

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^a

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, IDOM

Recibido el 28 de diciembre de 2022; revisado el 13 de noviembre de 2023, aceptado el 20 de noviembre de 2023

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 galíbo 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.

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

©2024 Hormigón y Acero, la revista de la Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0)

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.

KEYWORDS: Aqueduct, pier, steel structure, load transfer, eccentricity, instrumentation.

©2024 Hormigón y Acero, the journal of the Spanish Association of Structural Engineering (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons (CC BY-NC-ND 4.0) License

* Persona de contacto / Corresponding author:

Correo-e / e-mail: gonzalo.zarrabeitia@idom.com (Gonzalo Zarrabeitia)

Cómo citar este artículo: Zarrabeitia, G., & Gómez, F. J. (2024). Nueva pila del acueducto PSA 101 sobre la AP-68 en Bilbao. *Hormigón y Acero*. 75(304):65-80 <https://doi.org/10.33586/hya.2023.3121>

1. INTRODUCCIÓN

Con posterioridad a la edición definitiva del proyecto de construcción del tramo 9B Bolintxu-Venta Alta de la fase I de la Variante Sur Metropolitana de Bilbao (VSM), y una vez iniciadas las obras, 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. Las únicas opciones para los tráficos con destino Cantabria eran optar por rutas alternativas de otros corredores o incorporarse a la fase I de la VSM. Por lo tanto, en estas condiciones de tráfico se podría prescindir de uno de los tres carriles de la AP 68, aspecto que fue consensuado con AVASA, empresa concesionaria de la autopista.

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), con muchas ventajas, como por ejemplo:

- Reducción de longitud de ramal y superficie pavimentada.
- Reducción de longitud y superficie total de muro.
- Reducción de anchura del paso inferior bajo la AP-68
- Eliminación casi completa del gran desmonte del nuevo eje.
- Mejora de las condiciones de trazado

Como consecuencia del nuevo trazado, al desplazarse este hacia el sur, 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.

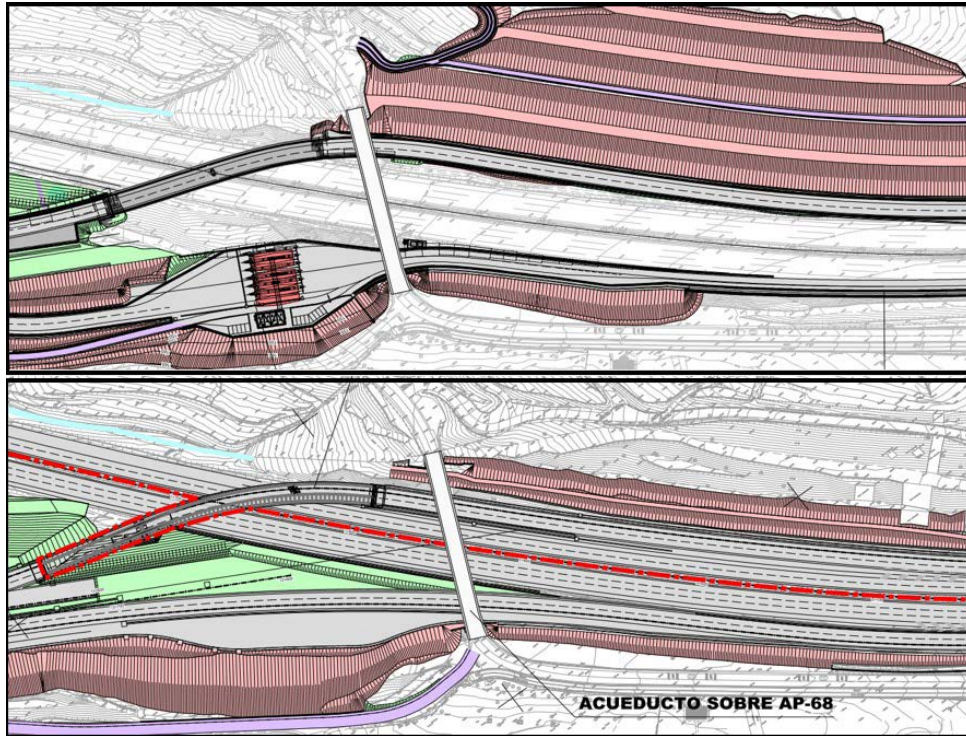


Figura 1. Solución del proyecto original (imagen superior) vs solución del proyecto modificado (imagen inferior).

