

Ponte Ferreirinha sobre el Río Duero en Oporto

Ferreirinha Bridge over the Douro River in Porto

Miguel Sacristán Montesinos^a, Emilio Merino Rasillo^b, Javier Fernández Antón^c,
Ysabel Guil Celada^d, Filipe Vasques^e, José Carlos Nunes de Oliveira^f

^aIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados, S.L.P. Director, Santander. msacristan@arenasing.com

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados, S.L.P. Director, Madrid. emerino@arenasing.com

^cIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados, S.L.P. Ingeniero estructural. jfernandez@arenasing.com

^dIngeniero de Caminos, Canales y Puertos. Arenas & Asociados, S.L.P. Project Manager. yguil@arenasing.com

^ePhD Ingeniero Civil. Esgar Cardoso. Director. filipe.vasques@edgarcardoso.pt ^fArquitecto. NOARQ. Director. noarq@noarq.com

RESUMEN

El Ponte Ferreirinha es el resultado de un concurso internacional convocado por el Metro do Oporto para un nuevo puente sobre el río Duero. El nuevo puente soportará las vías del Metro, aceras y vías ciclables en 15,4 m para crear una nueva conexión entre Oporto y Vila Nova de Gaia, 500 m aguas arriba del puente de Arrábida. El puente configura un pórtico de estructura de hormigón con una luz principal de 403 m, entre apoyos inclinados, y una longitud total de 835 m. Los apoyos principales se colocan fuera del cauce del río y también por fuera de los viales en ambas orillas, para evitar cualquier interferencia visual con el puente de Arrábida. Su construcción comenzó en 2024 y se prevé finalice en 2027.

ABSTRACT

The Ponte Ferreirinha is the result of an international competition organized by Metro do Porto for a new bridge over the Douro River. The bridge will support metro tracks, pedestrian walkways, and bike lanes across a width of 15.4 meters, creating a new connection between Porto and Vila Nova de Gaia, 500 meters upstream from the Arrábida Bridge. The bridge features a concrete portal frame with a main span of 403 meters between inclined supports and total length of 835 meters. The main supports are positioned outside the river channel and beyond the roadways on both banks to avoid any visual interference with the Arrábida Bridge. Construction began in 2024 and is expected to be completed within 2027.

PALABRAS CLAVE: Puente pórtico, Río Duero, Oporto, hormigón ligero, Ferreirinha, Metro do Porto.

KEYWORDS: Frame bridge, Douro River, Porto, light weight concrete, Ferreirinha, Metro do Porto.

1. Introducción. Objeto del proyecto

El Ponte Ferreirinha sobre el río Duero y los accesos entre Oporto (Campo Alegre) y Vila Nova de Gaia (Candal), darán servicio a la línea de Metro Rubi entre Casa da Música y Santo Ovídio, uniendo los municipios de Oporto y Vila Nova de Gaia.

El cruce se encuentra aguas arriba del Puente de Arrábida y forma parte de un área fuertemente artificializada, principalmente de carácter urbano y comercial, intercalada con pequeñas áreas forestales en las laderas, en ambos municipios.

El nuevo puente es el resultado de un concurso internacional de diseño con la participación de 27 equipos de ingenieros y arquitectos. El diseño ganador fue presentado por el equipo formado por Arenas & Asociados – Edgar Cardoso y NOARQ, basado en la propuesta de diseño preliminar presentada por estas firmas de ingeniería y arquitectura española y portuguesas. El diseño de detalle se llevó a cabo durante la segunda mitad de 2022 y se finalizó en mayo de 2023. La licitación para la construcción se lanzó el 10 de mayo, con recepción de ofertas hasta el 10 de agosto. Se prevé que el contrato fue a final de 2023 para iniciar la construcción en 2024, con una duración estimada de 36 meses.

El nombre del puente fue elegido mediante votación popular entre 6 alternativas, resultando elegido el nombre Ponte Ferreira en homenaje a Antonia Ferreira, una destacada figura de la región de Oporto relacionada con el desarrollo de los vinos de Oporto durante el siglo XIX.



