

Puente sobre el río Neris en Lituania, como parte de la línea ferroviaria de alta velocidad Rail Báltica

Bridge over the Neris River in Lithuania, as part of the Rail Baltica high-speed railway line.

Manuel Casado Lechuga ^a, Miguel Sacristán Montesinos ^b,

Javier Fernández Antón ^c, Juan Ruiz Escobedo ^d

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. IDOM. mcl@idom.com

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas&Asociados. msacristan@arenasing.com

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas&Asociados. jfernandez@arenasing.com

^dIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas&Asociados. jruiz@arenasing.com

RESUMEN

El puente sobre el río Neris en Lituania es la estructura principal del tramo de la línea ferroviaria de Alta Velocidad Rail Báltica entre Kaunas y Ramygala. Se trata de un viaducto de 1510 m de longitud con un vano principal de 150 m sobre el río por razones ambientales, que se ejecuta mediante voladizos sucesivos. El viaducto se divide en dos tramos, conectados por transmisores de impacto y con un punto fijo mediante pila en A. El proceso constructivo de vanos tipo es el de autocimbra móvil. En el diseño y ejecución se ha buscado adoptar soluciones para la mayor durabilidad con el menor mantenimiento incluyendo, entre otras, un importante número de pilas integrales en el diseño.

ABSTRACT

The bridge over the Neris River in Lithuania is the main structure of the high-speed Rail Baltica railway line section between Kaunas and Ramygala. It is a 1,510 m long viaduct with a 150 m main span over the river, designed for environmental reasons and constructed using the balanced cantilever methods. The viaduct is divided into two sections, connected by shock transmission units and anchored by an A-shaped fixed pier. The construction method used for the typical spans involves movable scaffolding systems. The design and execution have prioritised solutions for maximum durability with minimum maintenance including, among others, a significant number of integral piers in the design.

PALABRAS CLAVE: Alta velocidad, Rail Báltica, Río Neris, Avance en voladizo, Pilas integrales.

KEYWORDS: High-speed railway, Rail Baltica, Neris River, Balanced cantilever, Integral piers.

1. Introducción

El proyecto Rail Baltica consiste en el proyecto y construcción de la nueva línea de alta velocidad uniendo los países bálticos de Estonia, Letonia y Lituania. Dentro de este proyecto, IDOM es responsable del proyecto de varios tramos incluyendo el tramo en Lituania entre Kaunas y Ramygala (Sección prioritaria de diseño 2, LT1-

DPS2), que incluye como estructura principal el puente sobre el río Neris, en el que ha participado como especialista estructural Arenas & Asociados. El elemento principal del Objeto de Construcción es un puente ferroviario de 1510 m de longitud junto con los muros de contención adyacentes en ambos estribos.

Además, este Objeto de Construcción incluye no solo la infraestructura sino toda la superestructura que abarcan sus límites de actuación, es decir, los bloques técnicos para la estructura junto con el tendido de vías y traviesas de hormigón sobre balasto.

Finalizada la fase de proyecto con las etapas de Value engineering, Master design y Detail design, y una vez aprobadas, el puente se encuentra en fase de ejecución en obra.

En el presente artículo se describen los elementos principales del diseño y sus singularidades a nivel de proyecto.



Figura 1. Obras de construcción del puente sobre el río Neris.

2. Concepción general del proyecto

La línea ferroviaria proyectada se desarrolla a una altura promedio de aproximadamente 35-40 m en un valle muy plano, lo que implica que la longitud final del viaducto es de 1510 m, entre

los apoyos finales en los estribos ubicados en los PKs 10+078.829 y 11+588.829. La alineación en planta sigue una línea recta hasta el PK 10+565.114, una curva de transición hasta el PK 10+815.114 en 250 m, y una curva constante con un radio de 4000 m a partir de ese punto.

El principal obstáculo para el puente es el río Neris, que tiene aproximadamente 135 m de ancho en el punto de cruce, lo que requiere un vano principal de 150 m para evitar la colocación de pilares en el río, como lo exige la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA). Los otros obstáculos que se han considerado en la ubicación de los pilares son las carreteras existentes, una a cada lado del río y paralelas a éste.

La estructura es completamente de hormigón, con una sección tipo cajón en el tablero y un ancho del mismo de 13,9 m. Presenta un vano principal de 150 m sobre el río Neris y vanos típicos de 45 m en los viaductos de acceso. Los vanos principales en el área del río tienen canto variable y se construyen mediante el método de voladizos sucesivos, mientras que los vanos típicos de 45 m se construyen utilizando un sistema de autocimbra móvil.

