

Nueva Pila del Acueducto PSA 101 sobre la AP-68 en Bilbao.

New Pier for the Bridge-Aqueduct PSA 101 over AP-68 Highway in Bilbao

Gonzalo Zarrabeitia Ullibarri ^a, Francisco Javier Gómez Corral ^b

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. IDOM. gonzalo.zarrabeitia@idom.com

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. IDOM. fgomez@idom.com

RESUMEN

La nueva pila del acueducto sobre la AP-68 consiste en una estructura mixta de sección cajón de ancho variable y altura 8.50 metros, empotrada en un pedestal de hormigón postesado de 5.50 de metros de altura. La geometría de la estructura, con forma de L invertida, está condicionada por el gálibo admisible y por la posición del eje de apoyos del tablero. La excentricidad resultante entre el punto de apoyo bajo el tablero y la conexión con el pedestal de hormigón es de 7.50 metros, lo que supone un hito para este tipo de actuaciones. En el artículo se describe en detalle tanto las características de esta estructura como el innovador proceso constructivo y de transferencia de cargas realizado.

ABSTRACT

The new pier consists on a composite box section of 8.50 meters height, embedded in a posttensioned concrete base pile of 5.00 meters high. The new structure has an inverted L-shaped and tilts to maintain the current supporting axis, minimizing the efforts on the new pier and guaranteeing the admissible clearance gauge. The resulting eccentricity between the support bearings and the lower connection with the concrete pedestal is 7.50 meters. According to the information we have, it is the load transfer with a greater eccentricity executed to date. The article describes in detail the characteristics of this structure as well as the innovative construction and load transfer process carried out.

PALABRAS CLAVE: Pila, estructura metálica, transferencia de cargas, excentricidad, instrumentación.

KEYWORDS: Pier, steel structure, Load Transfer, Eccentricity, instrumentation.

1. Introducción

Una vez iniciadas las obras de la Variante Sur Metropolitana de Bilbao, se replantearon dos condicionantes fundamentales en la zona del enlace de Venta Alta.

Por un lado, desde la redacción del Proyecto vigente se modificaron las condiciones de explotación, prohibiendo la circulación de vehículos pesados por la A-8 en el entorno de Bilbao.

Por otra parte, la previsible cesión de la explotación de la autopista y la evolución en las

tecnologías del control y peaje, permitían prescindir del área de identificación previsto en Fase II.

Al desaparecer estos dos condicionantes, se podría reducir de forma considerable la longitud del nuevo eje y la zona de ampliación de plataforma de la AP 68, desplazando el trazado hacia el sur (Figura 1).

Como consecuencia del nuevo trazado se incidía sobre la pila del paso superior/acueducto que soporta la plataforma de la carretera Bilbao-

Arrigorriaga BI-3723, por lo que era necesario diseñar una nueva estructura, así como la propia transferencia de cargas.

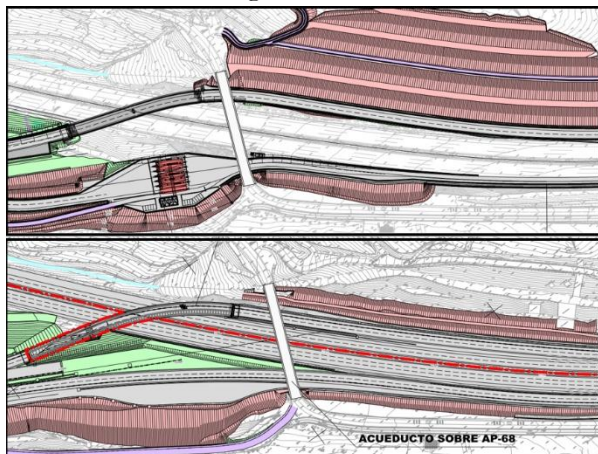


Figura 1. Proyecto original (imagen superior) vs Proyecto Modificado (imagen inferior)

2. Descripción del paso superior-acueducto existente sobre la AP-68.

En primer lugar, se analizó exhaustivamente el paso superior. Este acueducto fue proyectado y construido a finales de los años 70 en el ámbito de las obras de la Autopista Vasco Aragonesa (AVASA).

