



www.elsevierciencia.com/hya



CrossMark

Disponible en
ScienceDirect
www.sciencedirect.com

Hormigón y Acero 65 (2014) 233–245



Viaducto de Trapagaran

Trapagaran Viaduct

Jordi Revoltós Fort^{a,*}, José Antonio Llombart Jaques^a y Juliana Fernández Vega^b

^a *Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Estudio de Ingeniería y Proyectos (EIPSA), Madrid, España*

^b *Ingeniera Civil, Estudio de Ingeniería y Proyectos (EIPSA), Madrid, España*

Recibido el 23 de diciembre de 2013; aceptado el 27 de mayo de 2014

Disponible en Internet el 19 de febrero de 2015

Resumen

El viaducto de Trapagaran se divide en tres partes: viaducto principal, viaducto de acceso y zona de transición. El viaducto principal tiene una longitud de 670 m y vanos de 125 m. Consta de una sección cajón de hormigón pretensado de 35,60 m de ancho y canto de 5,90 m. El viaducto de acceso está formado por cuatro estructuras separadas, con luces que alcanzan los 86 m. Cada uno de los tableros está compuesto por una viga cajón mixta de 3,50 m de canto. Los cuatro ramales convergen en la zona de transición que presenta una geometría compleja. La zona de transición es una estructura de hormigón pretensado de unos 60 m de luz ejecutada sobre cimbra.

© 2014 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.

Palabras clave: Avance en voladizo; Sección evolutiva; Construcción mixta; Geometría compleja; Cimbra

Abstract

The Trapagaran viaduct was divided into three parts: main viaduct, access viaduct and transition area. The main viaduct is 670 m long with 125 m spans. It is formed by a 35.60 m wide, 5.90 m deep prestressed concrete box cross section. The access viaduct is formed by four separate structures with spans reaching 86 m. Each of the decks is made up of a composite 3.50 m deep box girder. The four branches converge in the transition area displaying complex geometry. The transition area is a prestressed concrete structure of approximately 60 m in span executed on falsework.

© 2014 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Published by Elsevier España, S.L.U. All rights reserved.

Keywords: Cantilever method; Evolutive cross section; Composite construction; Complex geometry; Falsework

1. Introducción

El viaducto de Trapagaran se integra en las obras de la Variante Sur Metropolitana (VSM) de Bilbao y sirve de elemento de conexión entre el enlace con la A-8 y el tramo de inicio del tronco de la VSM. Dadas las dimensiones y características del viaducto, así como los obstáculos inferiores sobre los que cruza, se trata de una obra singular para la que se ha propuesto una solución adecuada a su trascendencia estructural y estética y a su integración en el entorno.

2. Condicionantes de diseño

Los condicionantes de diseño para el viaducto de Trapagaran son múltiples y abarcan desde el trazado mismo de la VSM, a las afecciones a edificaciones y a viales existentes, a la estética de la estructura, al plazo de ejecución y costes. En los apartados siguientes se describen detalladamente dichos condicionantes.

2.1. Trazado

El viaducto, de 995 m de longitud, se inicia en el enlace de Trapagaran, recogiendo el tronco de la autopista y diversos ramales del mismo, para ascender con una sola plataforma de gran dimensión por encima del barrio de Trapagaran-Causo hacia el

Véase contenido relacionado en DOI:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.hya.2014.10.003>

* Autor para correspondencia.

Correo electrónico: jrevoltos@eipsa.net (J. Revoltós Fort).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.hya.2014.10.002>

0439-5689/© 2014 Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural (ACHE). Publicado por Elsevier España, S.L.U. Todos los derechos reservados.



Figura 1. Imagen virtual de la zona del viaducto.

área de peaje. Este trazado genera 3 partes diferenciadas para el viaducto (fig. 1):

- El viaducto de acceso, donde cada uno de los 4 ramales del enlace converge en tableros distintos.
- El tramo de transición, situado entre el viaducto principal y el tramo de acceso, donde dichos ramales confluyen para juntarse en un único tablero.
- El viaducto principal, donde las 3 calzadas distintas de la VSM discurren en un único tablero de gran anchura.

En la zona del viaducto principal, la VSM discurre en curva y contracurva, encadenándose hasta 7 alineaciones distintas dentro de la estructura. Las curvaturas dispuestas tienen unos radios mínimos de 500 m. Debido a la existencia de fuertes radios de curvatura, el peralte transversal alcanza en algunas zonas el 8%. La altura máxima del tablero sobre el terreno natural es de unos 42 m. El tronco de la VSM, sobre el viaducto principal, consta de 3 calzadas distintas: 2 descendentes de 9,50 m y una ascendente de 13,50 m, por lo que el ancho total del tablero alcanza los 35,60 m, incluyendo barreras y pretilas.

En el viaducto de acceso, los cruces de los distintos ramales sobre los viales de la A-8 discurren en curva y con un fuerte esviaje. Además, la existencia de tráfico en la A-8, que pasa por debajo del tablero del viaducto, ha obligado a escoger una adecuada tipología estructural del conjunto, de tal forma que la construcción afectase lo menos posible a dicho tráfico.

2.2. Afecciones

En la zona del viaducto, la VSM debe salvar sucesivamente la línea de ferrocarril Bilbao-Muskiz y las carreteras BI-745,

BI-3746 y N-634. Además, el viaducto discurre por una zona industrial. Por lo tanto, se han ubicado las pilas tendiendo a preservar al máximo las edificaciones existentes. Se ha escogido un procedimiento constructivo apropiado para minimizar, en la medida de lo posible, cualquier afección a las actividades de dichas industrias. Teniendo en cuenta la existencia de los obstáculos inferiores de la zona, en el diseño del viaducto principal se ha estimado conveniente disponer vanos de 125 m de luz.

2.3. Estética

La altura a la que discurre, sus dimensiones y su cercanía a la A-8 hacen que su nivel de exposición visual sea muy elevado, por lo que se ha requerido el diseño de un viaducto elegante, integrado en el entorno, a la vez que se ha evitado la disposición de estructuras pesadas, impactantes o intrusivas.

2.4. Construcción

Debido a los múltiples obstáculos inferiores que se han enumerado anteriormente, ya sean viales o edificaciones, la construcción del tablero debía efectuarse, en la mayor parte del viaducto, desde la propia estructura. El sistema constructivo tenía que ser el adecuado a los rangos de luces dispuestos en el viaducto principal, y a las curvaturas variables en planta.