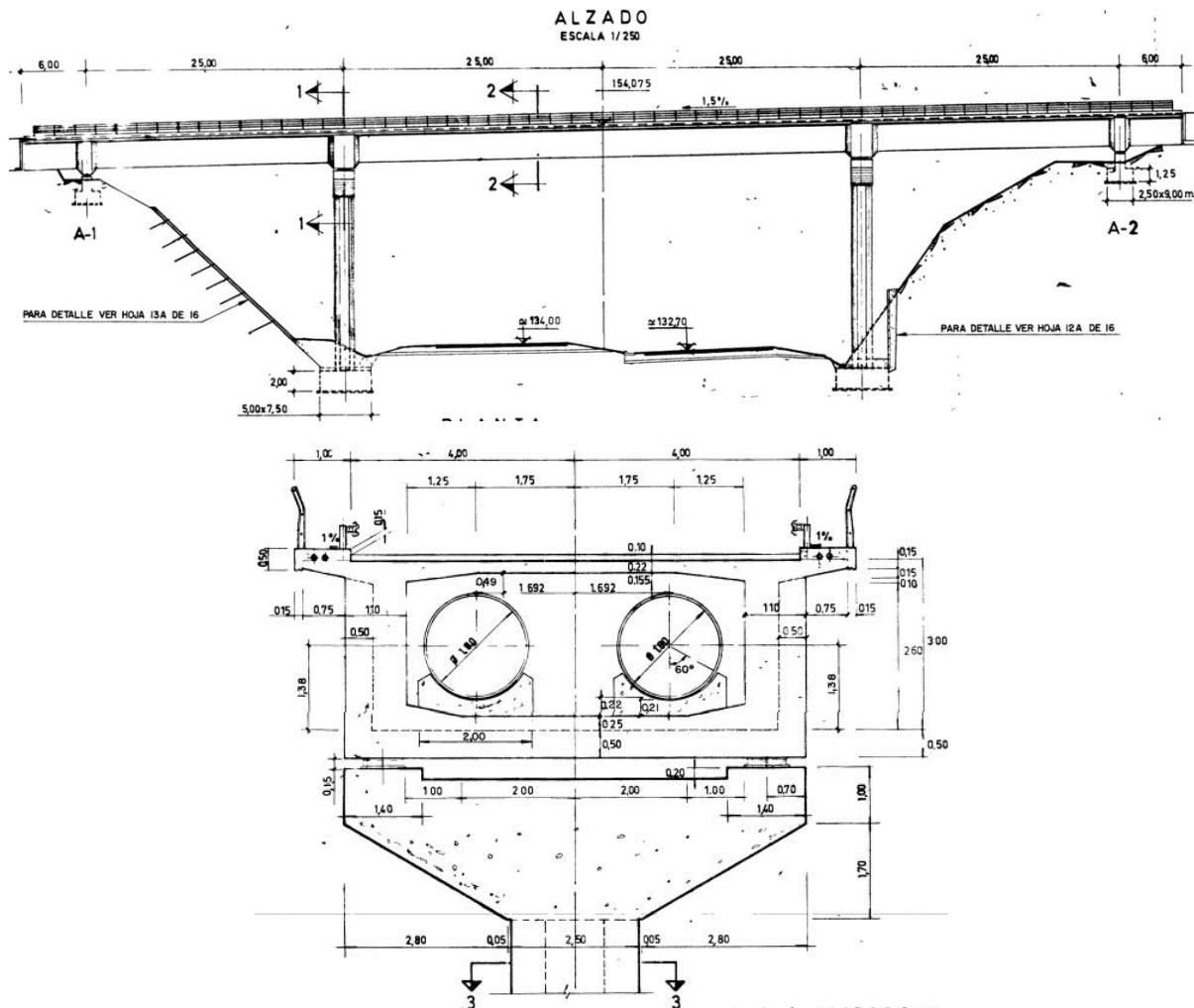


Figura 2. Alzado y sección transversal del acueducto. Planos originales.



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

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 1.800 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).