Figura 1. Puente de Arrábida existente (Edgar Cardoso 1963)

El cruce está ubicado 500 metros aguas arriba del Puente de Arrábida, construido en 1963 por el ingeniero portugués Edgar Cardoso, que en el momento de su construcción se convirtió en el mayor puente de arco de hormigón del mundo con un vano de 270 metros, y que en años recientes ha sido declarado monumento nacional para su preservación. El nuevo puente también se encuentra a 2,4 km aguas abajo del Puente Luis I, diseñado por Théophile Seyrig y construido en 1886.

Los puentes existentes constituyen una condición base muy relevante considerada en el

diseño del nuevo puente sobre el río Duero, ya que Oporto es conocida como la "ciudad de los puentes". El nuevo puente, según nuestro enfoque, debe ser una consecuencia natural de los puentes existentes, sintetizándolos y desarrollando la tradición de los puentes de la ciudad para llevarla un paso más allá. La "síntesis" también se convirtió en el "lema" del diseño, ya que se consideró que usar el mínimo número de elementos en el diseño era la mejor estrategia para reducir su impacto visual en el paisaje e integrarse mejor con el Puente de Arrábida. Esto sigue el ejemplo del formidable Puente de São João, construido por Edgar Cardoso en Oporto en 1991, también muy cercano al Puente María Pía, diseñado por Gustave Eiffel y Théophile Seyrig en 1877.

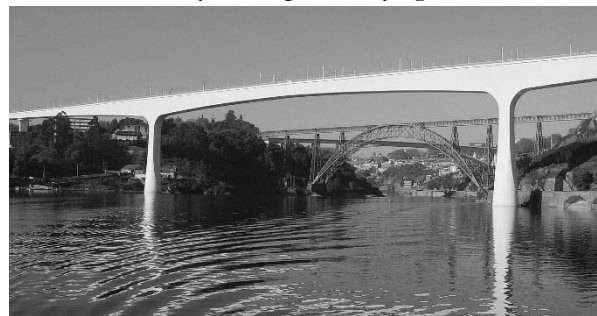


Figura 2. Puente de São João existente (Edgar Cardoso 1991)

En los siguientes párrafos se describe el diseño estructural del puente junto con las condiciones y restricciones que llevaron a elegir su tipología, dimensiones y principales características técnicas.

2. Diseño estructural

En cuanto al diseño, la primera decisión fundamental consistió en definir la posición de los soportes principales de la estructura. De acuerdo a los términos de referencia del proyecto, estos necesariamente deben estar fuera del cauce del río. Si se dispusieran exactamente al borde del cauce, adosados a los caminos laterales, la luz principal rondaría los 340 m. Sin embargo, esta posición implicaría importantes desventajas, a saber:

- Habría más daños en el lecho del río;
- Existiría el riesgo de impacto de embarcaciones, ya que el espacio libre en la orilla del río sería muy bajo;
- Crearía un mayor obstáculo visual para los edificios de la margen izquierda y derecha y para la observación del Puente de Arrábida desde la costanera, ya que el puente de Arrábida tiene sus apoyos detrás de la costanera;
- Implicaría soluciones de cimentación complejas y costosas, ya que en la margen derecha la roca se encuentra a 20 m de profundidad;

Así, como punto de partida, se asumió que los soportes de ambos lados deberían estar ubicados detrás del paseo marítimo y, en el caso de la margen izquierda, detrás del edificio existente de Armazém da Arrozeira. El resultado es un vano principal de aproximadamente 400 m, materializado por una implantación de soportes que optimiza la integración con las edificaciones existentes, reduce el impacto visual con el puente de Arrábida, tiene nula afectación al río y optimiza las condiciones de cimentación.

Para un tramo central de unos 400 m, existe un conjunto limitado de soluciones tecnológicas estructurales eficientes, a saber, puentes en arco, puentes pórtico, puentes atirantados y puentes colgantes.