Por último, la construcción de todo el viaducto debía hacerse en un plazo no superior a los 32 meses, para no comprometer la fecha de inauguración de toda la VSM.

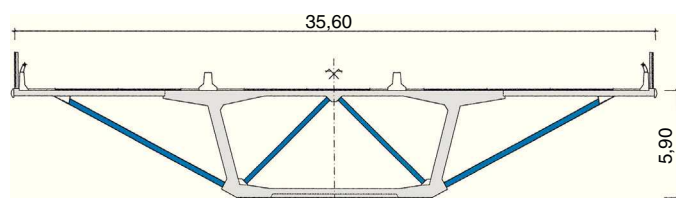


Figura 2. Sección transversal del tablero.

2.5. Economía

Si bien se pretendía diseñar un viaducto elegante y estético, el coste final de la estructura debía estar dentro de los ratios razonables por metro cuadrado que se manejan para viaductos de esta categoría.

3. Criterios iniciales del diseño

El primer criterio inicial de diseño está basado en la voluntad de minimizar las afecciones a las edificaciones y empresas ubicadas en la zona industrial. Ello ha motivado la elección de un tablero único (fig. 2), de 35,60 m de ancho, apoyado en pilas de un solo fuste para el viaducto principal. La magnitud de dicho ancho sobrepasa con mucho los valores usuales para viaductos de tablero único con 3 carriles por calzada cuyo valor se establece normalmente en el entorno de los 26 m (ver referencias [1,2,3]). La sección de estos tableros se define por lo general con un núcleo o cajón resistente y por unos amplios voladizos laterales apoyados en jabalcones o en costillas.

Los anchos que superan los 30 m se suelen resolver para viaductos convencionales mediante la yuxtaposición de distintos nervios o cajones equivalentes a un ancho de tablero normal de 10 o 12 m. Normalmente, estos anchos se corresponden a grandes viaductos colgantes o atirantados cuya sustentación se efectúa en los 2 bordes del tablero. Dicha sustentación lateral obliga a definir una sección transversal formada por una celosía o por un cajón multicelular. Es por ello que, en fase de proyecto, la elección para el tablero de un esquema tipo viga con un solo nervio suponía un reto de partida importante.

Entre las referencias clásicas de viaductos tipo viga, de hormigón pretensado de gran ancho resueltos con un solo nervio, cabe citar el viaducto de Kochertal, de 31,00 m, y el de Felsenau, de 26,20 m (tabla 1).

El segundo criterio inicial adoptado para el diseño del viaducto fue que, a pesar de su complejidad geométrica y de la variabilidad que el trazado imponía, no se debía diseñar cada

parte de forma separada e independiente, sino que el conjunto debía mostrar una imagen con una cierta unidad formal a lo largo de todo el viaducto.

4. Tablero del viaducto principal

4.1. Descripción general

El tablero del viaducto principal es una viga continua de 670 m de longitud, dividida en 4 vanos centrales de 125 m de luz y 2 extremos de 90 y 80 m.

Como ya se ha mencionado anteriormente, el tablero tiene un ancho de 35,60 m y da cabida a 3 calzadas distintas: 2 ascendentes de 2 carriles y arcenes, de 9,50 m, y una descendente de 3 carriles y de 13,50 m de ancho. Entre ellas se disponen barreras rígidas de 0,60 m de ancho, mientras que en sus extremos se disponen pretiles de alta seguridad de 0,50 m de ancho. En la parte inicial, cerca de la zona de transición, se produce una ligera variación del ancho hasta alcanzar los 36,34 m, que se ha resuelto variando la longitud de los voladizos laterales.

La estructura del tablero se ha resuelto mediante la existencia de un solo cajón o núcleo resistente de hormigón pretensado que, con un canto constante de 5,90 m, se adapta perfectamente a las variaciones de curvatura y de peralte. El cajón central tiene un ancho superior de 19,00 m, completado por unos voladizos laterales apoyados en jabalcones transversales (fig. 3). Las almas del cajón tienen un espesor de 0,60 m en la mayor parte de los vanos y aumentan hasta 0,90 m cerca de las zonas de apoyo en pilas.

El uso de jabalcones laterales no solo permite alcanzar grandes voladizos laterales, sino que crea unos planos laterales inclinados que disimulan la magnitud del canto total del tablero. Además, los jabalcones exteriores establecen una triangulación de la sección transversal que tiene continuidad dentro del cajón con otros tubos metálicos. Dicha triangulación permite acortar las luces transversales de la tabla superior y facilita la disposición de una losa inferior de reducido espesor.

La construcción del tablero se realiza en 2 fases. En la primera fase se construye el núcleo de la sección (de 19,0 m de ancho) por voladizos sucesivos, avanzando simétricamente desde las pilas (figs. 4 y 5). Únicamente los 30 primeros metros y los últimos 20 m de los vanos extremos respectivos del tablero principal

Tabla 1
Tableros anchos en viaductos tipo viga con cajón monocelular de hormigón pretensado

Viaducto	Ancho (m)	Luz (m)	Año
IV cinturón Zaragoza [1]	26,60	92,00	2008
Montabliz [2]	26,10	175,00	2008
Kochertal [4]	31,00	138,00	1979
Felsenau [3]	26,20	156,00	1975
Trapagaran	35,60	125,00	2010



Figura 3. Imagen virtual de la sección del viaducto principal.



Figuras 4 y 5. Vistas de la construcción del núcleo por voladizos sucesivos.

se han construido con cimbra apoyada en el terreno. Todas las dovelas tienen una longitud de 5,00 m, siguiendo el ritmo que marcan los jabalcones laterales.

A pesar de disponer una luz de 125 m y de usar el método de voladizos sucesivos, se ha dispuesto canto constante con el objeto de ofrecer una buena visión del viaducto, mucho mejor adaptada a los cambios de curvatura y de peraltes del tramo que los que presentaría una solución típica de canto variable.

La parte inferior del núcleo tiene unas nervaduras transversales, coincidentes con los frentes de dovela, a modo de prolongación del apoyo de los jabalcones, que proporcionan un aspecto de artesanado de la cara inferior del tablero. El espesor de la tabla inferior es de 0,30 m y aumenta hasta 1,20 m en la sección de pilas. En todo momento se ha buscado privilegiar el aspecto inferior de viaducto, puesto que las visuales que se tienen de él son principalmente desde la zona industrial, es decir, desde abajo (fig. 6).

Una vez completada la viga continua que constituye el núcleo, se montan a ambos lados, mediante grúas que circulan sobre el propio tablero, los jabalcones laterales y las prelosas hasta alcanzar el ancho total de 35,60 m.