Se trata de una estructura que cruza la autopista a unos 20 m de altura, con una plataforma de 10 m de anchura repartida en 8.0 m de calzada y dos aceras de servicio de 1.0 m cada una. También se utiliza como acueducto, soportando en su interior dos conductos de abastecimiento de 1800 mm de diámetro, propiedad del Consorcio de Aguas de Bilbao y Bizkaia (CABB).

El tablero consiste en una sección cajón monocelular de hormigón postesado, de 3.00 m de canto y 7.20 m de anchura. El vano central tiene una longitud de 50.0 m y los vanos de compensación 25.0 m los cuales se prolongan en voladizo 6.0 m más en los apoyos extremos (Figura 2).

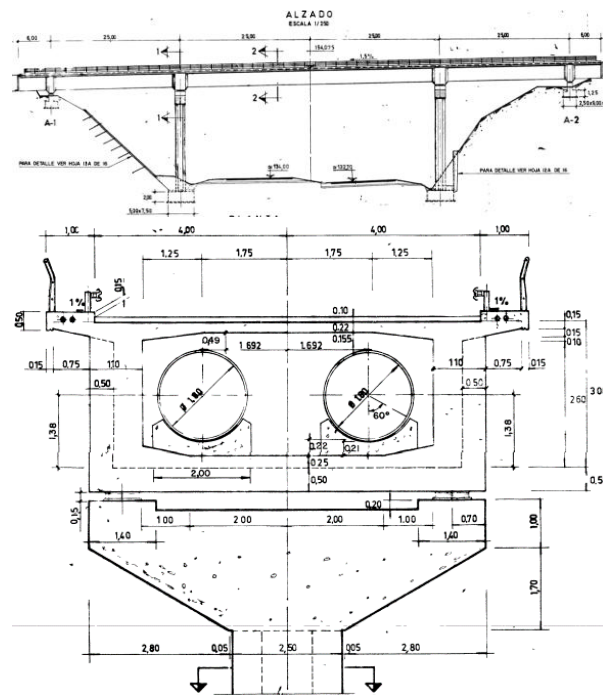


Figura 2. Alzado y sección transversal del acueducto.

Las dos pilas interiores son pilas martillo de fuste de sección octogonal regular de 1.036 m de lado, y un dintel de 8.20 m de longitud y 2.70 m de canto. La cimentación de las pilas es directa mediante zapatas de 7.5 x 5.0 m² y 2.0 m de canto. La altura máxima de las pilas interiores es 22.24 m. En los extremos el tablero se apoya en unas reducidas pilas tabique, de altura variable entre 2.75 m en el apoyo Norte y 4.25 m en el apoyo Sur.

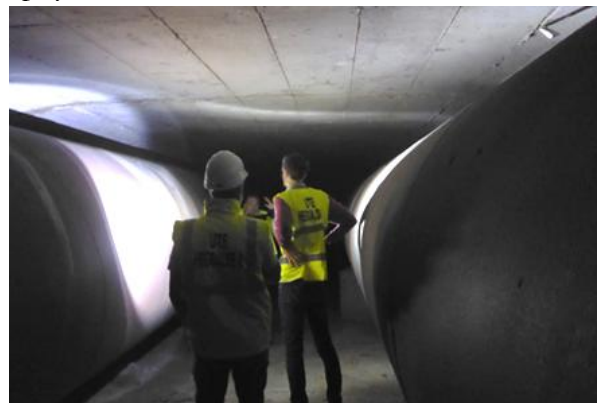


Figura 3. Interior de la sección cajón del acueducto y tuberías de 1800 mm de diámetro.

La vinculación del dintel con la subestructura se produce mediante dos rotulas de hormigón en el Apoyo 1 situado al Norte, constituyendo a su vez el punto fijo de la estructura frente a movimientos longitudinales.

En el resto existen dos aparatos de apoyo tipo POT guiados por apoyo, dimensionados para una carga máxima en servicio de 750T en las pilas interiores y 250T en el apoyo extremo situado al Sur.

En el número 130 de la revista Hormigón y Acero [1] se incluye un artículo sobre este y otros pasos superiores realizados sobre la autopista Bilbao-Zaragoza.

3. Descripción de la nueva estructura-transferencia de pila.

La solución finalmente escogida consistía en una estructura mixta de sección cajón variable y altura 8.50 metros empotrada en una pila cáliz de hormigón de 5.00 metros de altura.