Las dimensiones de la sección cajón fueron determinadas por las condiciones de explotación de los conductos, garantizando el acceso al cajón y la posibilidad de reparación si fuese necesario (figura 3). Resulta por tanto una sección cajón de gran anchura en la cual las habituales riostras sobre apoyos se materializaron como un gran “marco de rigidez” hacia el exterior de la sección cajón.

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 m 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.

La vinculación del dintel con la subestructura se produce mediante dos rotulas plásticas 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

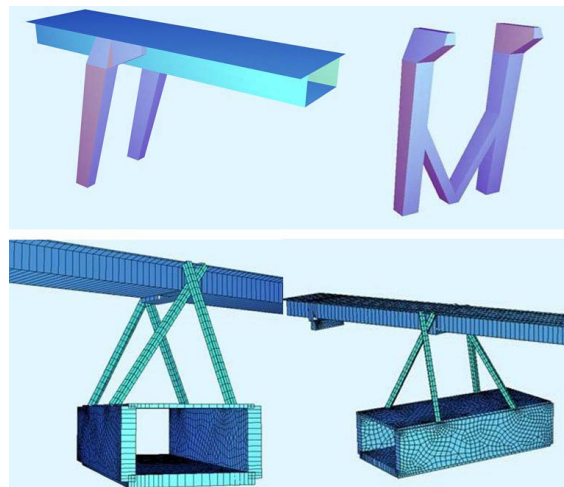


Figura 4. Alternativas estudiadas durante la fase de diseño.

una carga máxima en servicio de 750T en las pilas interiores y 250T en el apoyo extremo situado al sur del dintel.

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

Entre las distintas opciones estudiadas para la nueva pila se barajó un diseño basado en puntales metálicos que soportaban la estructura del acueducto apoyándose en ambos bordes del nuevo eje inferior (figura 4). Sin embargo, esta solución exigía la ejecución de parte de la fase II de la VSM, incrementando además la dificultad de ejecución de la maniobra de transferencia.

Por lo tanto se buscaron soluciones monofuste y de apoyo excéntrico que volaran por encima del vial inferior. A pesar de que se valoraron alternativas en hormigón armado-pretenso finalmente se optó por un diseño en estructura metálica-mixta, más apropiado tanto por su proceso constructivo como por el procedimiento de transferencia en dos fases diseñado para este caso.

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 de la acueducto (figura 5 y figura 6).



Figura 5. Vista lateral de la pila.



Figura 6. Vista trasera de la estructura.

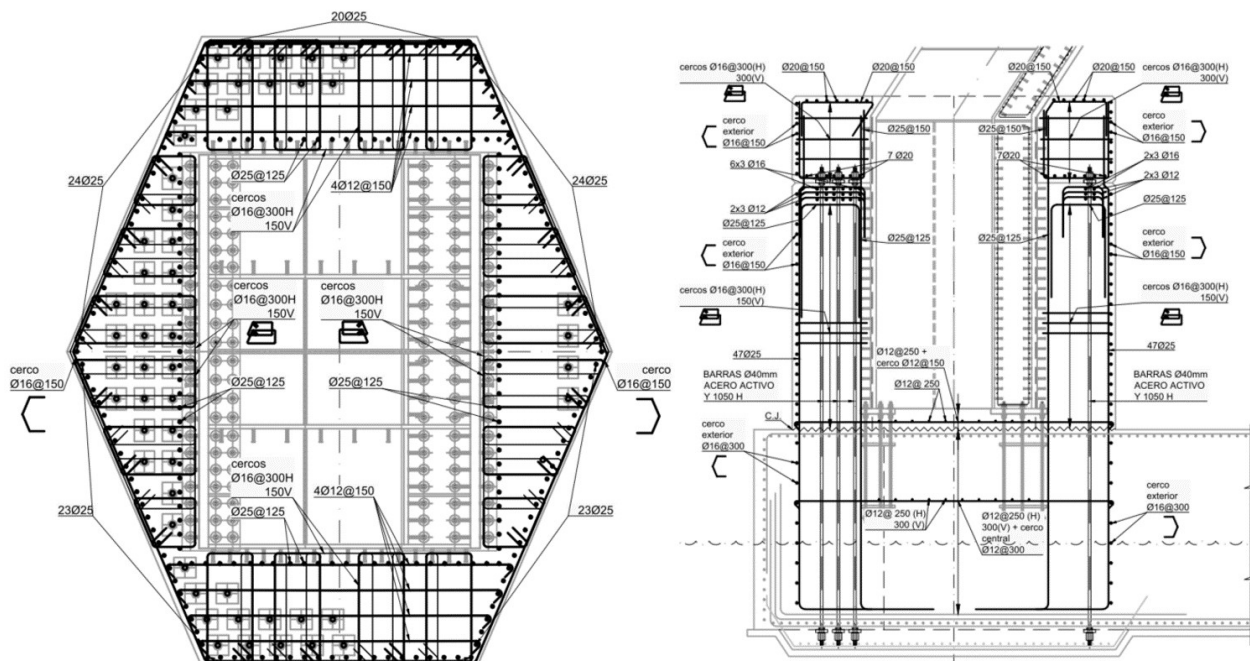
La excentricidad resultante entre el punto de apoyo bajo el tablero y la conexión con el pedestal de hormigón es de 7.50 metros, generando mayores esfuerzos y sollicitaciones en esta nueva pila que los soportados actualmente por el propio tablero del acueducto. Según la información de que disponemos, se trata de la transferencia de cargas con mayor excentricidad ejecutada hasta la fecha.