Figura 6. Vista general del viaducto principal.

4.2. Pretensado

El pretensado longitudinal del viaducto principal se descompone en 4 familias por la tabla superior y una por la tabla inferior (fig. 7). Las 3 primeras familias se disponen de acuerdo con las exigencias estructurales propias del avance en voladizo:

- La familia A está formada por 48 tendones de 25T15 por cada doble voladizo.
- La familia B es un refuerzo de 6 tendones de 37T15 dispuestos en las zonas de almas para las primeras dovelas.
- La familia C está formada por 20 tendones de 13T15 que anclan en la zona del nervio central que sirve de apoyo a los tubos interiores.

La cuarta familia de pretensado superior D está formada por 16 tendones de 24T15 que se anclan en resaltes dispuestos en la tabla superior en las 3 primeras dovelas. Siendo conscientes de la dificultad que a nivel de encofrado de la tabla superior suponen estos resaltes, se han diseñado todos en idéntica posición y con las mismas dimensiones.

Los tendones de la familia D se tesan una vez se han completado los 35,60 m de ancho de la sección transversal del tablero. En secciones evolutivas se suele disponer un pretensado exterior poligonal de continuidad, una vez se ha completado la construcción, con el fin de transmitir una compresión uniforme a toda la sección. Sin embargo, en este viaducto se ha optado por prescindir del pretensado exterior, debido a la existencia de jabalcones interiores inclinados que hubiese dificultado su trazado en gran medida.

El pretensado de continuidad de la tabla inferior está formado por 32 tendones de 19T15 en los vanos centrales y por 24 y 16 tendones de 19T15 en el primer y último vano, respectivamente.

El pretensado transversal está formado por 4 tendones adherentes de 4T15 por cada dovela de 5,00 m, que cubren todo el ancho del tablero. Tienen vaina plana y sus anclajes están colocados en las prelosas prefabricadas.

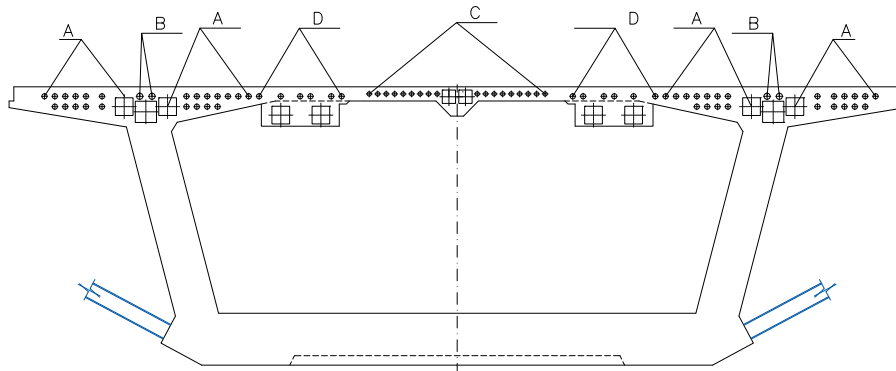


Figura 7. Pretensado en viaducto principal. Sección en frente de dovela cero.

Los tendones de pretensado con vainas planas se utilizan frecuentemente en forjados de edificación, debido a que reúnen las ventajas del pretensado adherente y las reducidas dimensiones verticales de los monotorones no adherentes. En el caso del viaducto de Trapagaran, debido al carácter evolutivo de la sección transversal, resultaba apropiada la colocación de dichos tendones, si bien sin enfilar en primera fase, contrariamente a lo que ocurre en edificación. Sabedores de la fragilidad de las vainas planas, muy sensibles a las pisadas y a los impactos susceptibles de producirse durante las labores de hormigonado, estas se montaron en obra con 2 redondos de respaldo de 20 mm y con 4 torones de sacrificio más cortos y pre-enfilados que se usaban de una dovela a otra. Estas medidas preservaron en gran parte la integridad de las vainas. Sin embargo, a pesar de ello se produjeron algunos daños que obligaron a reparar las vainas que se habían obturado o aplastado, con las consiguientes operaciones de picado de la losa. De la experiencia se deduce que es preferible aumentar unos pocos centímetros los espesores de las losas y usar tendones con vainas circulares.

4.3. Construcción del núcleo

La construcción del núcleo se inició por la ejecución de las dovelas cero sobre pilas, cuya longitud es de 10 m. Para ello se emplearon unas consolas que se apoyaban en unos cajeados dejados en cabeza de pila (fig. 8). El plazo de ejecución de estas dovelas fue de 6-7 semanas.

Para ejecutar los voladizos se emplearon 3 parejas de carros de avance de 350 t de capacidad. Normalmente se obtuvo un rendimiento de un par de dovelas a la semana por pareja de carros. Sin embargo, en épocas del año favorables a nivel climatológico, se alcanzaron rendimientos de 3 pares de dovelas cada 2 semanas por pareja de carros. Para la ejecución de las dovelas de cierre se necesitaron de 2 a 3 semanas.

Las dovelas se construyeron sin los jabalcones interiores. Estos se colocaron posteriormente para no dificultar las maniobras de los carros de avance. Para ello, la losa superior del cajón se diseñó con la capacidad resistente suficiente a flexión para soportar las acciones de peso propio y de sobrecargas de construcción con la luz transversal determinada por la distancia entre almas del cajón.

4.4. Voladizos laterales

4.4.1. Jabalcones exteriores

Los jabalcones exteriores son unos pórticos metálicos que están recubiertos exteriormente por una chapa de 6 mm de espesor con una abertura en forma de parábola para mejorar su aspecto estético (figs. 9, 10 y 11). Se decidió expresamente que fuesen metálicos para conseguir, con su textura y color, un efecto de unidad formal a lo largo de todo el viaducto, incluyendo viaducto de transición y viaducto de acceso. Además, en la zona del viaducto principal, su contraste con el hormigón rompe la monotonía de un ancho excesivo y aligera la vista inferior del tablero. Los jabalcones tienen un esquema estructural de pórtico y se disponen por módulos de 5,00 m de ancho y 10,60 m de largo. Sus jambas están compuestas por tubos cuadrados huecos de $300 \times 300 \times 12$ mm separados 4,40 m entre sí. El dintel es una viga con forma triangular que queda oculta por el plano que genera la chapa decorativa. No se ha establecido continuidad entre los dinteles de pórticos consecutivos.