Se descartaron las soluciones de puente atirantado o puente colgante, ya que requerían la disposición de elementos sobre el tablero, lo que, desde el punto de vista de la integración en la ciudad, el paisaje y la relación con los puentes existentes en Oporto, sería una opción muy negativa. Especialmente en lo que respecta al puente de Arrábida, estas opciones crearían un obstáculo visual por su mayor altura y supondrían una imposición a la imagen y presencia de este monumento nacional.

Las soluciones de tipo arco y pórtico utilizan para su beneficio como parte del mecanismo resistente la altura del puente de

aproximadamente 75 m, que viene fijada por la posición de los puntos de conexión, y la búsqueda de un nivel levemente superior al Puente de Arrábida.

Las soluciones tipo arco son eficientes para esta gama de luces y permiten pilares intermedios mediante apoyos verticales en el arco que reducen las luces del tablero. Sin embargo, en el talud de la margen derecha, si bien existe un espacio para instalar un pilar intermedio, la excesiva proximidad de las edificaciones existentes hace muy desaconsejable esta opción por varios motivos: afectación de la estabilidad de las edificaciones, grandes dificultades en el acceso a los medios para la construcción, pero sobre todo un impacto visual relevante y una inaceptable ruptura de la escala urbana. Así, se prescindió de este punto intermedio de apoyo, por lo que se adoptó una luz de más de 100 m, lo que también es positivo por generar una menor afectación visual en esta zona.

Como es necesario, incluso fuera del vano principal, un tablero capaz de soportar un vano superior a 100 m, cualquier reducción de la separación entre los apoyos del tablero en el arco no supondría una ventaja real. Además, la multiplicación de elementos verticales de apoyo intermedio que surge con las actuales soluciones de arco, haría la solución menos transparente y menos “sintética”, lo que se desvía de los objetivos de diseño.

La solución tipo pórtico permite dividir el vano principal en 3 tramos más cortos para el tablero y, en este caso, resulta estructuralmente muy eficiente, hecho que motivó su adopción. Para ello se consideró la secuencia entre los puntos de apoyo del tablero en el vano principal de 125 + 180 + 125. Esta sucesión de vanos es muy adecuada, tanto desde el punto de vista formal, por el ritmo y la proporción que crea, también por equilibrio y compensación estructural, ya que la relación entre los vanos adyacentes y el vano principal es de aproximadamente 0,7.



Sacristán, M., Merino, E., Fernández, J., Guil, Y., Vasques, F., Nunes de Oliveira, J.C. / IX CONGRESO ACHE – GRANADA 2025 4

Como resultado, el tablero se prolonga por ambos lados hasta llegar a los estribos, en una sucesión equilibrada con una modulación de luces de 21 + 30 + 55 + 104 + 428,6 + 98,4 + 65 + 33 m, donde la relación de luces adyacentes es siempre cerca del óptimo estructural.

Asumiendo esta tipología como base de diseño, otra decisión inicial fundamental fue la elección del hormigón como material estructural principal. Los motivos de esta elección están asociados a la durabilidad, mantenimiento y coste de la estructura. En un medio marino, una estructura de hormigón tiene una mayor durabilidad que una estructura metálica, asegurando una mayor vida útil con menos operaciones de mantenimiento y menor coste durante su vida útil. Por otro lado, tiene un menor coste de construcción y menor riesgo económico, especialmente en el contexto inflacionario actual en el que el precio del acero como materia prima ha subido rápidamente.

Para este rango de luces entre 100 y 180 m, el tablero con cajón de hormigón armado pretensado de altura variable es la solución tecnológica más competitiva y eficiente en el contexto del ciclo de vida, tanto estructural como económicamente, dando lugar a Estructuras resistentes y robustas, pero a la vez esbeltas y elegantes. Ejemplos de este tipo de estructura de tablero con sección de altura variable son el Puente São João o el Puente Freixo. El canto inferior variable y ligeramente curvado es la solución tecnológicamente más eficiente, ya que responde directamente a las leyes de variación de tensiones, permitiendo aumentar las luces y reducir el número de apoyos. La forma sigue así la función estructural, es decir, la función principal del puente.

