

CONCEPCIÓN Y PROYECTO DEL VIADUCTO SOBRE EL RÍO NERVIÓN

Francisco MILLANES MATO

Dr. Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Presidente

general@ideam.es

Luis MATUTE RUBIO

Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Director General

luis.matute@ideam.es

Daniel MARTÍNEZ AGROMAYOR

Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Jefe de Proyectos

daniel.martinez@ideam.es

Carlos GORDO MONSÓ

Ingeniero de Caminos

IDEAM S.A.

Jefe de Proyectos

carlos.gordo@ideam.es

Jesús DE LOS RÍOS FRANCISCO

Ingeniero de Caminos

DRAGADOS S.A.

Dirección Técnica

jriosf@dragados.com

RESUMEN

El Viaducto del río Nervión, en la Línea de Alta Velocidad Vitoria-Bilbao-San Sebastián, cuya construcción se ha terminado recientemente, es un viaducto de hormigón pretensado con una luz principal de 115 m, récord de España de luz en esta tipología y proceso constructivo. El viaducto cuenta con 6 vanos de luces 68+92+115+64+58+41 m. El procedimiento constructivo fue, para los vanos laterales la construcción mediante cimbra apoyada, y en su vano central mediante dovelas in situ ejecutadas con carro de avance en voladizo. La sección transversal, cuenta con un canto variable entre 8,20 m en las secciones de pilas del vano principal, y 4,50 m en el resto del viaducto. Este artículo describe la concepción general del Viaducto del río Nervión, las realizaciones internacionales de diseño similar, el análisis del proceso de ejecución y de seguimiento durante fase constructiva, y el estudio previo de soluciones.

PALABRAS CLAVE: Viaducto, avance en voladizo, hormigón pretensado, alta velocidad, canto variable.

1. Introducción

El Viaducto del Río Nervión, en el tramo Galdakao-Basauri de la Línea de Alta Velocidad del País Vasco, permite el paso del nuevo trazado de ferrocarril sobre el río Nervión entre las localidades de Zarátamo y Arrigorriaga, Bizkaia. El trazado del viaducto presenta una serie de condicionantes geométricos a la distribución de apoyos y luces de los vanos: El viaducto, con un trazado curvo en planta de radio $R=3200$ m, debe salvar el río Nervión, el trazado de la carretera BI-625 en las proximidades de un enlace, ambos con un esviaje aproximado de 60° , y la línea de ferrocarril convencional Bilbao-Castejón que cruza la traza del viaducto muy cerca del estribo E2 (Figura 1).

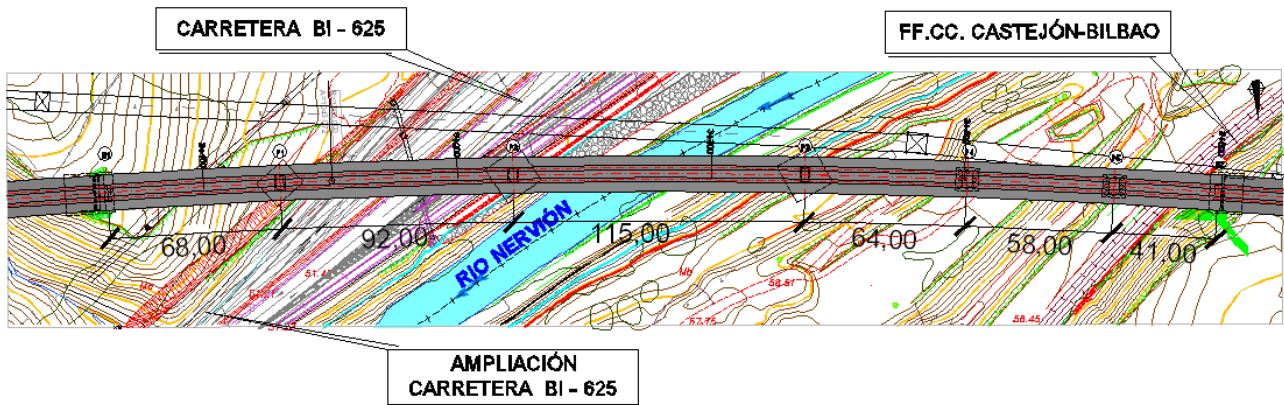


Figura 1. Planta del Viaducto del río Nervión.