Para industrializar su producción y facilitar su replanteo, todos los pórticos tienen el mismo intereje a lo largo del viaducto, independientemente de que estén en el interior o en el exterior de la curva. Es por ello por lo que la chapa decorativa tiene dimensiones variables con el fin de conseguir una ranura



Figura 8. Plataformas de trabajo de dovela cero.

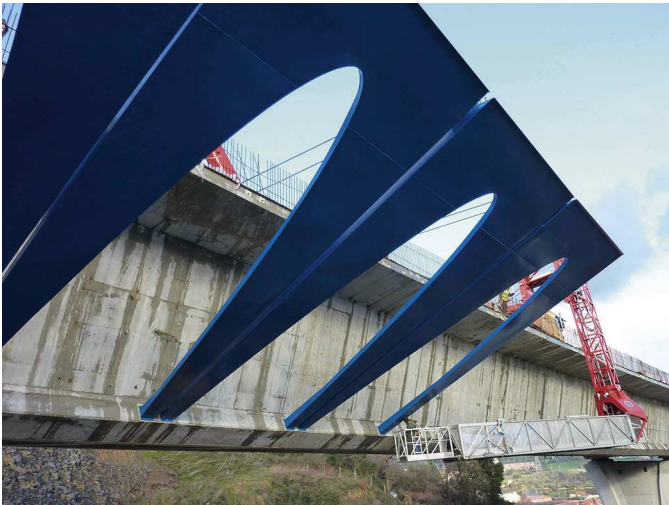
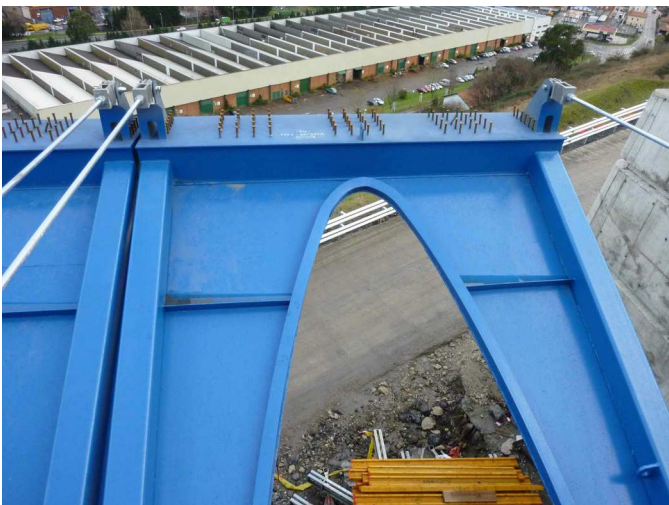


Figura 9. Viaducto principal. Vista inferior de los jабalcones durante montaje.



Figura 12. Viaducto principal. Vista inferior.



Figuras 10 y 11. Viaducto principal. Vista lateral y frontal de los jабalcones.

visual entre jабalcones de dimensiones semejantes a lo largo de todo el puente.

En las zonas de peralte constante las caras inferiores de las jambas y del travesaño están en un mismo plano. Sin embargo, en las zonas de transición de peralte se ha dispuesto una ligera distorsión de dicho marco desplazando el extremo de una de las patas 40 mm con respecto de la otra. La inserción de un elemento plano de estas dimensiones es geoméricamente incompatible con una variación de peralte. En caso de no haberse dispuesto dicha distorsión, se hubiese observado un tecleo entre los bordes superiores de pórticos de jабalcones contiguos.

Cabe destacar que la consideración de estas medidas, unidas a la eficaz labor de definición geométrica del taller metálico y a la meticulosa colocación por parte del equipo de obra, ha permitido un acabado excelente (fig. 12).

La conexión entre jабalcones y la losa superior se ha efectuado mediante pernos tipo Nelson. Estos pernos se han replanteado de forma que librasen los nervios y las armaduras de las prelosas.

4.4.2. Sistema de sujeción de jабalcones

Durante la construcción, cada pórtico se sostiene provisionalmente, en su parte superior, mediante 2 barras pasivas que se anclan en unos cartabones metálicos y en unas piezas metálicas cosidas a unos tacos de hormigón que sobresalen del núcleo del tablero (fig. 13). Las barras son de acero recocido de calidad F-1252, de 36 mm de diámetro. Dichas barras se han separado de la fibra superior del tablero para facilitar la colocación de las prelosas (fig. 14). Las barras de sujeción, así como las piezas metálicas de unión al tablero, se han ido reaprovechando a lo largo de la construcción de la totalidad del tablero.

En su parte inferior, los jабalcones disponen de un dado de metal que se introduce en un cuadrado hueco dejado en el núcleo del cajón. Para asegurar un buen contacto en la parte inferior de las patas, la chapa de apoyo se unta de resina epoxi poco antes de su colocación.



Figura 13. Viaducto principal. Tacos de sujeción en núcleo.

4.4.3. Prelosas

Sobre cada jабalcon, y sobre una pequeña ménsula dejada en el núcleo, apoyan transversalmente 2 prelosas nervadas de 2,50 m de ancho y 8,40 m de largo. Las prelosas llevan incorporados los anclajes del pretensado transversal y todos los elementos embebidos necesarios para la seguridad durante la construcción.

La distancia vertical dejada entre los jабalcones y las barras de sujeción provisional, así como un análisis previo de todas las posibles interferencias geométricas, ha permitido una rápida y sencilla colocación de las prelosas.

Una vez ferrallada y hormigonada la losa de los voladizos laterales, se tesan los tendones de pretensado transversal constituidos por 4 unidades de 4T15 por pórtico. Dichos tendones cubren todo el ancho del tablero. El espesor final de la losa de voladizos es de 0,30 m.

Una vez realizado el pretensado transversal, se destensan las barras de sujeción, se cortan los cartabones metálicos que sobresalen del jабalcon y se demuelen los tacos de hormigón dispuestos en el núcleo del tablero.

4.4.4. Montaje y rendimientos

El montaje de la totalidad de los jабalcones se ha efectuado con una sola grúa y con la ayuda de un camión provisto con una plataforma articulada, que ha permitido el acceso a la base del cajón. Ambos vehículos han circulado sobre el núcleo del



Figura 14. Viaducto principal. Prelosas colocadas.



Figura 15. Viaducto principal. Montaje de jабalcones.

tablero, previamente construido, con lo que esta segunda fase no ha generado apenas afecciones al tráfico inferior ni a las actividades de las industrias vecinas (fig. 15).