La altura de la sección del tablero es variable, con un valor máximo en los apoyos de aproximadamente 1/18 de la luz, es decir, unos 7 m en los pilares principales adyacentes a las luces de 125 m y unos 10 m en los nudos de luz entre los apoyos intermedios de los puntales inclinados del pórtico. La altura mínima ronda

entre 1/40 y 1/45 del vano principal, es decir, en este caso 4,5 m en el vano principal de 180 m. Para complementar la integración y el equilibrio del conjunto, se consideró una sección de 4 m de altura en el centro de los vanos de 100 y 125 m y una altura que se reduce de forma gradual hacia los extremos del puente, al reducirse la longitud de los vanos y adaptarse a la altura sobre el terreno. Cabe señalar que estos cantos de sección del tablero a más de 70 m sobre el suelo no están fuera de escala, sino proporcionadas al vano a salvar y al resto de elementos de la estructura.

La solución tipo pórtico es eficaz en esta gama de grandes luces. Ejemplos construidos son el Puente Cadore (Italia) con una luz de 275 m o el Ponte Sfalassa (Italia) con una luz de 376 m. Sin embargo, los puentes pórtico no suelen alcanzar las proporciones y la fluidez que se busca en la estructura aquí concebida y descrita, en la que el tablero y las riostras se integran formando una sola pieza fluida y continua, para componer una pieza que se relaciona indiscutiblemente con el arco curvo del Puente da Arrábida. Una configuración en un pórtico recto con más apoyos verticales no dialogaría adecuadamente con el Puente de Arrábida, por lo que se buscó una configuración que fuera una evolución y una consecuencia de este, en la que convergen esta forma de pórtico y el arco del puente de Arrábida, en respuesta a esta especificidad del contexto.

Así, el pórtico se modula mediante dos jабalcones inclinados de ángulo muy bajo, de unos 30°, elevándose a una altura de unos 67 m y con un voladizo horizontal de 110 m. Los puntales se encastran en el tablero y aumentan continuamente su espesor, desde 3 m en el origen hasta 9 m en la conexión con el tablero. Esta curva conecta con el borde inferior variable del tablero, prolongándose en él y formando así una singular curvatura, un pórtico-arco que enmarca al fondo el puente de la Arrábida, enmarcándolo. Se cree que esta dualidad de arco y pórtico curvo es ideal tanto desde el punto de vista estructural como para constituir una

síntesis del puente de Arrábida, cuyo arco se relaciona positivamente con la nueva estructura. Una ventaja adicional de la solución de arco-pórtico es que utiliza la base de roca, transmitiendo las fuerzas de inclinación de los puntales al suelo. De esta forma, se aprovecha eficientemente el sustrato rocoso existente como parte de la estructura. Otra ventaja es que todo el arco formado por los puntales inclinados y la sección de tablero entre ellos está permanentemente comprimido, mejorando también la durabilidad del conjunto.

Siendo la durabilidad una de las preocupaciones fundamentales de la solución propuesta, se intentó materializar una estructura lo más monolítica posible, con el menor número de dispositivos de apoyo y juntas, como elementos potenciales susceptibles de mantenimiento y/o sustitución a lo largo de la vida útil de la estructura. Por ello, tanto los jabalones inclinados del arco-pórtico como los pilares principales (P4 y P5) quedan embebidos en la base y en su conexión con el tablero, opción que también contribuye a la idea de diseñar el puente como una sola pieza continua y fluida. El punto central del vano principal es así el punto fijo de la estructura para los movimientos horizontales longitudinales. Los pilares restantes (P1, P2, P3, P6 y P7), más cortos y más alejados del punto fijo, dispondrán de dispositivos móviles de apoyo, guiados en sentido longitudinal, así como los estribos. Se utilizarán apoyos esféricos más duraderos, que garantizan una vida útil de más de 50 años y sólo habrá juntas de dilatación en los estribos.