El tramo del viaducto, en ligera pendiente del 1,5%, se encuentra enmarcado entre los túneles de Zarátamo y el de acceso a Bilbao, en un valle relativamente amplio y con una baja rasante sobre el nivel máximo de aguas, de aproximadamente 28 m.

Los condicionantes geométricos, derivados del esviate con el que se cruzan el río y la actual carretera BI-625 y su futura ampliación, junto con el requerimiento de la Declaración de Impacto Ambiental, respecto a no establecer ningún punto de apoyo permanente o provisional en el cauce del río, dictaron desde el primer momento la longitud libre que debían tener al menos 2 de los vanos del viaducto, de 92,00 m y 115,00 m luz, y en gran medida también condicionaron el procedimiento constructivo que debía seguirse al menos en la ejecución del vano que salta sobre el río Nervión. La longitud del vano 4 (vano de compensación del principal) también estaba condicionada por la presencia de una conducción urbana de gas.



Figura 2. Vista general del Viaducto del río Nervión

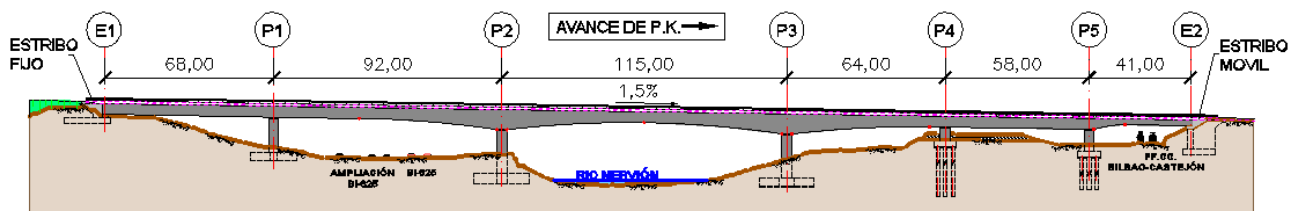


Figura 3. Alzado del Viaducto del río Nervión.

Puesto que la solución con cimbra cuajada o porticada queda descartada en el vano principal (ya que no pueden establecerse apoyos en el cauce), las propuestas constructivas en hormigón deben circunscribirse a la opción de construcción empujada, con autocimbra, o mediante avance en voladizos. Sin embargo, a pesar de este fuerte condicionante en el vano principal, el resto de

vanos del viaducto sí que reúnen las características necesarias para que la opción más apropiada sea la ejecución mediante una cimbra cuajada o porticada. De entre las opciones anteriores, la única que permite la adaptabilidad a la construcción de los vanos corrientes mediante cimbra apoyada y la del vano principal mediante un procedimiento especial es la construcción por avance en voladizo. La valoración económica determinó que era efectivamente la solución mediante cimbra apoyada y avance en voladizo la opción más apropiada.

De manera previa al inicio del proyecto se pensó que las soluciones metálicas o mixtas podrían representar una alternativa interesante a la construcción en hormigón pretensado. Puesto que el rango de las luces de este viaducto es en general inusual en puentes para LAV, y más aún en puentes mixtos para los que existen menos referencias, se realizó un estudio previo para tres soluciones alternativas que hacían uso de la acción mixta para resolver el vano principal.

2. Descripción de las soluciones alternativas mixtas hormigón-acero estudiadas

De manera previa a iniciar la fase de proyecto, se analizaron las diferentes alternativas tipológicas y de ejecución que pudieran resultar adecuadas para la construcción del viaducto. Así, además de estudiar la solución finalmente construida con un vano central de hormigón pretensado construido por avance en voladizo, se valoró la opción de construir el vano principal mediante una solución que integrara un tramo central de sección mixta hormigón-acero, empotrado en sendos voladizos de hormigón.

