  es la máxima fuerza del cable en estado límite último. Para un sistema de atirantamiento extradadosado se considera que la máxima oscilación de tensiones en los cables bajo la acción de sobrecargas frecuentes debe estar entre 30 y 100 MPa, considerando un valor de referencia 50. Mientras que para un sistema de atirantamiento clásico es más de 100 MPa.

La fuerza máxima del tirante para la combinación rara de acciones, puede obtenerse a partir de la máxima sobretensión en el cable bajo acciones frecuentes de acuerdo a la expresión:

$$F_{SLS} \leq 0.46 \left( \frac{\Delta F_{Freq}}{140} \right)^{-0.25} F_{GUTS}$$

Adicionalmente se ha realizado un análisis completo de fatiga con la BS 5400. El resultado para el cable con la máxima sobretensión bajo sobrecargas frecuentes, que es 68 MPa, (Fig.-10) demuestra que no aparecen daños por fatiga.

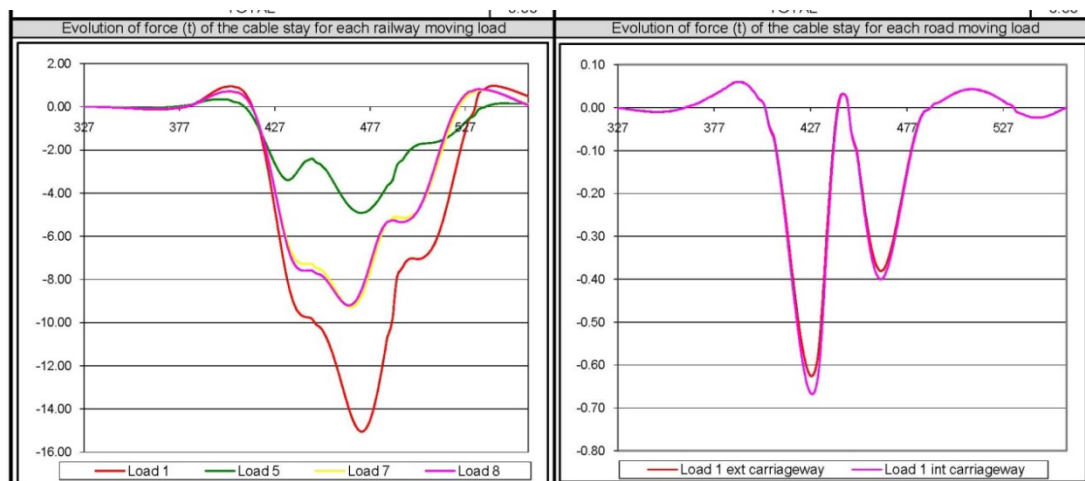


Fig. 10. Comprobación a fatiga de la fuerza axial del tirante extradadosado con la mayor oscilación de carga bajo cargas frecuentes

#### 4.4. Principales aspectos constructivos

Los métodos de construcción han tenido implicaciones desde el punto de vista del comportamiento del puente:

- Debido a que el tablero está formado por dovelas prefabricadas, no pueden aparecer tracciones en la combinación rara, puesto que no hay armadura pasante en las juntas pegadas con resina.
- Debido al hormigonado del tablero en varias fases, es necesario un control tensional detallado, incluyendo los efectos de fluencia y retracción entre las diferentes capas de la sección transversal.
- Debido a la construcción por avance en voladizos, el puente tiene numerosas fases constructivas, que necesitan un análisis detallado, y modifican el comportamiento estructural

Por todo ello, fue necesario modelizar la secuencia completa de construcción de más de 300 fases, y un análisis detallado de todas las partes del puente, tanto durante su construcción como durante su vida útil, incluyendo un análisis paso a paso de los efectos diferidos del hormigón.