Otra decisión proyectual fundamental es que los jabalones inclinados del arco-pórtico en sentido transversal se abran desde la conexión con el tablero hacia abajo, dividiéndose en dos elementos independientes y separados, lo que aporta varios beneficios estructurales y formales. En primer lugar, permite que el ancho total al llegar a la base sea de aproximadamente 20 m, lo que optimiza la estabilidad transversal ante acciones relevantes de viento y sismo, teniendo

en cuenta la altura y luces de la estructura. Un único apoyo en cada margen supondría un enorme impacto visual en los edificios circundantes y un elemento de dimensiones excesivas que difícilmente se integraría en la escala de la ciudad, con edificios tan próximos entre sí en un entorno urbano. En segundo lugar, esta solución de doble arriostramiento también permite repartir mejor la carga sobre la cimentación y potencia la esbeltez de la estructura al tocar el suelo, lo que limita su impacto visual y facilita su integración en la escala urbana de la ciudad y los edificios. que la rodean, la rodean. Los esbeltos puntales están muy comprimidos, lo que, dada su longitud de aproximadamente 125 m, implica la inserción de un elemento intermedio de estabilización entre ellos.

Asimismo, los pilares principales se subdividen en dos elementos de menos de 3 m de ancho, con un vano central para reducir el impacto visual sobre las edificaciones existentes, aumentar la transparencia y evitar romper la escala urbana que implica la colocación de muros muy anchos con más de 60 m de altura tan cerca de los edificios existentes.

En conclusión, la estructura del nuevo puente sobre el Duero tiene un esquema estructural muy simple y eficiente, altamente robusto y redundante, lo que lo hace extremadamente confiable y efectivo. Además, transmite simultáneamente una gran sensación de esbeltez, fundamental en una estructura de estas dimensiones y potencia, para poder integrarse adecuadamente en un entorno urbano sensible, donde se busca la máxima transparencia y la percepción de una clara función estructural. básico.

3. Tablero y pretensado

La sección tipo de la estructura tiene una anchura total de 15,40 m, comprendiendo una plataforma central para dos vías de metro de 6,40 m y dos caminos laterales reservados para

ciclovías y peatones de 4,3 m de anchura cada uno. Los postes que soportan la catenaria y los postes de alumbrado se colocan en el límite del gálibo libre de obstáculos de la plataforma del metro, de manera que existe un ancho libre constante de 4 m a cada lado para uso de peatones y ciclistas.



Figura 4. Relación formal con el puente de Arrábida

Este perfil se materializa en la obra sobre una sección estructural cajón con voladizos laterales. El cajón tiene un ancho de 10 m en el nivel superior, de donde surgen los voladizos laterales con un vuelo de 2,70 m. La plataforma del metro se materializa a partir de una solución de vía de hormigón mediante una losa de 0,50 m de espesor, que a su vez se apoya sobre la losa superior del cajón. Fuera de esta zona, las consolas laterales se levantan dejando sólo 10 cm de espesor para instalar el pavimento peatonal. En la parte superior también se integran los espacios necesarios para multituberías y drenaje, disponiendo en ambos casos arquetas cuidadosamente espaciadas para facilitar el acceso para inspección y mantenimiento.

La altura mínima de la sección del tablero es de 4 m en vanos principales. Las almas laterales están inclinadas de forma que la anchura del fondo en este tramo actual es de 8,3 m. Manteniendo constante la inclinación del alma en 1:4,6 (H:V), la altura del tablero crece hasta 7 m y 10 m en los apoyos principales, reduciéndose el ancho inferior a 7 m y 6,25 m, respectivamente, que también tiene un efecto

importante en la optimización general y la estrategia de reducción de peso.

La luz libre central de la losa superior del cajón es de unos 8,6 m.