Uno de los objetivos del diseño fue reducir el mantenimiento evitando apoyos singulares en los pilares del vano principal y limitando el tamaño de los dispositivos de expansión ferroviarios a valores de recorrido máximo de 600 mm.



Figura 2. Alzado y vista general longitudinal del nuevo puente

Por lo tanto, ha sido necesario dividir el puente en dos secciones o tramos diferentes del viaducto de 576,50 m y 930,50 m, con juntas de expansión ferroviarias en los estribos finales y en el pilar intermedio P8.

3. Descripción del proyecto

El puente sobre el río Neris tiene una longitud total de 1510 m, ubicado a una altura de 35-40 m sobre un valle muy plano. La estructura está dividida en dos tramos de 576,5 m y 930,50 m.

Tramo A: El tramo A incluye el vano sobre el río Neris y 3-4 vanos en cada lado, con un esquema de longitudes de vano de 30,0m+40,0m+60,0m+95,0m+150,0m+95,0m+60,0m+46,5m (576,5m entre el eje de soporte del estribo 1 y el eje de soporte del pilar P8). Esta variación en las longitudes de los vanos es necesaria para un comportamiento estructural óptimo desde el punto de vista de los momentos flectores del tablero.

El vano principal de 150 m está fijado monolíticamente a los pilares P4 y P5, y presenta una variación parabólica de altura del tablero desde 11,15 m ($L/13$) sobre los pilares hasta 5,15 m ($L/29$) en el centro del vano.

En los vanos de 90 m adyacentes al vano principal, la variación de altura también es parabólica: de 11,15 m sobre los pilares principales a 4,15 m cerca de los pilares P3 y P6. Los pilares P3 y P6 también están fijados monolíticamente al tablero. El resto de las conexiones entre el tablero y los pilares en este tramo se resuelven mediante apoyos esféricos deslizantes, uno guiado y otro libre en cada línea de soporte. En el vano 8, se realiza una transición lineal de altura del tablero de 4,15 m a 3,15 m.

Los pilares P3, P4, P5 y P6 son puntos fijos del tablero para movimientos lentos en este tramo (variaciones de temperatura, fluencia, retracción, etc.). Por otro lado, son lo suficientemente flexibles como para no absorber las fuerzas horizontales de frenado del tren, las cuales se transfieren al segundo tramo mediante

dispositivos de transmisión de choque en la junta del pilar P8.



Figura 3. Alzado y perspectiva del tramo A

Tramo B: El segundo tramo del tablero tiene una longitud de 930,50 m. Una vez alejado del cauce del río, no se requieren vanos singulares. Esta parte de la estructura se resuelve con un tablero de múltiples apoyos sobre pilas separadas cada 45 m, con un esquema de vanos 40,5+19x45+35 m. El canto del tablero en este tramo es constante e igual a 3,15 m ($L/14,3$).

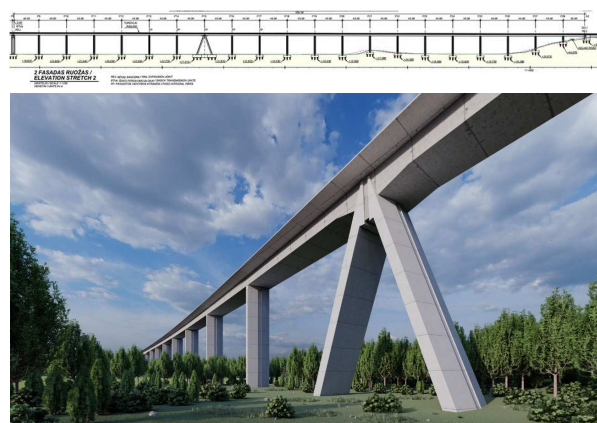


Figura 4. Alzado y perspectiva del tramo B

La alineación de apoyo P15 consiste en un pilar en forma de "A", que, debido a su configuración y rigidez, actúa como punto fijo del viaducto para las fuerzas de frenado, siendo el elemento que más restringe los movimientos longitudinales del tablero. Las pilas 13, 14, 16 y 17, que rodean el pilar en "A", también están conectadas monolíticamente al tablero, por lo que no requieren dispositivos de apoyo. El resto de las alineaciones de apoyos consisten en dos apoyos esféricos deslizantes, uno guiado y el otro libre.