La premisa fundamental de esta actuación era mantener invariable el eje de apoyos original del acueducto, no afectando de esta forma a su configuración actual. Por ello, la estructura mixta de la nueva pila tiene forma de L invertida y se inclina para mantener el eje de apoyos actual minimizando los esfuerzos sobre la nueva pila y garantizando el gálibo admisible. Creemos que con esta solución se consigue el efecto buscado en el que la pila recoge la estructura del tablero soportándolo y no dejándolo caer a pesar de la demolición del apoyo original del acueducto (Figura 4 y Figura 5).



Figura 4. Vista lateral de la pila

La excentricidad resultante entre el punto de apoyo bajo el tablero y la conexión con el pedestal de hormigón es de 7.50 metros, generando mayores esfuerzos y sollicitaciones en esta nueva pila que los soportados actualmente

por el propio tablero del acueducto. Según la información de que disponemos, se trata de la transferencia de cargas con mayor excentricidad ejecutada hasta la fecha.



Figura 5. trasera de la estructura

La sección transversal es variable, siendo en arranque un fuste único de sección cajón de 3.50 m de ancho y 2.50 m de canto que se abre en dos brazos que se unen por una viga transversal metálica que rigidiza el conjunto. Sobre dichos brazos, de 1.10 m de ancho y canto variable entre 1.00 m y 1.75 m, se disponen los apoyos definitivos, ubicados en la misma posición y por lo tanto manteniendo la configuración actual del acueducto. Los espesores de las chapas principales delanteras y traseras varían desde 40 a 85 mm (Figura 6).

La pila cáliz de hormigón postesado que empotra la estructura mixta superior es de sección constante y forma hexagonal. Las dimensiones máximas son 4.85 m x 5.60 m en planta y 5 m de altura. Consta de 54 barras de pretensado de diámetro 40 mm y acero Y1050H. Dichas barras de postesado se anclan en un recrido inferior de la zapata, para no interferir con la armadura principal de la misma y favorecer la introducción y distribución de la acción del postesado.

Además de las particularidades de la propia estructura y de tratarse de una actuación sobre un acueducto por el que discurren dos tuberías, es muy destacable el proceso adoptado para la maniobra de transferencia de cargas entre la pila a demoler y la nueva estructura.



Figura 6. Detalle de encuentro de chapas

El objetivo era conseguir que la nueva estructura metálica y futura pila fuera capaz de soportar el tablero en una fase inicial y temporal y de esta forma conseguir demoler la parte superior del capitel de la pila original sin necesidad de apeos ni estructuras adicionales. Una vez demolido, se montaría la parte final de la nueva estructura y se completaría la transferencia de cargas.

Para ello, en una primera fase se gatea el tablero apoyándonos en la nueva estructura en puntos ubicados a 2.50 metros del eje de apoyos actual. Posteriormente, se demuele la pila original del acueducto y se finaliza la ejecución de la nueva estructura instalando la última dovela metálica y transfiriendo nuevamente las cargas al eje de apoyos original. En los siguientes apartados se describe en detalle el proceso constructivo y la maniobra de transferencia de cargas.

4. Dimensionamiento. Modelos de cálculo.

En primer lugar, se realizó un modelo pórtico 3D del acueducto realizándose las comprobaciones estructurales del tablero según la normativa vigente [2].

Posteriormente, se modelizó la secuencia constructiva de la transferencia de pila para analizar su influencia en el estado tensional del tablero y a su vez obtener las reacciones existentes en cada fase y los desplazamientos esperados. De la misma forma, se comprobó nuevamente el tablero del acueducto en situación final al modificarse la rigidez de la pila 1 y cambiar los esfuerzos frente a sobrecargas y acciones variables (Figura 7).