El espesor actual de las almas es de tan solo 50 cm en los vanos de acceso y 60 cm en los vanos del puente central, incrementado localmente en la zona de los pilares. El forjado inferior incluye un rehundido central que marca el eje central del tablero en la vista inferior que se prolonga hasta los pilares y arco-pórtico. El espesor de la losa inferior se incrementa hasta un valor de aproximadamente 1 m en los tramos próximos a los pilares principales y en los nudos de conexión con bielas inclinadas.

La altura variable del tablero, además de cumplir los propósitos de eficiencia estructural descritos anteriormente, reproduce el tablero existente del puente de Arrábida y reafirma la idea de que el diseño del nuevo puente es una evolución, una síntesis o una consecuencia de ese puente.

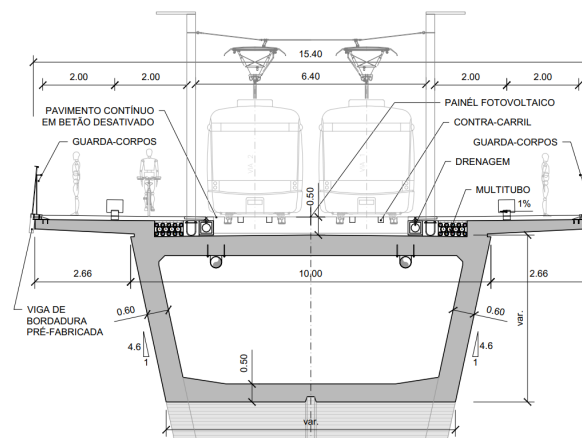


Figura 5. Sección tipo de tablero

El tablero incluye tres tipos de pretensado. El pretensado de la fase de construcción se coloca sobre la losa superior y le permite resistir los momentos inducidos por el avance en voladizo. El pretensado de continuidad también es interior, disponiéndose en la losa inferior con salientes de anclaje intermedios, sirviendo para resistir los momentos positivos en el centro del vano que se instalan tras el cierre de los vanos.

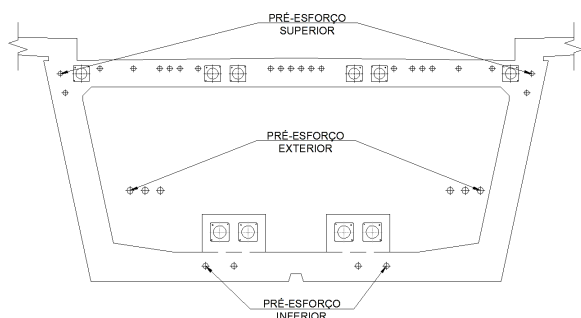


Figura 6. Esquema de tipos de pretensado de tablero

El tablero también está dotado de un pretensado exterior, tensado después de realizados los avances en voladizo, que está dimensionado para la carga permanente restante del puente y las sobrecargas de uso. Este pretensado exterior puede ser retesado, reemplazable y totalmente accesible para su inspección, lo que constituye una importante ventaja para su durabilidad y mantenimiento y para garantizar una vida útil igual o superior a 120 años. Además, el pretensado exterior reduce el espesor de las almas, lo que se traduce en una optimización de la estructura y una reducción del peso del puente.

4. Cimentaciones y subestructura

La cimentación de la mayor parte de los apoyos se realiza directamente sobre roca, concretamente sobre la formación granítica existente, a excepción del pilar P3 que se dotará de cimentación indirecta con pilotes debido a las singulares condiciones geológicas de su lugar de implantación.

Los cimientos del pórtico-arco son grandes bloques de hormigón de unos 10 m de alto, 37 m de ancho y con una superficie lateral inclinada en contacto con la roca perpendicular a la pendiente de los jabalcones inclinados. La cimentación de los pilares se realiza con cimentaciones directas de dimensiones variables, adaptadas a las cargas a transmitir al sustrato rocoso.

En algunos casos será necesario reforzar el macizo rocoso mediante inyecciones.