El diseño en planta de la línea proyectada presenta un tramo recto, un tramo con curvatura constante ($r=4000$ m) y un tramo de transición entre estas secciones mediante una clotoide con longitud $L=250$ m. La parte recta cubre la mayor parte del tramo A, incluyendo los vanos principales de canto variable construidos con el procedimiento de voladizos sucesivos, mientras que la mayor parte del tramo B tiene curvatura constante.

3.1 Tablero

El tablero del puente está compuesto por una sección cajón de hormigón pretensado con un ancho constante de la losa superior de 13,90 m para soportar la plataforma ferroviaria. Los voladizos laterales tienen una dimensión constante de 3,30 m a cada lado, con una inclinación constante de las almas (10V:1H), independientemente de la sección del tablero, como se puede observar en los planos de geometría del tablero.

El espesor de las almas es, por norma general, de 60 cm, excepto en áreas donde es necesario incrementarlo debido a la presencia de anclajes, acopladores, desviadores de pretensado o diafragmas.

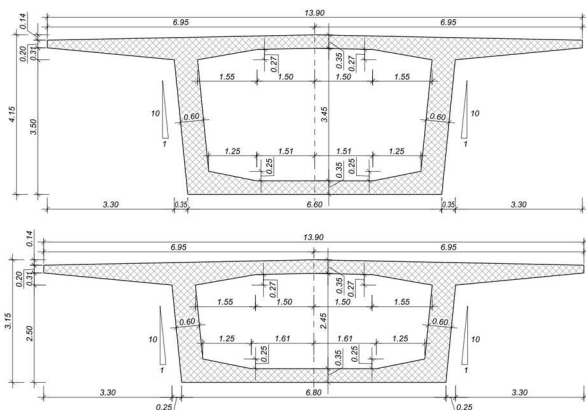


Figura 5. Secciones tipo del tramo A y B

Por razones estructurales y constructivas, el espesor de las almas se ha reducido en las dovelas centrales del vano principal 5 (de las dovelas 6 al centro del vano). La transición de espesor se realiza de manera lineal en la dovela 5.

Dependiendo del área del viaducto, se emplean diferentes tipos de pretensado. A continuación, se describen brevemente:

• Tendones internos en las almas:

En las secciones del tablero con canto constante, tanto en el tramo A fuera de los vanos singulares como en el tramo B en su totalidad, se emplean familias de tendones convencionales internos en las almas. La conexión entre diferentes fases del tablero se resuelve mediante acopladores de postensado.

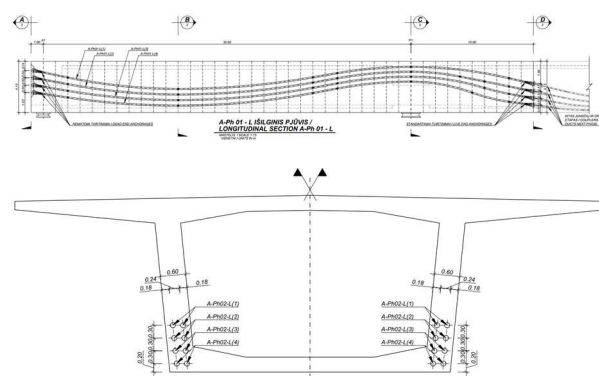


Figura 6. Pretensado interior de almas

• Tendones de construcción:

Debido al proceso constructivo utilizando segmentos de voladizos sucesivos en los vanos singulares centrales, es necesario disponer de tendones de pretensado en la losa superior asociados a cada pareja de dovelas.

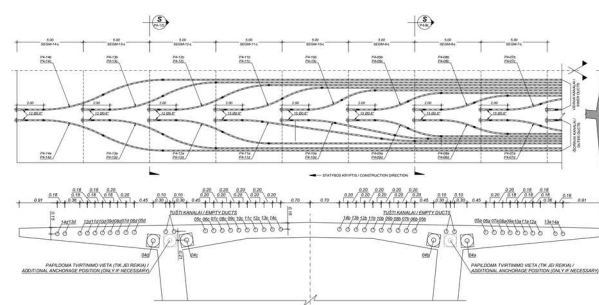


Figura 7. Pretensado de construcción

Se ha considerado espacio para la ubicación de tendones de reserva vacíos, en caso de ser necesario su uso futuro.