Para la colocación de los jабalcones se ha alcanzado un rendimiento de 8 unidades al día, mientras que para las prelosas se han llegado a colocar entre 30 y 40 unidades por día.

El hormigonado de la losa de voladizos se ha realizado en tramos de 40 m de longitud una vez dispuesto el ferrallado y enfilados los tendones de pretensado transversal.

5. Tablero de viaducto de acceso

En el viaducto de acceso, los cruces de los distintos ramales sobre los viales de la A-8 se producen en curva y con un fuerte esviaje, lo cual obliga a disponer luces superiores a los 70 m. Por otro lado, el tráfico existente en la A-8 ha motivado la elección de una tipología de tablero cuya construcción afectase lo menos posible al tráfico de la autopista en servicio. Es por ello que se ha optado por una tipología de tableros mixtos para esta zona.

El viaducto de acceso está formado por 4 ramales distintos con la siguiente relación de anchos y luces:

- Ramal A. Ancho = var. 11,80 a 17,40 m. Luces = 56,71 + 79,23 + 76,98 + 59,25.
- Ramal B. Ancho = 11,50 m. Luces = 37,99 + 77,04 + 52,26 + 59,80.
- Ramal C. Ancho = 11,50 m. Luces = 42,02 + 86,43 + 43,47 + 53,50 + 60,25.
- Ramal D. Ancho = 7,80 m. Luces = 54,57 + 61,10.

Para los 4 ramales de las luces indicadas, la correspondiente al último vano y los 12 m anteriores pertenecen a la denominada

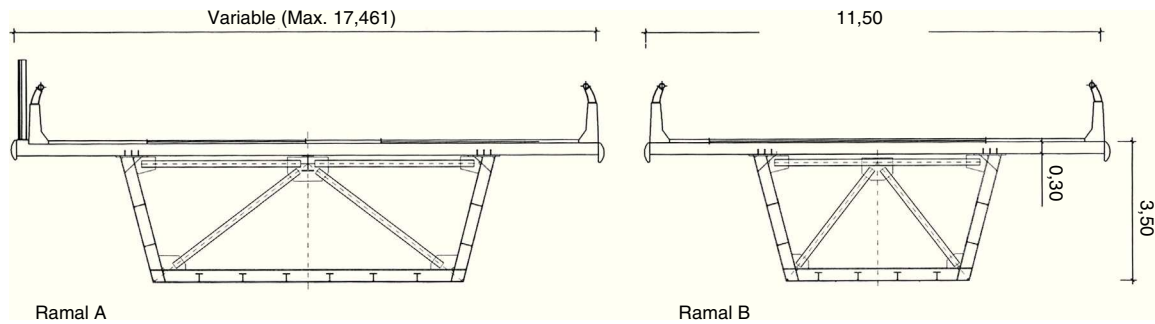


Figura 16. Viaducto de acceso. Sección de 2 ramales.

zona de transición. Cada uno de los tableros está compuesto por una sección cajón mixta de hormigón y acero. Todos los cajones metálicos tienen un canto de 3,20 m y una losa superior de hormigón armado de 0,30 m de espesor total, hormigonada in situ sobre prelosas (fig. 16). En el ramal A, que presenta una fuerte variación de ancho, se ha decidido, por razones estéticas, mantener el ancho del voladizo, aumentando por consiguiente la tabla inferior del cajón.

En los ramales B, C y D el montaje se pudo realizar sin tráfico inferior. En la figura 17 se pueden observar los cajones metálicos de los ramales B y C sobre castilletes provisionales. La disposición de dichos castilletes fue tal que permitió la puesta en servicio del tráfico de la A-8 sentido Bilbao antes de completar la sección transversal. Sin embargo, las operaciones de montaje del ramal A se han realizado en cortes nocturnos de la A-8 colocándose, con el fin de no disponer apoyos intermedios, tramos enteros de 76 m en una sola operación.

6. Tablero de zona de transición

6.1. Consideraciones previas

El viaducto de acceso está constituido por un conjunto de 4 ramales que confluyen en el tablero del viaducto principal en



Figura 17. Viaducto de acceso. Tramos metálicos de ramales B y C.

una zona de transición, cuyas peculiaridades más significativas se resumen a continuación:

- Geometría compleja en la confluencia de alineaciones distintas.
- Curvatura variable. Dos peraltes variables y distintos en la plataforma superior.
- Variación de ancho de tablero de 36,34 m al inicio del viaducto principal hasta 40,80 m en la sección de inicio de los ramales del viaducto de acceso.
- Variación de canto desde 5,90 m del viaducto principal a 3,50 m de los ramales de acceso.
- Cambio de un solo cajón con jabalcones y amplios voladizos laterales a 4 cajones independientes.
- Cambio de material resistente de hormigón pretensado a estructura mixta.

El diseño ha exigido un tratamiento especial tendente a mantener la armonía del conjunto y las cualidades estéticas, evitando variaciones bruscas en las formas fundamentales.

6.2. Geometría

El tablero en la zona de transición se ha resuelto con una sección multicelular de hormigón pretensado que parte de la pila 0 con la misma sección que en el viaducto principal, pero con un alma central añadida. El alma central se bifurca a un tercio del vano en 2 almas con el fin de disminuir la luz transversal de la tabla superior (fig. 18). El canto varía linealmente desde

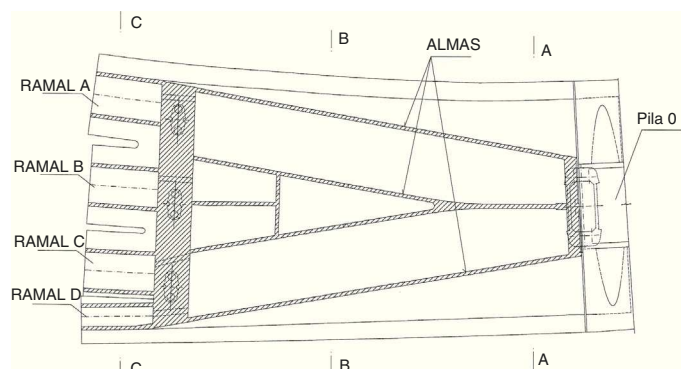


Figura 18. Viaducto zona de transición. Planta de las almas del tablero.