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 1.75 m y 1.00 m, se disponen los apoyos definitivos, ubicados en la misma posición y por lo tanto manteniendo la configuración actual del acueducto (figura 7). Los espesores de las chapas

principales delanteras y traseras varían desde 40 a 85 mm (figura 8).

La parte frontal de la sección cajón de la pila se rellena de hormigón para dotar a la estructura de mayor rigidez a flexión y minimizar las deformaciones. La conexión entre la sección metálica y el hormigón se realiza mediante conectores que garantizan el comportamiento de la sección como estructura mixta.

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 recrecido 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 (figura 9).

La cimentación consiste en una zapata de 9 m de ancho y variable entre 11.60 y 14.60 m de largo que se apoya sobre el terreno existente y sobre un macizo de hormigón ciclópeo, envolviendo al fuste de la pila original. El canto de la nueva zapata es de 3 metros.

Además de la 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.

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 origina 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 (figura 10). En los siguientes apartados se describe en detalle el proceso constructivo y la maniobra de transferencia de cargas.

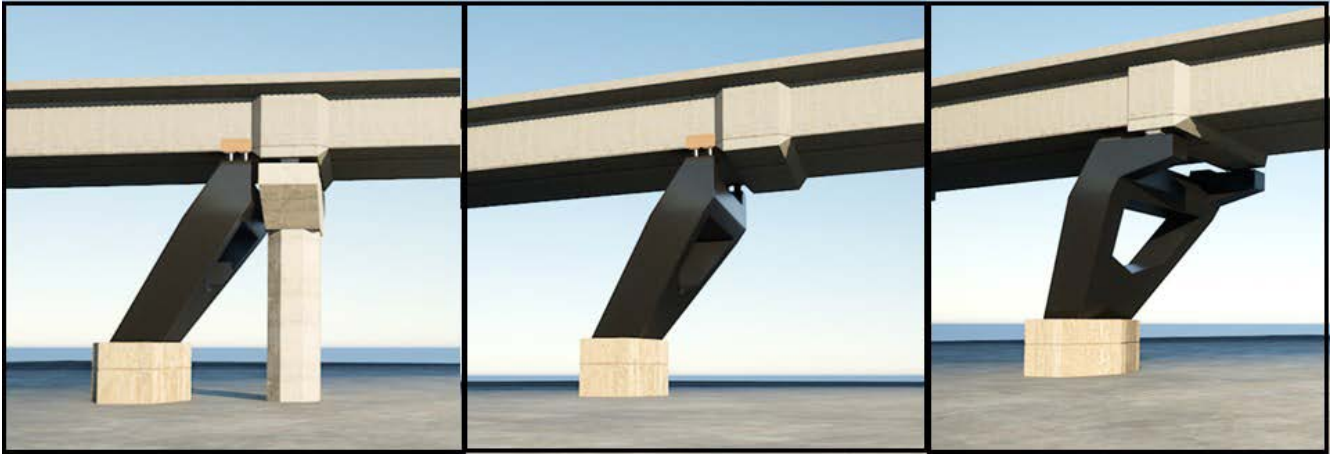


Figura 10. Secuencia planteada para el procedimiento de transferencia de cargas.