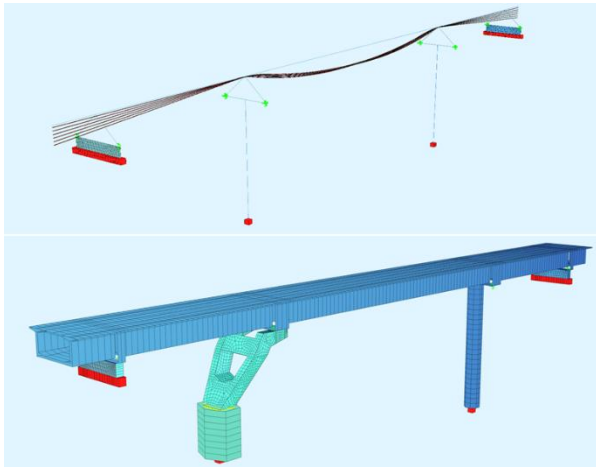


Figura 7. Ejemplos de modelos longitudinales analizados

Para el dimensionamiento de la pila se analizaron diferentes modelos de cálculo. En primer lugar, se realizó un modelo de placas 3D de la pila donde se introducen las reacciones obtenidas previamente en el modelo pórtico 3D del acueducto, dimensionando las chapas de la estructura metálica. Adicionalmente, se realizó un modelo de viga de donde se obtuvieron los esfuerzos para realizar las comprobaciones de RPX-EC [3] [5] [6] a partir de hojas de cálculo específicas.

Para el dimensionamiento de la conexión estructura metálica-pedestal se incluyó la geometría de esta conexión en el modelo de placas de la pila. Tanto los conectores como los pernos de anclaje de la placa base se modelizaron como muelles no lineales con una carga máxima igual al límite elástico y se realizó un análisis no lineal de las distintas combinaciones de acciones. A partir de los resultados de tensiones en las chapas y de esfuerzos en los conectores se comprobó la validez de la solución estructural [3] [5] [6] (Figura 8).

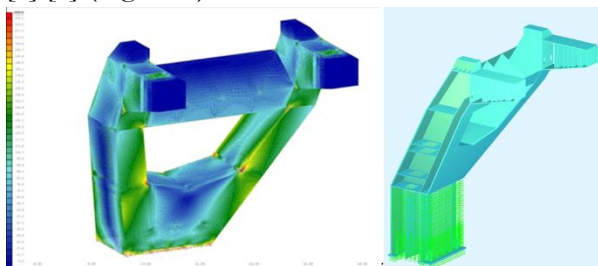


Figura 8. Modelos 3D de placas de la estructura de la pila

Para el dimensionamiento del pedestal de hormigón, se obtuvieron los esfuerzos del modelo de cálculo de Sofistik y se realizaron las comprobaciones seccionales con el programa FAGUS [4] [7].

El análisis de la cimentación se realizó mediante modelos no-lineales con el software Sofistik, permitiendo el despegue de la zapata, lo que nos permitía comprobar automáticamente la seguridad de la cimentación frente al deslizamiento o al vuelco. A partir de dichos análisis y de los esfuerzos obtenidos se dimensionó la armadura necesaria, comprobando que las tensiones obtenidas bajo la cimentación eran inferiores a los valores admisibles [8].

5. Instrumentación y monitorización en continuo.

Durante el diseño de la estructura se decidió instalar una serie de sensores que permitieran conocer el estado tensional de la nueva pila. Parte de esta instrumentación se mantendría durante la fase de explotación, mientras que otros sensores únicamente se instalaron para controlar las maniobras de transferencia de cargas.

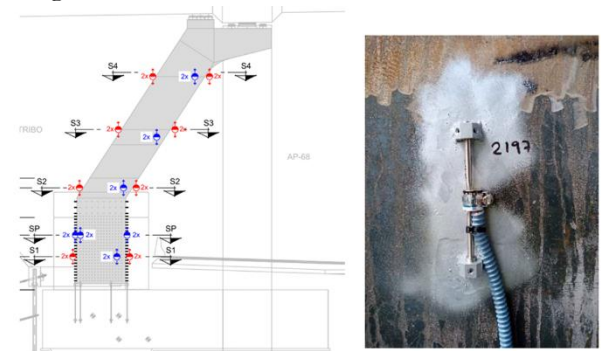


Figura 9. Secciones de control y ejemplo de galga instalada.

En concreto, se establecieron cinco secciones de control en la estructura, donde se instalaron galgas de control tensional (Figura 9). Una de las secciones estaba ubicada en el pedestal de hormigón y bajo los anclajes superiores de las barras de pretensado para

conocer el estado tensional del hormigón. El resto, se dispusieron en la estructura metálica y mixta de la pila, tanto en las chapas delanteras (compresión) como traseras (tracción). También se colocaron clinómetros en la parte superior trasera de la estructura para controlar en todo momento las deformaciones y giros de la pila.