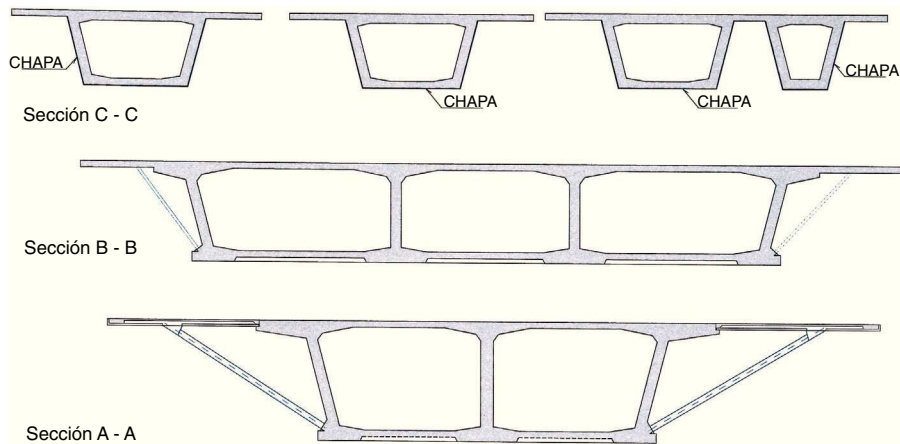


Figura 19. Viaducto zona de transición. Secciones fundamentales.

5,90 m sobre la pila 0 hasta 3,95 m en una sección situada a 5,00 m del eje de las pilas P-1A, P-1B y P-1C, estableciendo un salto brusco del canto de 0,45 m en su frente. A partir de dicha sección la vista inferior del tablero se muestra como 4 cajones y no como una tabla única.

Sobre las 3 pilas de la parte ancha se establece una riostra transversal muy potente que permite la conexión de la zona de transición de ancho variable con los 4 cajones de hormigón pretensado (fig. 19). Dichos cajones se definen con unas secciones de idénticos contornos a los de los cajones mixtos de los ramales de acceso a los que se conectan. Los cajones de hormigón pretensado de la zona de transición tienen sus almas y la tabla inferior recubiertas de una chapa metálica decorativa.

La parte inferior, con una geometría clara y contundente en forma de espátula (fig. 20), también presenta unas nervaduras a semejanza del viaducto principal, que van marcando los distintos nervios estructurales longitudinales dispuestos. Enlaza con continuidad estructural con los tableros de los ramales sin necesidad de juntas de dilatación. Tan solo se dispone una junta de calzada entre la zona de transición y el viaducto principal.

Debido a su complejidad geométrica y dado que el gálibo sobre el ferrocarril lo permitía, esta zona se ha ejecutado in situ sobre una cimbra apoyada en el suelo (figs. 21 y 22). Para construir el encofrado, se ha desarrollado un modelo 3D de todo el contorno de hormigón de la zona de transición. Dicho modelo se contrastó con el que desarrolló el subcontratista encargado de la cimbra.



Figura 20. Viaducto zona de transición. Imagen virtual.

6.3. Pretensado

El pretensado de la zona de transición está formado por 4 familias de 6 tendones de 24T15 que discurren por las almas principales con trazado parabólico. Las almas de los 4 cajones



Figuras 21 y 22. Vistas de la cimbra de la zona de transición.



Figura 23. Vista inferior de la zona de transición.

independientes, que sirven de nexo con los cajones mixtos y que no tienen prolongación en alguna de las 4 almas del vano principal, también se pretensan con 3 tendones de 24T15. Adicionalmente, se disponen 14 tendones de 15T15 en la tabla inferior conjunta y 16, 4, 8 y 8 tendones de 19T15 en la tabla superior, en zona de momentos negativos, para los ramales A, B, C y D, respectivamente.

La riostra dispuesta sobre las 3 pilas se ha pretensado transversalmente con 20 tendones de 7T15.

6.4. Voladizos laterales

En la zona de transición, los jабalcoes laterales se van alabeando desde su junta con el viaducto principal hasta fundirse con el alma exterior de la sección de los cajones de los ramales extremos. En los primeros metros desde la pila 0 siguen teniendo su función estructural; sin embargo, a medida que se acercan a las 3 pilas, los voladizos se reducen sensiblemente y pasan a ser meramente decorativos.

Cuando la dimensión del propio jабalcón disminuye, se elimina la abertura en forma de parábola dejando una superficie cerrada que permite una transición suave con las almas de los cajones metálicos (fig. 23).

Los jабalcoes y las chapas decorativas de la zona de transición son piezas semejantes a las del viaducto principal, con el mismo sistema de sujeción provisional. Debido a la variación geométrica de esta zona, todos ellos son elementos espaciales que se han tenido que definir uno a uno.

6.5. Conexión con el viaducto de acceso

El punto de conexión entre los 4 cajones de hormigón pretensado y los correspondientes cajones mixtos se ha dispuesto a una distancia de 12 m del apoyo sobre las pilas, donde el momento flector es más reducido. De este modo, la conexión entre la parte metálica y la de hormigón es fundamentalmente a cortante. Dicha conexión se ha realizado a rasante mediante pernos tipo Nelson con una dovela metálica de 3,00 m de longitud que



Figura 24. Vista de la dovela de conexión antes de ser izada.

se ha posicionado sobre el encofrado de la zona de transición y sobre la que se ha hormigonado dicha zona (fig. 24). El resto de cada uno de los 4 tramos de cajón pretensado también se ha recubierto de una chapa decorativa conectada, pero sin función estructural.

7. Pilas

7.1. Pilas del viaducto principal

El hecho de haber dispuesto un solo núcleo resistente en el tablero del viaducto principal ha permitido definir unas pilas lo más recogidas posible, resultando mínimas sus afecciones. Las pilas son unos prismas huecos inscritos en un rectángulo de $8,50 \times 5,10$ m, con los paramentos laterales y frontales redondeados (fig. 25). Además, la parte central del paramento frontal se ha texturizado, obteniéndose unas pilas sencillas y elegantes, en consonancia con el tablero. Las pilas están rematadas con un cabecero de 8,40 m de altura, que presenta un ensanchamiento para recoger el núcleo del tablero sustentado en 2 aparatos de apoyo. En las pilas 2, 3 y 4 se han dispuesto apoyos de neopreno, mientras que en las pilas 1 y 5 se han colocado apoyos POT de 75.000 kN de capacidad cada uno (fig. 26).