Se estudiaron tres soluciones correspondientes a tres diferentes longitudes del tramo mixto de 35 m, 55 m, y 75 m, siendo la mas interesante está última, dado que aportaba la ventaja de reducir al máximo la afección al río. No obstante, la solución fue finalmente descartada por la obra, aunque resultó ser muy interesante tanto económicamente como constructivamente, dada la singularidad que en este caso presentaba frente al Proyecto Original de cajón de hormigón en avance en voladizos.

Asimismo es de mencionar que la mencionada tipología ha sido ya realizada en varios Viaductos en España, como se puede comprobarse en la Figura 4.



Figura 4. Viaducto de Nalón, 110m de luz sobre el río Nalón, Asturias

3. Realizaciones internacionales de tipología similar a la solución propuesta

Para el predimensionamiento de la solución adoptada se realizó un estudio de puentes de la misma tipología (tableros cajón de hormigón para alta velocidad realizados mediante avance en

voladizo) ya construidos, y del mismo rango de luces (en torno a los 100 m de luz principal). Las realizaciones internacionales más destacables junto con sus características geométricas se adjuntan en la Tabla 1.

Viaducto	Dovelas	Luz [m]	Centro de Vano		Pila	
			Canto [m]	Canto/Luz	Canto [m]	Canto/Luz
Medway (UK)	In situ	152	3,23	1/47	11,50	1/13
Nervión (ES)	In situ	115	4,50	1/26	8,20	1/14
Roquemaure (FR)	In situ	110	5,00	1/22	8,10	1/13
Aviñón (FR)	Prefabricadas	105	5,00	1/21	8,50	1/12
Ventabren (FR)	In situ	100	5,00	1/20	8,50	1/12
Cotière (FR)	In situ	88	5,50	1/16	8,00	1/11

Tabla 1. Viaductos internacionales de luces y tipología similar al Viaducto del río Nervión



Figura 5. Viaducto de Medway (izda.) y Viaducto de Roquemaure (dcha.)



Figura 6. Viaducto de Aviñón (izda.) y Viaducto de Ventabren (dcha.)

Cabe destacar que este rango de luces corresponde, para esta tipología, a las mayores construidas en Europa para líneas de alta velocidad, constituyendo el Viaducto del Nervión el actual récord de España.

El primer elemento reseñable es el canto con el que se ha diseñado el tablero del viaducto, puesto que es el elemento que determina tanto la rigidez de la estructura (flechas y vibraciones) como la resistencia de la misma y las cuantías de armadura activa.

Como se puede observar en la Tabla 1, la elección del canto en la sección de pilas es ligeramente más esbelta, aunque en el orden de magnitud, dentro de las relaciones canto/luz habituales en este tipo de puentes. Por su parte la relación canto/luz de la sección de centro de vano es

moderadamente más esbelta (del orden del 25%) que la que presentan proyectos de características similares. A este respecto, es interesante resaltar la singularidad tipológica que presenta el viaducto de Medway (Figura 5) frente al resto de viaductos enumerados en la Tabla 1, puesto que cuenta con dos pilas en forma de célula triangular que le permiten ganar rigidez en centro de vano por efecto pórtico, y alcanzar una esbeltez en centro de vano de $H/L \approx 1/46$.

De igual modo sucede en el resto de vanos del viaducto, que entran dentro del rango de luces más convencionales para un puente cajón de hormigón, para los que la relación canto/luz habitual se sitúa en el entorno de 1/14 a 1/16 en vanos intermedios y en el entorno de 1/12 a 1/13,5 en vanos laterales. La elección de cantos de los vanos corrientes del proyecto, que se hizo con el doble propósito de homogeneizar la construcción, y de proporcionar una regularidad y ritmo visual que haga menos evidente la irregularidad en la distribución de luces de los vanos (motivada por los condicionantes geométricos). Son precisamente dichos vano laterales, sin compensación en uno de los extremos, los que resultan más penalizados en la respuesta dinámica, así como en la magnitud de la oscilación de esfuerzos, que condiciona la cuantía de pretensado.