• Tendones de continuidad:

Como complemento al pretensado de construcción, en el momento en que se unen las diferentes secciones del tablero y cambia el esquema estructural, se requiere un pretensado para la continuidad del tablero en los vanos principales. Este tipo de pretensado se ubica en la losa inferior.

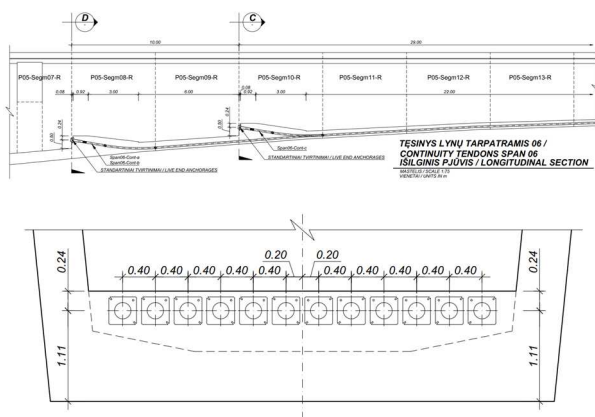


Figura 8. Pretensado de continuidad

• Tendones externos:

Dada la singularidad del viaducto, con un vano central de 150 m para la línea ferroviaria, se requieren tendones externos en los vanos principales para complementar el resto de los tipos de pretensado. Estos tendones pueden inspeccionarse, retensionarse e incluso reemplazarse en el futuro, lo que mejora las condiciones de durabilidad y mantenimiento del viaducto.

A continuación, se muestran dos secciones típicas de la plataforma ferroviaria con las superestructuras correspondientes para el tramo recto y el tramo curvo. La curvatura no afecta la configuración de la sección transversal, pero sí la configuración del balasto y las traviesas.

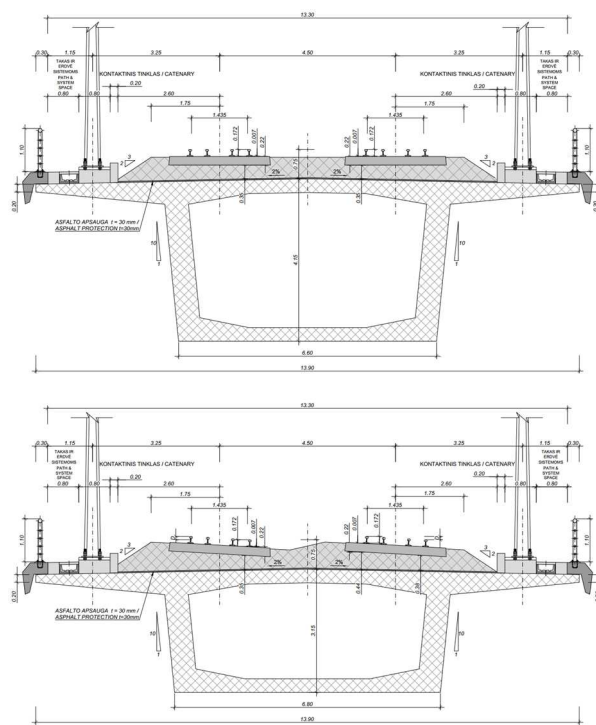


Figura 9. Sección tipo en tramo recto y curvo

3.2 Pilas

Existen siete tipos de pilas en el viaducto. En el tramo A (los primeros 576 m), hay tres tipos: pilas con apoyos, pilas integrales y pilas principales sobre el río. En el tramo B (930,50 m), hay también tres tipos: pilas con apoyos, pilas integrales, y el pilar en forma de "A" (P15) que actúa como punto fijo, además del pilar de junta de expansión (P8).

Pilas con apoyos en el tramo A:

En este tramo, el tablero tiene un canto constante de 4,15 m. Las pilas 1, 2 y 7 tienen dimensiones constantes de sección de 6,60 m de ancho transversal y 3,0 m de profundidad longitudinal. Las pilas tipo con apoyos tienen una sección hueca poligonal, con una cabeza de pilar de 3 m en la parte superior donde se colocan los apoyos esféricos.

El encepado de pilotes, donde descansan estos pilares, tiene dimensiones constantes de 16,50 m de ancho, 12,0 m de largo y 3,0 m de profundidad. La cimentación consta de 12 pilotes circulares con 1,50 m de diámetro.