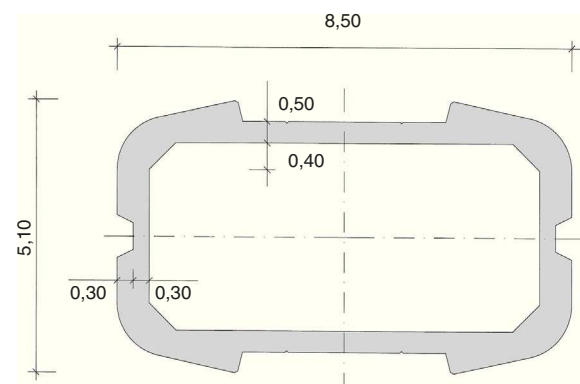


Figura 25. Sección de pilas de viaducto principal.



Figura 26. Imagen de los apoyos tipo POT.

La cimentación en las pilas 1, 3 y 5 es directa, con unas dimensiones de $22,00 \times 19,00 \times 3,50$ m, mientras que en las pilas 2 y 4 se han dispuesto unos encepados de $19,00 \times 19,00 \times 4,00$ m sobre 20 pilotes de 2,00 m de diámetro.

Las pilas se han construido con trepas de 5,00 m de altura. Los rendimientos han sido de 10 días por trepa, mientras que cada cabecero ha requerido unas 6 semanas para su ejecución.

Durante las fases de avance en voladizo y con el fin de asegurar la estabilidad de la estructura, se dispuso un anclaje provisional en cabeza de pilas, compuesto por unos tacos de hormigón cosidos con tendones de pretensado que aseguraban la estabilidad del voladizo (fig. 27). Con el fin de conseguir un coeficiente de seguridad frente a rotura adecuado, los tendones de cosido se inyectaron y los tacos de hormigón se armaron. En las últimas dovelas, y con el fin de no condicionar las dimensiones de la pila, se permitió un desequilibrio máximo de media dovela durante las labores de hormigonado.

La fijación provisional se hizo mediante un esquema clásico de dejar unos tubos metálicos curvos en el capitel de la pila. Una

vez completada la dovela cero, se enfilaron los tendones de atado desde la parte superior del tablero. Este esquema evita dejar unos tendones con una altura semejante al canto del tablero, anclados en el capitel de las pilas, cuya estabilidad durante la construcción de la dovela cero resulta problemática.

Una vez el núcleo del tablero alcanzó una configuración estable, se procedió al corte de los tacos y tendones de cosido mediante hilo de diamante. Gracias a que el corte del empostramiento provisional se produce una vez el tablero es estable, es decir, sin dejar que transcurra tiempo para que los fenómenos de retracción y fluencia actúen, el momento en dicho empostramiento es reducido. Por dicho motivo, y gracias también al armado de los tacos, el corte se produjo fácilmente, sin brusquedades ni aparición de pequeños daños locales. Esta operación se realizó sin la ayuda de gatos o de cajas de arena. Cabe resaltar que en esta etapa la reacción vertical no alcanza ni la mitad del valor máximo para el cual están dimensionados los apoyos, con lo que la transferencia de la reacción vertical del taco al apoyo se produce sin problemas.

7.2. Pilas del viaducto de acceso

En los ramales de acceso, debido a su curvatura en planta y al escaso espacio disponible, las pilas son de sección circular maciza de 2,10 m de diámetro, con 4 ranuras que las estilizan (fig. 28).

7.3. Pilas de la zona de transición

Por su parte, la zona de transición se apoya en la pila 0 del viaducto principal y en 3 pilas prismáticas casi rectangulares con paramentos redondeados, que sirven de transición entre las formas de las pilas del viaducto principal y las pilas de los ramales de acceso. Sus dimensiones exteriores son de $2,20 \times 4,40$ m

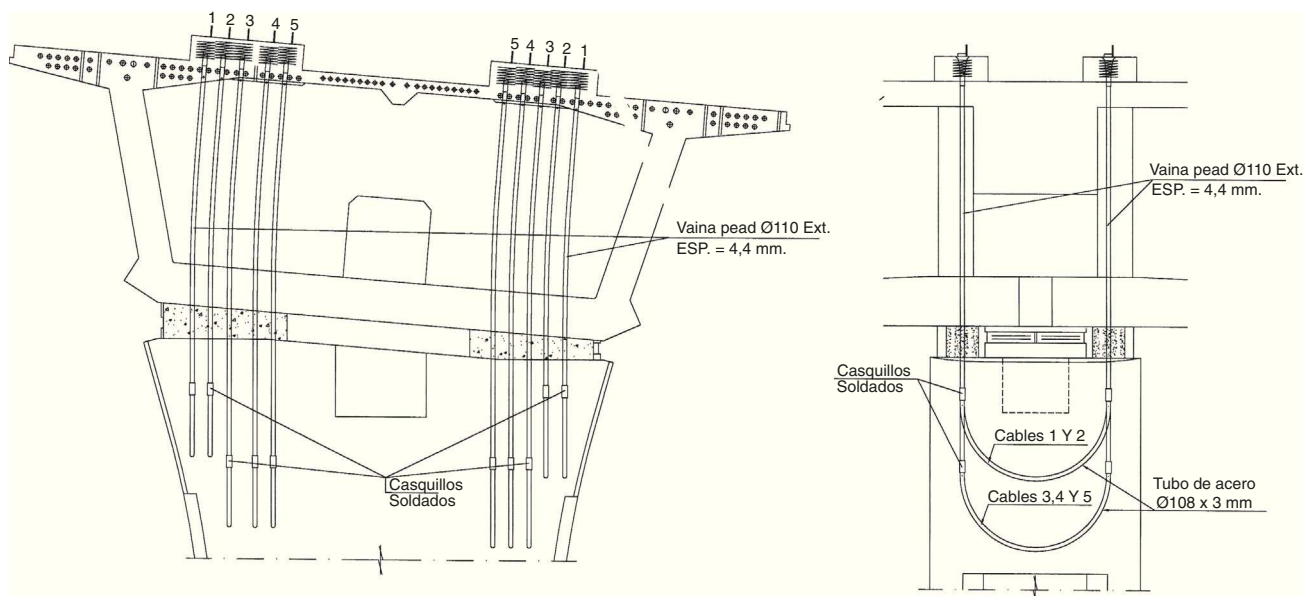


Figura 27. Anclaje provisional en cabeza de pilas.



Figura 28. Pilas de los ramales de acceso.



Figura 31. Vista de los estribos de los ramales de acceso.

(fig. 29). Todas las pilas de los vanos de acceso y zona de transición tienen cimentación directa.



Figura 29. Pilas de la zona de transición.