El resto de la instrumentación, instalada únicamente durante las maniobras de transferencia, consistió en extensómetros de hilo vertical. Se establecieron 3 líneas de extensómetros que medían los desplazamientos del tablero y de la pila metálica. Dos de los extensómetros proporcionaban valores de desplazamientos en el acueducto, tanto en el primer vano como en el eje de apoyos de la pila original, mientras que un tercer extensómetro registraba los desplazamientos relativos entre acueducto y pila en el punto de gateo del tablero de Fase 1.

6. Proceso constructivo

6.1 Ejecución cimentación

En primer lugar, se realizó la excavación necesaria para la ejecución de la cimentación, la cual apoyaba parcialmente sobre la zapata de la pila original. Primero se excavó hasta roca en la parte delantera y rellenó con hormigón ciclópeo hasta cota de cimentación.

Para la parte trasera se excavó parcialmente el talud trasero, sosteniéndolo mediante un sistema de hormigón proyectado y anclajes activos de cable. Los últimos 5 metros de excavación se realizó con ayuda de una pantalla de micropilotes anclada.

Las dimensiones de la zapata eran de 14.60x9.00 m en planta y 3 m de canto, envolviendo parcialmente el fuste de la pila original. Primero se colocaron las vainas y barras de pretensado que se anclaban en un rehundido ejecutado en la parte trasera de la zapata y posteriormente continuaron las labores de armado (Figura 10).



Figura 10. Trabajos de armado y hormigonado de la zapata

6.2 Instalación dovela 1 y ejecución pedestal de hormigón.

Una vez ejecutada la cimentación, se procedió con el montaje de la primera dovela de la estructura de la pila. Para ello, se descargó en obra y guiándose con unos carriles apoyados en el suelo y unos gatos manuales se posicionó enfrentada a la pila. Con ayuda de un útil y dos grúas colocadas a ambos lados del acueducto se elevó y colocó en posición (Figura 11).



Figura 11. Montaje de dovela 1

Una vez instalada la primera pieza metálica, continuaron las labores de armado del pedestal. En una primera fase se hormigonó hasta la cota de anclaje de las barras de pretensado vertical. Posteriormente se tesaron las barras siguiendo la secuencia establecida en planos y se continuó con los trabajos de armado y hormigonado de la parte restante.

6.2 Instalación dovelas 2-3-4

Para la instalación de las siguientes dovelas el proceso seguido fue similar. La dovela 2, pieza de transición entre la base y los brazos de la futura pila, se instaló de noche utilizando los mismos útiles que para la primera pieza (Figura 12).

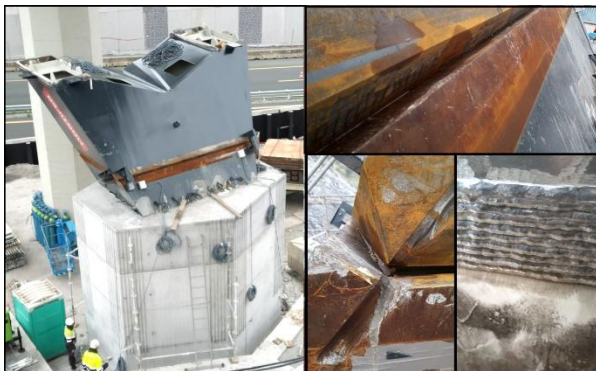


Figura 12. Montaje de dovela 2. Espesores de chapa y uniones soldadas

La dovela 3, que consistía en los dos brazos delanteros, se instaló sin parte de las chapas traseras para poder acceder al interior de la estructura y realizar las soldaduras interiores. Finalmente, para la colocación de la última dovela antes de la transferencia de cargas, se siguió un procedimiento similar al de la dovela inicial, utilizando unos útiles soldados a la pieza y dos grúas ubicadas a ambos lados del acueducto.