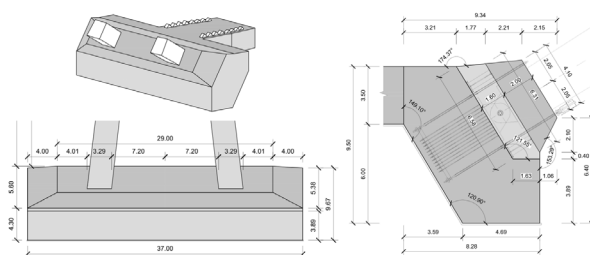


Figura 7. Cimentaciones principales de puntales

Los pilares son los principales elementos de soporte vertical. Los pilares principales P4 y P5 tienen una altura de 57 m y 55 m respectivamente y tienen una conexión rígida con el tablero formando una estructura integral sin dispositivos de apoyo, lo que permite un mejor comportamiento contra viento y sismo, y permite aprovechar esta característica durante la construcción, materializándose el tablero de forma simétrica mediante sucesivos avances en voladizo. Por otra parte, la esbeltez de estos elementos les permite asumir movimientos por variaciones térmicas, fluencia y retracción.

Esta solución aporta flexibilidad al pilar, aporta más transparencia, mejorando la relación de escala con su entorno urbano, y en el caso del pilar P4 permite la inclusión de un ascensor en este espacio para mejorar la conexión vertical con la nueva plaza creada en el espacio de la estación de servicio, el servicio existente y su conectividad con las calles en el nivel superior.

El Pilar P3 tiene unos 24 m de altura, con dispositivos de apoyo que se conectan a la cubierta. En este caso se necesitan dispositivos de apoyo que permitan movimientos longitudinales por acción térmica, fluencia y retracción y también para evitar la concentración de momentos en caso de sismo. El pilar asume una configuración similar a la de los pilares principales con un espacio central de 1 m y dos elementos de 2,50x2,72 m para un ancho total de 6,44 m.

Los pilares P1, P2 y P7 se enmarcan en los vanos extremos y tienen alturas inferiores, siendo de sección cuadrada maciza y dispositivos de apoyo en su conexión con el tablero.

El arco-pórtico está formado por dos jabalcones inclinados y el cuerpo central del tablero. Los

puntales tienen una inclinación de aproximadamente 30° con la horizontal, con una altura de aproximadamente 64 m y un voladizo horizontal de aproximadamente 105 m, para una longitud total de aproximadamente 125 m. Los puntales tienen un perfil de espesor variable y una parte inferior ligeramente curvada que continúa a través de la curvatura de la plataforma. El espesor de los puntales varía desde 2,97 m en el fondo hasta un máximo de 8,52 m. En sentido transversal, los puntales se abren en forma de A, partiendo de un tramo superior de 6,37 m de ancho. Allí se ensanchan y se dividen en dos elementos que juntos alcanzan un ancho en la base de hasta unos 21 m, pero dividiéndose en dos elementos separados que reducen su ancho de 3,60 m a 3,20 m.

La sección rectangular de los puntales es hueca con espesor de pared variable, con valores entre 0,40 m y 0,70 m en paredes verticales, y variable entre 0,70 m y 1,0 m en horizontales, según la posición.

El comportamiento de estos elementos en el diseño estructural es el de elementos fuertemente comprimidos. La reducción de su sección hacia la base permite reducir los momentos flectores en la estructura, formando casi una junta en la base, mientras que la separación transversal proporciona la estabilidad necesaria frente a las cargas de viento y sismo.

En estos elementos, el proceso constructivo es fundamental para su comportamiento final. El atirantamiento temporal durante la construcción no sólo sirve de apoyo durante su ejecución, sino que introduce una precompresión en las bielas y en el arco-pórtico equivalente a los esfuerzos de las cargas permanentes, lo que evita que en estos elementos aparezcan momentos flectores debidos a la deformación elástica del hormigón bajo cargas permanentes, situación habitual en arcos de cimbra.