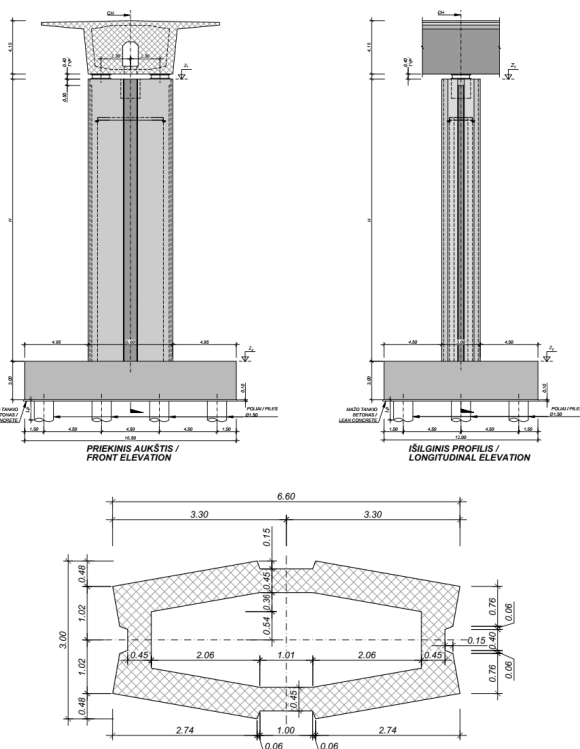


Figura 10. Geometría de pilas con apoyo tipo

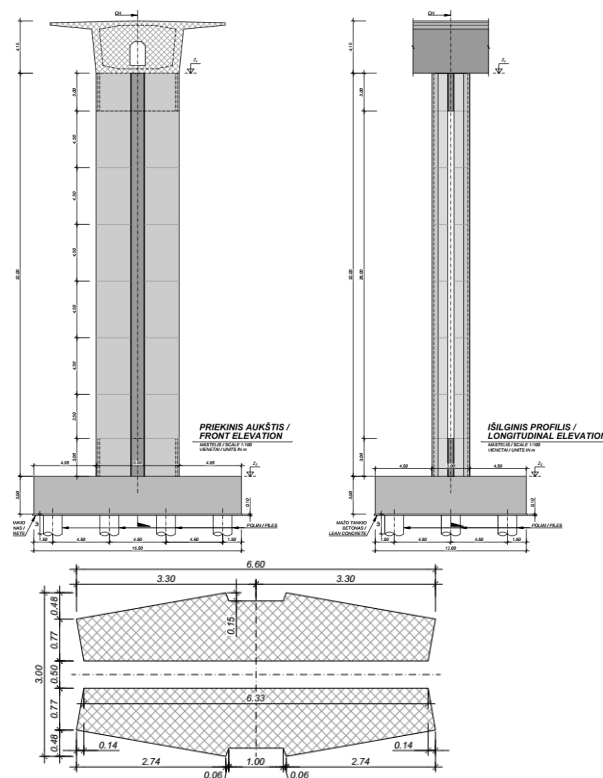


Figura 11. Geometría de pilas integrales tipo

Pilas integrales del tramo A:

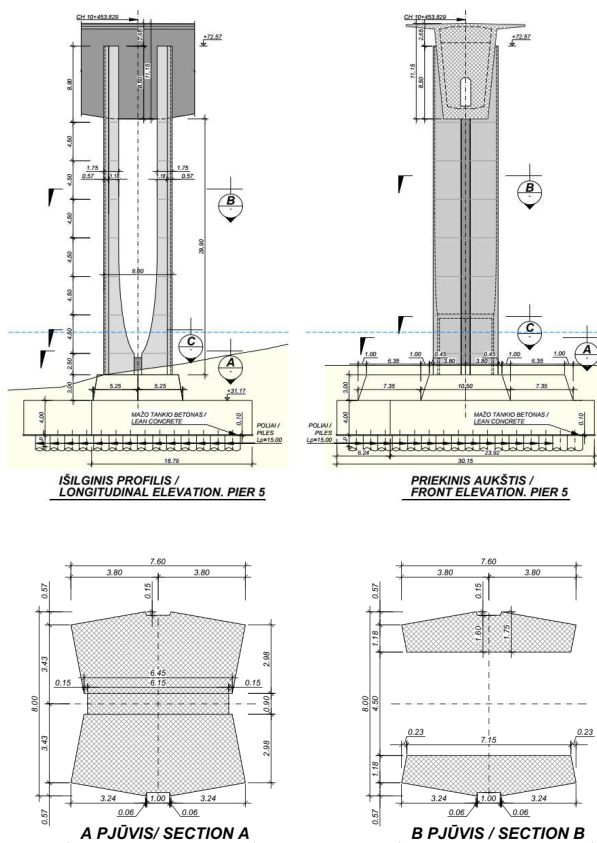
Las pilas P3 y P6 están conectadas monolíticamente al tablero. Estas pilas tienen dimensiones constantes de sección de 6,60 m de ancho transversal y 3,0 m de profundidad longitudinal. La sección consiste en un par de ejes poligonales, excepto en la conexión monolítica con el tablero (3,0 m) y en la conexión con el cabezal de pilotes (3,0 m), donde los dos ejes se convierten en uno solo. Esta separación permite incrementar el área de la sección manteniendo la flexibilidad horizontal.