4. Descripción de la solución proyectada y construida

4.1. Descripción del tablero

La sección transversal del tablero está formada por una sección cajón de ancho constante de 14,00 m en la losa superior y canto variable entre un máximo de 8,20 metros de canto en sección de pilas P2 y P3 y de 4,50 metros de canto en el resto del viaducto (Figura 7). El vano V6 cuenta con un canto reducido localmente de 2,50 m para dar gálibo suficiente a la línea de FFCC. Bilbao-Castejón que discurre bajo él. En las zonas de canto variable el intradós del tablero sigue una curva parabólica. El fondo del cajón presenta un ancho constante de 6,20 m a lo largo de todo el viaducto, proporcionando un cajón con almas verticales. El voladizo lateral resulta, por tanto, del orden de los 3,90 metros. Esta disposición de la sección transversal proporciona una adecuada respuesta resistente de la losa superior frente a las cargas del tráfico ferroviario al ubicarse las vías más centradas sobre las almas del cajón. De esta manera, se mejora la respuesta a flexión de la losa y el control de fatiga de las armaduras pasivas.

El esquema de pretensado del tablero cuenta con 3 familias básicas de tendones: 2 familias de trazado parabólico ubicadas en las almas del cajón en los vanos construídos mediante cimbra (V1, V2 y V4 a V6) formadas por 6 tendones cada una. Estos tendones se anclan en el vano 3, construido en voladizo, de manera progresiva en las primeras 5 dovelas con una cierta inclinación para recoger parte del cortante con pretensado. Una familia de tendones de refuerzo a negativos ubicada sobre las pilas P1, P2, P3 y P5, y que discurren por la losa superior. Una familia de tendones de refuerzo a positivos en los vanos V1, V2 y V3 y que discurren por la losa inferior.

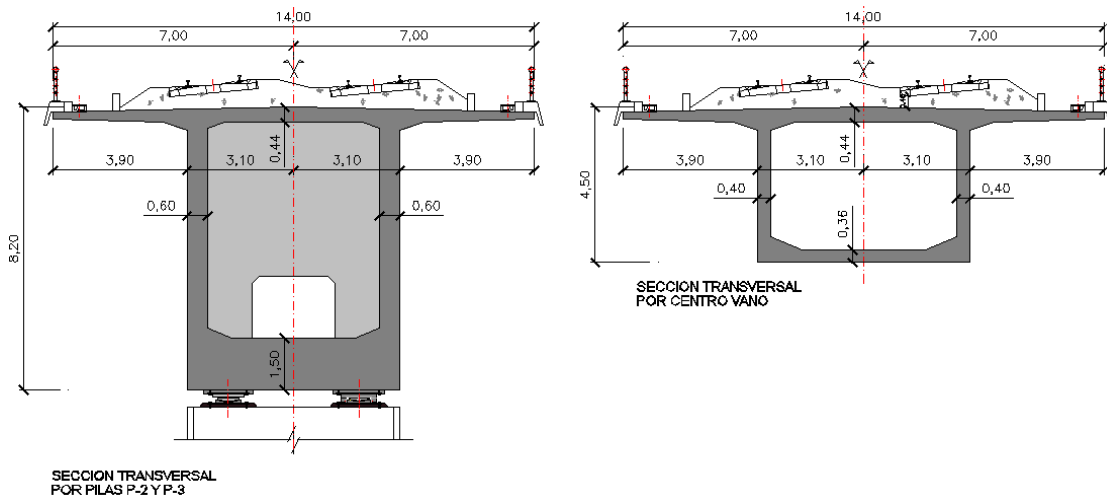


Figura 7. Secciones transversales por pila (izquierda) y por centro de vano (derecha).

Todas las familias de pretensado, a excepción de la de voladizo en la cara de anclaje de las dovelas, se anclan en resaltos de pretensado de ancho completo con idénticas geometrías, lo cual facilita la ejecución de los detalles de anclaje añadiendo un elemento de modularidad.