8. Estribos

El tablero principal descansa en su inicio en la pila 0, donde se dispone la junta de calzada con la zona de transición. En el otro extremo se apoya en el estribo 2 (fig. 30). Dicho estribo es un cargadero de grandes dimensiones que se apoya en 10 pilotes de 2,00 m de diámetro, que deben atravesar un relleno de nueva formación de 30 m de profundidad, ejecutado con el material extraído de los túneles de la VSM.

Dicho relleno tiene una gran variación de espesor en dirección transversal, lo cual ha motivado un detallado análisis en fase de proyecto para ver la evolución de sus movimientos transversales a lo largo del tiempo. Dicho análisis se realizó con y sin la consideración de los pilotes del cargadero. Del cálculo se dedujo la previsión de movimientos transversales de hasta 0,10 m en la parte superior del relleno contigua al cargadero. Es por ello que los pilotes del estribo 2 están fuertemente armados. Además, y con el fin de independizar en gran medida el funcionamiento del tablero de los movimientos del relleno, se han dispuesto apoyos de neopreno de gran espesor sobre el estribo 2. Por último, se dejaron inclinómetros con el fin de tener una medición a lo largo de los años de los movimientos longitudinales y transversales

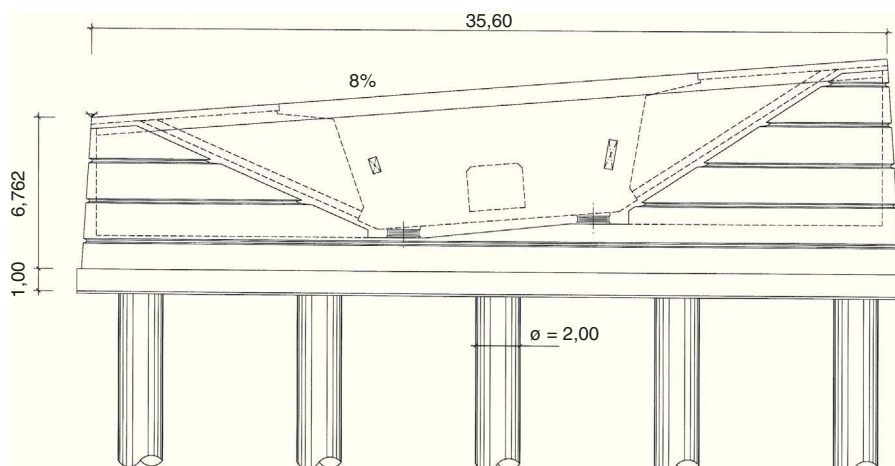


Figura 30. Alzado del estribo 2.

del relleno. Hasta el momento, dichos movimientos están dentro de los valores previstos.

En el viaducto de acceso, los estribos, así como los muros del enlace, tienen unos paramentos inclinados con unas ranuras horizontales y con sus esquinas redondeadas al igual que las pilas principales, con el fin de conseguir una sensación de unidad formal (fig. 31).

9. Conclusiones

El viaducto de Trapagaran se caracteriza por la gran anchura del tablero. Se trata de una construcción singular por sus dimensiones y por las formas de los elementos estructurales que ofrecen una visión grata al observador. El estudio conjunto del diseño y del proceso constructivo en fase de proyecto ha repercutido en la realización de la obra en un espacio de tiempo extraordinariamente corto.

Cuantías

Viaducto principal:	
• Hormigón HP-50:	0,85 m ³ /m ²
• Acero activo longitudinal:	32,2 kg/m ²
• Acero activo transversal:	3,65 kg/m ²
• Acero pasivo:	181 kg/m ³
Viaducto zona de transición:	
• Hormigón:	1,06 m ³ /m ²
• Acero activo:	32,9 kg/m ²
• Acero pasivo:	240 kg/m ³
Viaducto de acceso:	
• Acero estructural S-355 J2G3:	265 kg/m ²

Relación de participantes

Propiedad	Diputación Foral de Bizkaia. Interbiak
Dirección de obra	
Director:	Íñigo Berriozábal Bilbao (Ingeniero de Caminos)
Ayudante Dirección:	Asensio Fernández (Ingeniero Técnico de Obras Públicas)
Asistencia técnica	
Empresa:	Prointec-Euskontrol-Eipsa

Jefe de Unidad:	Alex Ugalde (Prointec) (Ingeniero de Caminos). Roberto Martínez (Prointec) (Ingeniero de Caminos). Alex Ugalde (Prointec) (Ingeniero de Caminos). Roberto Martínez (Prointec) (Ingeniero de Caminos)
-----------------	--

Proyecto	
Empresa:	Prointec-Euskontrol-Eipsa
Autor:	Jordi Revoltós Fort (Ingeniero de Caminos)

Empresa constructora

Viaducto principal, Zona de transición y ramales B, C y D	
UTE Trapagaran:	Sobrino-Cycasa-Fonorte-Urssa
Gerente:	Jesús María Cruz Fernández (Sobrino) (Ingeniero de Caminos)
Jefe de obra:	Miguel Moreno Díaz (Cycasa) (Ingeniero de Caminos)
Ramal A:	
UTE Galindo:	Otaduy, Construcciones Murias, Pavisia

Empresas subcontratistas

Sistema de pretensado:	Freyssinet
Taller metálico:	URSSA. ASCAMON (Ramal A)
Ejecución de tablero:	Construgomes
Cimbra zona transición:	RMD
Encofrado dovela cero:	ULMA

Presupuesto:	
Presupuesto de ejecución por contrata del tramo IIIA:	53,0 millones de euros
Presupuesto de ejecución material del viaducto:	31,7 millones de euros
Plazo de ejecución:	
32 meses (de febrero de 2008 a septiembre de 2010)	

Bibliografía

- [1] J.A. Jaques Llombart, J. Revoltós Fort, J. Fernández, Viaducto sobre el Río Ebro en el Cuarto Cinturón de Zaragoza, *Hormigón y Acero* 256 (2009) 41–58.
- [2] R. Villegas Gómez, M.J. Prieto Pantaleón, R. Revilla Angulo, P. Olazábal Herrero, *Viaducto de Montabliz, Hormigón y Acero* 248 (2008) 9–40.
- [3] Menn, C. *Prestressed Concrete Bridges* (1990 Birkhäuser Verlag AG Basel), ISBN 3-7643-2414-7 p. 299 Felsenau Bridge.
- [4] Leonhardt, F. *Brücken/Bridges* (4th edition), Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart (Germany), ISBN 3421025908, 1994; pp. 188-190 Kochertal.