El encepado de pilotes de estas pilas tiene dimensiones de 16,50 m de ancho, 12,0 m de largo y 3,0 m de profundidad. La cimentación consta de 12 pilotes circulares de 1,50 m de diámetro.

Pilas principales sobre el río en el tramo A:

Las pilas P4 y P5, ubicadas sobre el río, tienen ejes gemelos poligonales monolíticamente conectados al tablero. Los ejes están separados 4,50 m y tienen dimensiones de 7,60 m de ancho y 1,75 m de profundidad, variando entre 1,75 m y 3,55 m en los últimos 12 m. Los ejes gemelos se unen en la base del pilar.

Estos pilares descansan sobre un pedestal de corte hidráulico de 3 m de altura, para mejorar el comportamiento frente a la corriente, y un encepado de pilotes de 25,20 m de ancho, 19,80 m de largo y 4,0 m de espesor, soportado por 20 pilotes de 1,80 m de diámetro.



Pilas con apoyos en el tramo B:

En el tramo B, donde el tablero tiene un canto constante de 3,15 m, las pilas 9 a 12 y 18 a 28 tienen dimensiones constantes de sección de 6,80 m de ancho transversal y 3,0 m de profundidad longitudinal. Las pilas tipo con apoyos tienen una sección hueca poligonal, con una cabeza de pilar de 3 m en la parte superior donde se colocan los apoyos esféricos.

El encepado de pilotes, donde descansan estos pilares, tiene dimensiones de 16,50 m de ancho, 12,0 m de largo y 3,0 m de profundidad. La cimentación consta de 12 pilotes circulares con 1,50 m de diámetro.

Pilas integrales del tramo B:

Las pilas integrales en el tramo B corresponden a los pilares 13, 14, 16 y 17. Cada pilar está compuesto por un único eje sólido con una sección hexagonal, conectado monolíticamente

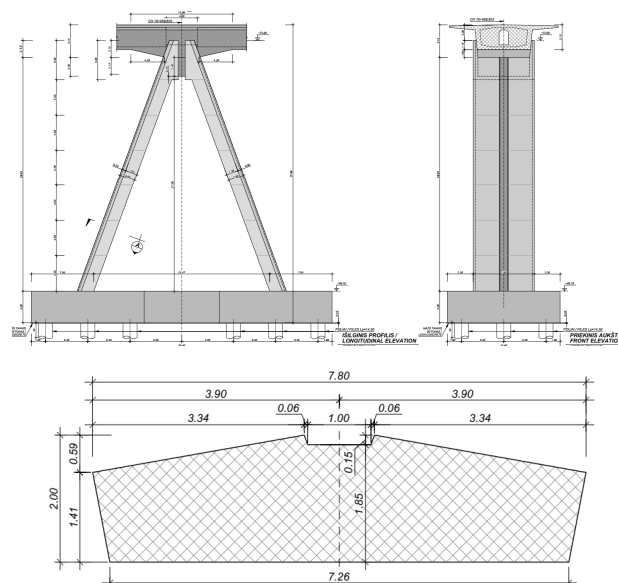
al tablero. La sección del eje es poligonal, con dimensiones de 6,80 m de ancho transversal y 2,50 m de profundidad longitudinal.

El encepado de pilotes de estos pilares tiene dimensiones de 16,50 m de ancho, 12,0 m de largo y 3,0 m de profundidad. La cimentación consta de 12 pilotes circulares con 1,50 m de diámetro.