Los mamparos de pila, que se realizan excéntricos para recoger los movimientos horizontales del viaducto, cuentan con un paso de hombre que permite el acceso al interior del tablero y la inspección de los aparatos de apoyo a través de unos huecos previstos.



Figura 8. Vista de los vanos 2, de 92m, y 3 de 115 m del Viaducto del río Nervión

4.2. Descripción de la subestructura

La pila cuentan con una sección transversal rectangular de 4,00 m de lado en longitudinal y de 6,20 m de lado en transversal (misma dimensión que fondo del cajón del tablero). La vinculación entre el tablero, pilas, y cada estribo se realiza mediante 2 aparatos de apoyo tipo POT, ambos

libres en longitudinal y uno de ellos fijo en transversal, para permitir los movimientos de dilatación y contracción del tablero y para resistir los empujes transversales debido al viento y a las fuerzas del tráfico ferroviario.

La cimentación de las pilas P1, P2 y P3 así como la de los estribos E1 y E2 se realiza mediante zapatas con una tensión admisible del terreno de $7,50 \text{ kp/cm}^2$ y con un coeficiente de rozamiento terreno-hormigón de $\mu=0,56$. El estribo E2 es el estribo móvil y se compone de un cuerpo central y de unos muros laterales con alturas variables. Las pilas P4 y P5 se realizaron mediante una cimentación pilotada con 9 pilotes de diámetro $\varnothing=1,5 \text{ m}$, debido a la presencia de unos rellenos de vertedero de profundidad significativa.

El estribo E1 es el estribo fijo que retiene todas las fuerzas horizontales en sentido longitudinal del viaducto debidas al frenado, interacción vía-estructura, rozamiento de teflones originado por las acciones térmicas y reológicas, y viento longitudinal. Para recoger las fuerzas horizontales en dicho estribo E1 se disponen dos aparatos de apoyo y un anclaje horizontal al tablero mediante unidades de pretensado, tesadas desde una cámara de tesado prevista en el trasdós del estribo.

4.3. Descripción del proceso constructivo

En lo que respecta a la secuencia constructiva, tal y como se ha comentado en el apartado §1, ésta se realiza parcialmente con cimbra apeada en el terreno (vanos V1, V2, V4, V5 y V6), construyendo un vano en cada fase y aproximadamente una longitud de $\frac{1}{4}$ de la luz del vano adyacente para compensar los flectores positivos durante la construcción (Figura 9).



Figura 9. Vista general del Viaducto del río Nervión durante su ejecución.

Por su parte, el vano V3 se realiza mediante la técnica de avance en voladizo, partiendo con carros de hormigonado desde las pilas P2 y P3 y hormigonando dovelas in situ hasta alcanzar la sección de clave, momento en el que se hormigona la sección de centro de vano y el viaducto adquiere su esquema estático definitivo (Figuras 10 y 11). Durante el hormigonado el carro de avance en voladizo se sustenta colgando de la dovela anterior.