Antes del inicio del montaje de cada pieza, se ensayó y comprobó el 100% de las soldaduras ejecutadas en obra mediante técnicas de ultrasonidos y partículas magnéticas. Una vez ejecutada la estructura en esta primera fase, ya se podían iniciar los trabajos de instalación del sistema de gateo para la primera maniobra de transferencia de cargas.

7. Maniobra de Transferencia de cargas. Fase 1

Para el procedimiento de transferencia de cargas y la posterior demolición de la pila original (Fase 1 de transferencia), el acueducto se debía apoyar en la nueva estructura metálica, en sendos puntos situados a 2.50 metros del eje de apoyos actual.

El sistema de gateo se instaló directamente sobre la meseta de la pila metálica y consistía en dos gatos de 560 Tn por cada alma. Los gatos se colocaron en posición invertida, de tal forma que el cabezal basculante se adaptaba al plano de giro de la pila. Así se conseguía que durante la

maniobra, la zona de contacto del gato con el sistema deslizante ubicado en el fondo del tablero estuviera en un plano horizontal, permitiendo el desplazamiento relativo entre tablero y pila (Figura 13).



Figura 13. Dovela 4 con gatos de Fase 1 instalados

El control de la maniobra se realizó con un sistema de izado sincronizado que permitía controlar la descompensación máxima en altura entre los gatos con precisión de 1mm. Para la realización de la transferencia de cargas se solicitó al Consorcio de Aguas de Bilbao-Bizkaia (CABB) que ambos conductos estuvieran llenos de agua a fin de obtener una reacción similar en ambos apoyos. Dado el grado de sensibilidad del sistema sincronizado de izado también se optó por cortar la circulación por el acueducto durante la ejecución de la maniobra.

La maniobra se realizó con escalones de carga de 100 bar, equivalente a una reacción de 1600 kN por alma. En cada escalón se tomaron lecturas manuales con topografía que se comparaban con la lectura en continuo de la instrumentación y los datos del sistema de izado. La carga estimada total para el levantamiento del tablero y descarga de la pila original eran 6500 kN/alma. Finalmente, el tablero despegó en el cuarto escalón de carga con una reacción en los gatos de 6385 kN/alma. Una vez despegado el tablero se incrementó la presión hasta 420 bar y se procedió a bloquear los gatos.

Durante toda la maniobra, los desplazamientos y tensiones medidos en la estructura coincidieron con los valores esperados y obtenidos con los modelos de cálculo. En situación final se registraron unos movimientos definitivos de 18 mm en el extensómetro 3 (desplazamiento vertical relativo entre tablero y pila en el punto de gateo) y de 4 mm en el extensómetro 2 (ubicado en el tablero

en eje de apoyos y por lo tanto correspondiente al levantamiento del tablero en ese punto).

Las lecturas topográficas corroboraron estos datos, leyendo desplazamientos máximos en la pila de 15 mm en vertical y 22 mm en horizontal. Los valores de deformación estimados en los modelos de cálculo de la pila eran de 15.6 mm en vertical y 23.8 mm en horizontal. Por lo tanto, la estructura se comportó como estaba previsto.

Del mismo modo, las galgas ubicadas en las distintas secciones de la pila metálica leyeron valores similares a los calculados en los modelos numéricos, obteniendo diferencias del orden del 5%.

8. Demolición de pila e instalación de dovela 5

Finalizada la maniobra de transferencia y garantizada la ausencia de reacciones bajo los apoyos, comenzaron los trabajos previos de corte para la extracción de los aparatos de apoyo.

Una vez retirados los apoyos y conseguido el espacio necesario entre pila y fondo del tablero, se cortó el fuste con hilo de diamante y con ayuda de un útil específico y dos grúas ubicadas a ambos lados del acueducto, se retiró el capitel de la pila original (Figura 14). De esta forma, mientras se terminaba de demoler el resto de la pila original ya podía comenzarse con la instalación de la dovela 5, última pieza de la estructura metálica de la pila.



Figura 14. Retirada del dintel de la pila original

Para el montaje de esta última dovela se siguió el procedimiento habitual, elevando los

dos brazos con dos grúas ubicadas a ambos lados del acueducto.

8. Maniobra de Transferencia de cargas. Fase 2.

La maniobra de transferencia de Fase 2 constaba de dos operaciones.