Pilar fijo P15 del tramo B:

El pilar P15, con tipología en forma de "A", actúa como el punto fijo del viaducto no solo para las cargas a corto plazo, sino también para las cargas a largo plazo del tablero del segundo tramo. El pilar consiste en dos ejes inclinados conectados monolíticamente al tablero. La sección del eje es poligonal, con dimensiones de 7,80 m de ancho transversal y 2,00 m de profundidad longitudinal.

Cada eje descansa sobre un encepado de pilotes cuadrado, de 14,40 m de lado y 4,0 m de profundidad. Los cabezales de pilotes cuentan con 9 pilotes de 1,80 m de diámetro y están conectados entre sí por otro cabezal de pilotes de 9,0 m de ancho, 9,60 m de largo y 4,0 m de profundidad.



Pilar de junta de expansión P8:

El pilar P8 tiene una tipología similar a los pilares P3 y P6, pero no está conectado monolíticamente al tablero, ya que es el punto donde se ubica la junta de expansión entre el primer tramo (tablero de transición de 4,15 m a 3,15 m de profundidad) y el segundo tramo (tablero de 3,15 m de profundidad). En este pilar también se colocan los dispositivos de transmisión de choque.

La sección del eje, en la parte superior donde se colocan los apoyos esféricos dobles y en la zona inicial del encepado de pilotes, es una sección hexagonal sólida, de 6,80 m de ancho transversal y 5,50 m de profundidad longitudinal. El resto de la altura del pilar presenta un diseño de eje gemelo, con una separación de 1,60 m entre ejes. El pilar tiene una altura total de 31 m y la cimentación consta de 12 pilotes de 1,50 m de diámetro.

3.3 Estribos

Ambos estribos, 1 y 2, tienen dimensiones similares y la misma tipología. Son estribos cerrados con dos alas de 0,60 m de grosor en ambos lados. Sus dimensiones son de 6,50 m longitudinalmente y 13,90 m transversalmente para ambos estribos, con una altura de 7,56 m para el estribo 1 y 7,49 m para el estribo 2.

En el estribo 1, en el lado oeste, una de las aletas se extiende 3,50 m colgada en voladizo, debido al terraplén en ese lado. La pared del estribo tiene una profundidad de 3,50 m, con un asiento para los apoyos de 3,0 m de ancho. La altura del asiento es de 3,05 m en el estribo 1 y de 4,00 m en el estribo 2. La pared de retención frontal detrás del tablero tiene una altura de 4,65 m en el estribo 1 y de 3,65 m en el estribo 2, con un grosor de 0,50 m en ambos casos. Este grosor se incrementa a 1,20 m en la parte superior debido al espacio para la junta de expansión.

La cimentación de ambos estribos consta de 9 pilotes circulares de 1,50 m de diámetro, dispuestos en un cabezal de pilotes con

dimensiones de 12,0 m de largo, 14,90 m de ancho y 2,50 m de profundidad. Los pilotes tienen una longitud de 33 m en el estribo 1 y 23,4 m en el estribo 2. En caso de descarrilamiento o combinaciones de cargas en estados límite últimos (ULS), los apoyos esféricos están equipados con dispositivos anti-levantamiento.

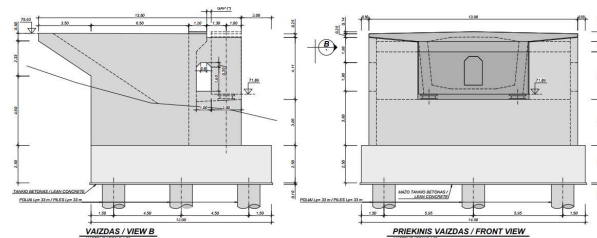


Figura 14. Geometría del Estribo 1

3.4 Posición del punto fijo y aparatos de dilatación de vía

Para puentes ferroviarios largos, la estrategia de diseño para la posición del punto fijo y las juntas de expansión ferroviarias es crucial. Pueden surgir grandes fuerzas de frenado del tren, y es importante resistir esas fuerzas mientras se minimiza el número de juntas de expansión en la vía y en la estructura, reduciendo así los requerimientos de mantenimiento de la nueva estructura.