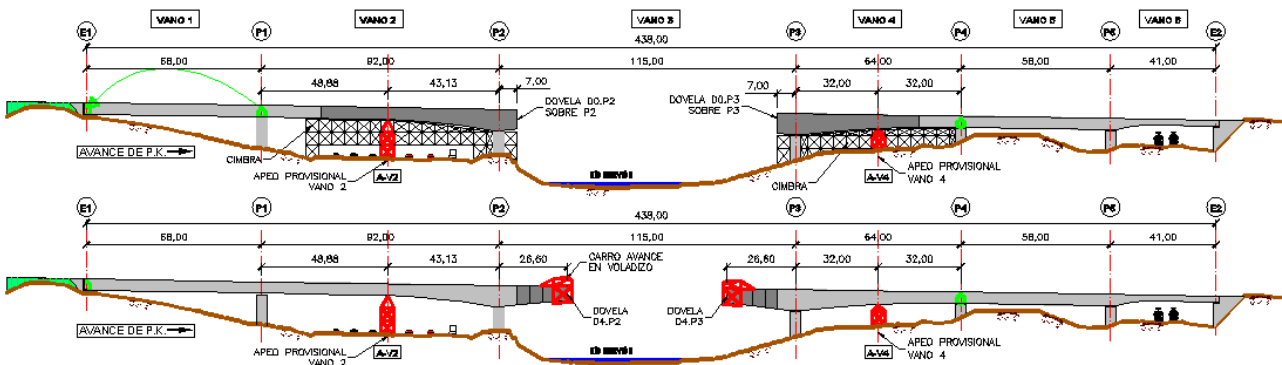


Figura 10. Esquema del proceso constructivo, fase 3 y fase 5.



Figura 11. Vista general del vano 3 durante su ejecución mediante avance en voladizo.

El proceso constructivo a detalle está desarrollado en la comunicación nº 396, del presente congreso.

5. Estudio de sensibilidad en relación con el proceso constructivo del vano 3

La ejecución del vano 3 en avance en voladizo precisaba del adecuado conocimiento y evaluación del comportamiento real de la estructura durante las diferentes operaciones de montaje, consistentes, principalmente, en el hormigonado de las dovelas, el cuelgue del carro de avance y el tesado de cables. Era de especial importancia determinar la sensibilidad de la respuesta de la estructura ante el rango de variaciones razonables de los parámetros de mayor influencia en la respuesta real (en deformaciones y esfuerzos) de la estructura durante el avance en voladizo (Figura 14), como pueden ser: la rigidez del hormigón, el peso de cada elemento, las fuerzas de tesado, las oscilaciones térmicas durante los procesos de tesado, bien entre diferentes fases, bien entre elementos, y los parámetros reológicos.



Figura 12. Vista del voladizo de pila P3 (izda.) Vista de la operación de cierre de clave (dcha.)

Por todo ello, se realizó un estudio de sensibilidad en relación con el proceso constructivo del vano 3, con la finalidad de identificar justificadamente aquellos parámetros que pueden experimentar variaciones significativas respecto de sus valores nominales o teóricos y evaluar y valorar su repercusión en la estructura en términos de movimientos y esfuerzos. De este modo, fue posible establecer los valores umbral de aviso y alarma (espera) de dichas desviaciones así como los procedimientos y dispositivos de control y seguimiento del montaje del tablero, necesarios para registrar, evaluar y, de ser necesario, corregir las anomalías que se salgan de lo tolerable, así como establecer criterios sencillos y prácticos para el ajuste de las contraflechas teóricas durante el avance en voladizo.

6. Principales participantes en el proyecto y obra.

Propiedad: Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF)

Dirección de Obra: Luis Baamonde Calzada (Director de Obra, INECO-ADIF), UTE Galdakao (Asistencia Técnica a la Dirección de Obra, Euroestudios – Fulcrum).

Constructora: UTE Zarátamo (DRAGADOS-IZA). Jaime Navarrete (Jefe de Obra), Ricardo Rodríguez (Jefe de Producción), Jesús de los Ríos (Dirección Técnica de Dragados), Nicolás Neira (Encargado).

Proyecto de la Estructura y Asistencia Técnica al Contratista: IDEAM S.A. Francisco Millanes Mato, Luis Matute Rubio, Daniel Martínez Agromayor, Carlos Gordo Monsó, Juan Luis Mansilla Domínguez, Reyes García Orduña, Alberto Nicolás Pazo.

7. Referencias

- [1] SETRA, *Guide de conception. Ponts en béton précontraint construits par encorbellements successifs*, SETRA, Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Amenagement durable, París, 2003, 291 pp.
- [2] MATHIVAT, J., *Construction par encorbellement des ponts en béton précontraint*, Editions Eyrolles, París, 1979, 340 pp.
- [3] RAMONDENC, Philippe. BOUSQUET, Christian. *The main bridges of the high speed line HSL Méditerranée*, Proceedings of the FIB Symposium 2004, 26-28 April 2004, Avignon.