4. Procedimiento constructivo

El procedimiento constructivo principal es el de avance en voladizos sucesivos con carro de avance y se utiliza tanto para el tablero como los puntales inclinados. Pero en el vano principal para poder realizar este procedimiento es necesario soportar los puntales inclinados y el tablero con tirantes provisionales durante la construcción. Para ello se disponen unos pilares de apoyo provisional en las márgenes del río que dan soporte durante el proceso constructivo. Desde estos pilares y desde una torre provisionales metálica superior se realiza el atirantamiento provisional, que incluye tirantes frontales de suspensión y tirantes posteriores de retenida que se anclan en anclajes a la roca provisionales para compensar los tiros que se producen. El tablero y puntales inclinados se ejecutan in situ en tramos de dovelas de 5 m.

Este procedimiento evita la afección al río y a las encostas, y permite construir con el mínimo de puntos de apoyo sobre el terreno.

En los vanos principales en la zona central de tablero se utiliza un hormigón ligero de densidad 18.5 kN/m³ y resistencia 45 Mpa, lo que permite reducir el peso y esfuerzos resistidos por la estructura.

Los principales elementos auxiliares para la ejecución de las obras son:

- Pilotes de cimentación provisional y sus macizos donde se apoyarán los pilares provisionales;
- Pilares provisionales de hormigón para soportar las torres de anclaje provisionales. Parte de los tirantes utilizados para la construcción en voladizo del arco del pórtico irán anclados a los pilares. Estos pilares tienen 64 y 68 m de altura, 6,5 m de ancho y 2,5 m de espesor. de sección hueca y muros de 70 cm de espesor. Conéctese horizontalmente al tablero en etapas intermedias para aumentar su estabilidad;
- Torres de atirantamiento provisional. Son torres metálicas que sirven para anclar las

varillas más largas y altas. Las torres tienen una altura de unos 49 m sobre el tablero.

- Los anclajes en la roca que se disponen en los puntos de partida de las varillas de sujeción. En estos puntos hay bloques de hormigón, en algunos casos coincidiendo con la cimentación de los pilares, que se fijan mediante anclajes en la roca tensados a una fuerza predefinida. Los anclajes se colocan y prueban primero y luego se tensan en etapas a medida que se instalan tirantes temporales y entran en juego las fuerzas de suspensión en estos puntos. Al final del proceso, una vez finalizado el arco-pórtico, se produce un proceso de desactivación progresiva de los tirantes y su retirada, que finaliza también con la desactivación de los anclajes, la retirada de las torres de tirantes y la demolición de los pilares temporales.

5. Conclusiones

El nuevo Ponte Ferreira en la ciudad de Oporto sobre el río Duero será el mayor puente de la ciudad en cuanto a longitud y vano principal. Sirve para el cruce del Metro do Porto con su nueva línea Rubi entre Oporto y Vila

Nova de Gaia, así como los caminos peatonales y ciclistas en ambos laterales. Esta nueva infraestructura promueve por tanto la movilidad sostenible y forma parte de las actuaciones del Plan de recuperación y resiliencia PRR de la Unión Europea. El nuevo puente y la línea de Metro se encuentran en ejecución desde comienzos de 2024 y su finalización se espera para 2027. En el estado actual de las obras están avanzadas las cimentaciones, y se encuentran ejecutadas las primeras pilas de la subestructura. El nuevo puente será una estructura singular por sus dimensiones y su diseño, así como su proceso constructivo. Destacan la gran luz de 403 m que es única para la tipología de puente pórtico de hormigón, y el uso de materiales y tecnologías avanzadas, como el hormigón ligero en ciertas partes del tablero, el pretensado con alto nivel de protección y aislamiento eléctrico, así como la aplicación de la monitorización e instrumentación estructural y otros aspectos para garantizar un buen funcionamiento y resultado de las obras, y de cara al servicio, mantenimiento y durabilidad futura.

Figura 8. Infografía del procedimiento constructivo