Dada la singularidad del vano principal sobre el río Neris y su ubicación descentrada respecto a la estructura en su conjunto, todo el viaducto se ha concebido como la unión de dos tableros que se conectan en el pilar P8. Frente a solicitaciones lentas, principalmente derivadas de acciones reológicas como retracción, fluencia y variaciones térmicas, los dos tableros se comportan de manera independiente. En este caso, el comportamiento del vano principal de 150 m es simétrico, con los pilares principales como puntos fijos, lo que resulta beneficioso.

Para acciones rápidas, como solicitaciones de frenado-acción o viento longitudinal, se han dispuesto 4 unidades de transmisión de impacto (STU, por sus siglas en

inglés) en la junta entre ambos tableros en el pilar P8. Estas unidades transfieren todas las cargas de acción rápida al pilar en "A" P15, que es muy rígido, mientras que los pilares fijos verticales más flexibles absorben solo una pequeña parte de esta fuerza.

De acuerdo con los supuestos para el proceso constructivo adoptado, se necesitan 3 juntas de expansión ferroviarias (REJ, por sus siglas en inglés) ubicadas en los estribos y en la junta del tablero en el pilar P8.

Los valores de movimiento de apertura y cierre de las juntas se han determinado considerando que estas se instalan justo después de completar la construcción del tablero, según la secuencia constructiva elegida. La capacidad de desplazamiento de cada dispositivo de expansión es la siguiente:

- **Estribo 1:** Capacidad de desplazamiento de 600 mm, con valores extremos de apertura entre 70 mm y 670 mm.
- **Pilar 8 y Estribo 2:** Capacidad de desplazamiento de 1000 mm, con valores extremos de apertura entre 70 mm y 1070 mm.

Los valores de apertura inicial en el momento de instalación de las juntas de expansión son:

- **Estribo 1:** 283,2 mm
- **Pilar 8:** 331,0 mm
- **Estribo 2:** 326,4 mm

Los valores de recorrido máximo en el diseño no superan los 600 mm en el Estribo 1 y Pilar 8 y alcanzan el valor de 630 mm en el Estribo 2. Se cumple por tanto razonablemente con el criterio de acomodar la carrera de los desplazamientos de la vía a un valor cercano a 600 mm como máximo en el diseño.

Se considera que las vías y los aparatos de dilatación de vía se instalan en la estructura 200 días después de completar la construcción, sin considerar por tanto los movimientos

reológicos del hormigón (retracción y fluencia) que ocurren en el viaducto antes de la instalación de las juntas.

3.5 Proceso constructivo

El procedimiento de construcción del tablero de hormigón pretensado utiliza un sistema de autocimbra móvil (MSS, por sus siglas en inglés) para los vanos típicos de 45 m. Este método es muy adecuado para puentes de más de 400-500 m de longitud debido a su alto grado de industrialización. Un vano puede construirse en solo 2-3 semanas, independientemente de las condiciones del terreno.

El inicio de la construcción del tablero de hormigón pretensado se ha considerado desde el estribo 2.

Los vanos principales de 95 m + 150 m + 95 m se construirán utilizando carros de avance de encofrado mediante procedimiento de avance en voladizos sucesivos, mientras que los vanos restantes cercanos al estribo 1 y la parte no equilibrada de los vanos de 95 m en ese lado se construirán utilizando cimbras al suelo.

La construcción en voladizos sucesivos requiere el uso de carros de avance simétricos para segmentos de 5 m de longitud. Debido al peso elevado de los primeros segmentos, los primeros cuatro pares de segmentos se han limitado a 4,00 m de longitud.

El tablero de los vanos restantes se realizará utilizando cimbras.

Para la ejecución de las cimentaciones de los pilares principales P4 y P5 junto al río Neris, se consideran ejecución recintos sobre el río y excavación protegida bajo tablestacas de acero.

Los planos del procedimiento constructivo describen con mayor detalle el proceso de construcción, incluyendo las consideraciones de puntos fijos temporales para el tablero, según lo considerado en el cálculo estructural.

4. Conclusión

La estructura del nuevo puente ferroviario sobre el río Neris será el mayor viaducto dentro de su tramo con una longitud de 1510 m. Como se muestra en el artículo la estructura resulta singular en varios aspectos. Principalmente por

su vano principal de 150 m, construido por avance en voladizos sucesivos, pero también por la configuración de punto fijo en pila en A, y dos tramos de tablero conectados con transmisores de impacto, así como por el uso de pilas integrales y soluciones de bajo mantenimiento.



Figura 15. Perspectiva del viaducto sobre el río Neris.