En la primera de ellas, denominada Fase 2.1, se transfería la carga de los gatos de Fase 1 a un juego de gatos ubicados a ambos lados de los aparatos de apoyo (Figura 15). En total, se colocaron 4 gatos de 400 tn por alma, de tal forma que la reacción final quedara centrada en el eje de apoyos definitivo y así se evitaran desplazamientos adicionales durante la puesta en carga de los aparatos de apoyo definitivos.

Al igual que en la primera maniobra, se utilizó un sistema sincronizado de izado y los gatos se colocaron en posición invertida ubicando el sistema deslizante en el contacto superior con el fondo del tablero.



Figura 15. Ubicación de gatos para la Fase de Transferencia 2.1

El procedimiento de transferencia se inició con escalones de 100 bar (equivalente a unos 1600 kN de reacción por alma). Con una presión de 250 bar (4000 kN/alma) los gatos de Fase 1 ya estaban prácticamente descargados. En este momento se decidió continuar la maniobra hasta alcanzar un desplazamiento en los gatos de Fase 2 de 27 mm para garantizar la transferencia total de cargas y conseguir el espacio suficiente para la instalación de los apoyos definitivos.

En esta situación final se registraron unos movimientos de 10 mm en el extensómetro 3

ubicado en la meseta de la pila. Las lecturas topográficas leyeron desplazamientos verticales en la pila de 22 mm, coincidiendo de nuevo con los valores estimados según los modelos de cálculo, 23 mm en vertical y 17 mm en horizontal.

A nivel tensional, se registraron una vez más valores similares a los obtenidos en los modelos de cálculo. En concreto, en la sección 4 superior se midió una tensión de 105 MPa frente a 110 MPa de tensión media esperada.

Posteriormente se colocaron en posición los aparatos de apoyo, que consistían en aparatos tipo POT esféricos. El espacio entre la chapa superior del apoyo y el tablero inferior se saneó y se inyectó con resina para garantizar el contacto y la ausencia de aire ocluido.



Figura 16. Gatos y aparato de apoyo para la Fase de transferencia 2.2

Por último, ya sólo quedaba realizar la última maniobra de transferencia, que consistía en una descarga controlada de los gatos de Fase 2.1 y la puesta en carga de los aparatos de apoyo definitivos (Figura 16). En los primeros escalones de descarga se apreciaron descensos del tablero del orden de 2 mm, debidos a un reajuste sobre los aparatos de apoyo, no registrándose ningún movimiento en la estructura de la pila.

8. Prueba de carga.

La Prueba de Carga estática constó de dos etapas. En la primera de ellas se cargaba un

lateral del tablero con dos camiones de 26 tn (Etapa 1. Fase 1) y posteriormente se añadían dos más (Etapa 1. Fase 2), resultando cuatro camiones en una mitad del tablero. En la segunda etapa se realizaba la misma operación en la otra mitad, dejando la pila cargada con 8 camiones (Figura 17).



Figura 17. Prueba de Carga_Etapa 2

Los desplazamientos máximos medidos en la pila fueron del orden de 5 mm tanto en horizontal como en vertical. En el acueducto se obtuvieron desplazamientos de 3 mm en el centro de vano principal. En las lecturas realizadas a las 24 h tras la finalización de la prueba de carga, se observó que el acueducto había recuperado por completo su geometría inicial. Adicionalmente, se realizó una prueba de carga dinámica con el paso de un camión de 26 tn a velocidad constante

A partir de los acelerómetros colocados en el acueducto se obtuvieron las siguientes frecuencias principales: 3.61 Hz, 5.04 Hz, 5.51 Hz, 6.62 Hz, 6.94 Hz, 9.2 Hz, mientras que en la prueba dinámica previa a la transferencia de pila los valores calculados fueron: 3.62 Hz, 6.60 Hz, 7.05 Hz, 7.31 Hz, 8.03 Hz, 8.18 Hz.

Es decir, los resultados de la prueba de carga dinámica proporcionaron valores de frecuencias principales de vibración del tablero similares a las obtenidas en la situación original del acueducto. Por lo tanto, se puede concluir que se mantienen las condiciones de rigidez y funcionalidad previas a la transferencia de pila.

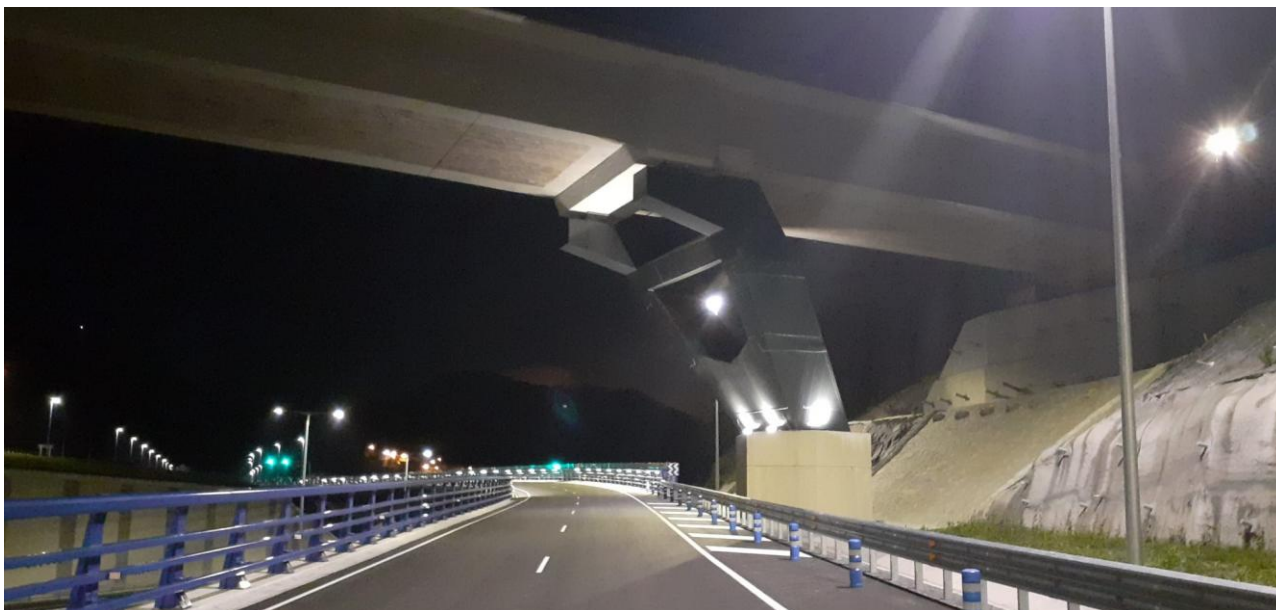


Figura 18. Vista nocturna de la estructura

8. Conclusiones.

Cuando se comenzó a estudiar cómo resolver esta actuación, se tuvo especial cuidado en que la afección sobre el acueducto fuera mínima.



Figura 19. Vista frontal

A su vez, se buscó diseñar una nueva estructura que además de integrarse bien en su entorno, condicionado tanto por los elementos existentes como por las nuevas estructuras que se estaban ejecutando, consiguiera transmitir los esfuerzos de una forma sencilla y natural.

A nuestro juicio, se ha conseguido un diseño orgánico, con formas puras y naturales donde cada uno de los elementos que conforman la estructura tiene un por qué. El especial cuidado con el que se ha tratado el

diseño y la ejecución de los detalles ha sido fundamental para conseguir el resultado final (Figuras 18 y 19).

Referencias

- [1] Siegrist, C. 591-2-152- Pasos superiores en la Autopista Bilbao-Zaragoza. Revista Hormigón y Acero nº130-131-132
- [2] IAP 98. Instrucción sobre las Acciones a Considerar en el Proyecto de Puentes de Carretera. Ministerio de Fomento. 1998
- [3] Recomendaciones para el proyecto de puentes mixtos de carreteras RPX-95. Ministerio de Fomento. Abril 2003.
- [4] Eurocódigo 2-UNE-EN-1992-1: Proyecto de estructuras de hormigón.
- [5] Eurocódigo 3-UNE-EN-1993-1: Proyecto de estructuras de acero
- [6] Eurocódigo 4-UNE-EN-10993-1: Proyecto de estructuras mixtas de acero y hormigón.
- [7] Instrucción de Hormigón Estructural. EHE 08. Ministerio de Fomento. 2008
- [8] Guía de cimentaciones en obras de carretera. Ministerio de Fomento. 2009