4. DIMENSIONAMIENTO. MODELOS DE CÁLCULO

En primer lugar se realizó un modelo pórtico 3D del acueducto a partir de la documentación existente, 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 del acueducto 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 11).

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 12).

En otro modelo complementario de la pila se incluyó tanto el pedestal de hormigón como la cimentación. 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. Para el dimensionamiento del pretensado del pedestal se estableció que en situación permanente la fibra más traccionada estuviera en descompresión, es decir, con ausencia de tracciones [4] [7].

El análisis de la cimentación se realizó con modelos no-lineales permitiendo el despegue de la zapata, lo que nos per-

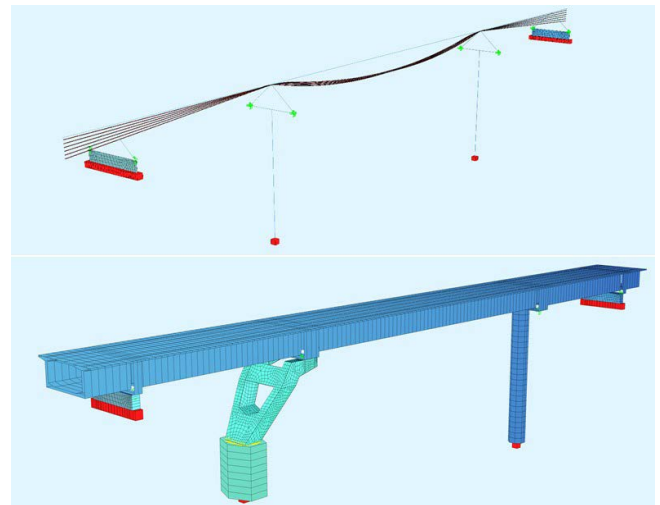


Figura 11. Ejemplos de modelos longitudinales analizados.

mitía 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 de la VSM, mientras que otros sensores únicamente se instalaron para controlar las maniobras de transferencia de cargas.

En concreto, se establecieron cinco secciones de control en la estructura, donde se instalaron galgas de control tensional (figura 13). 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

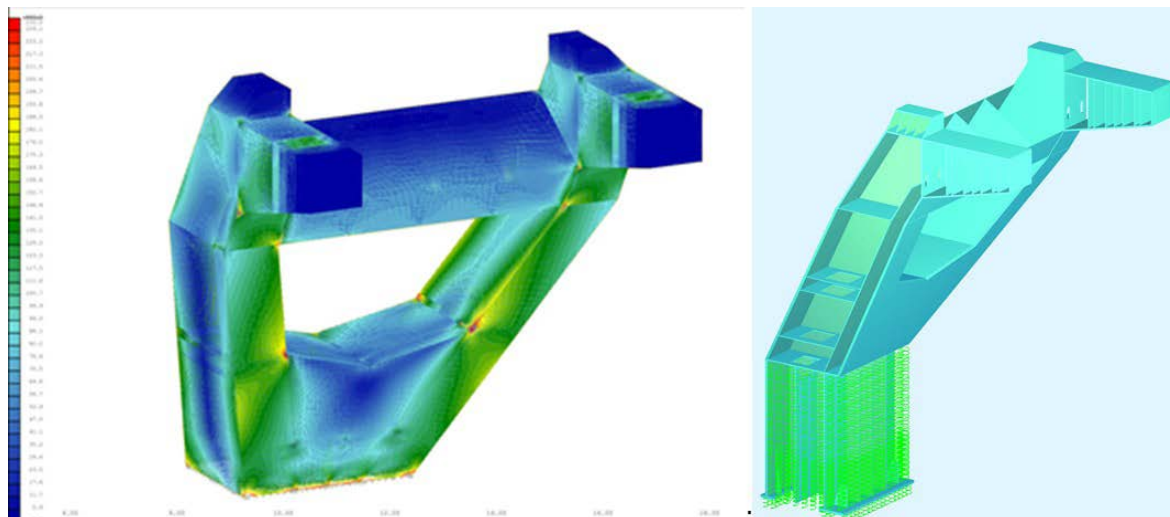


Figura 12. Modelos 3D de placas de la estructura de la pila.

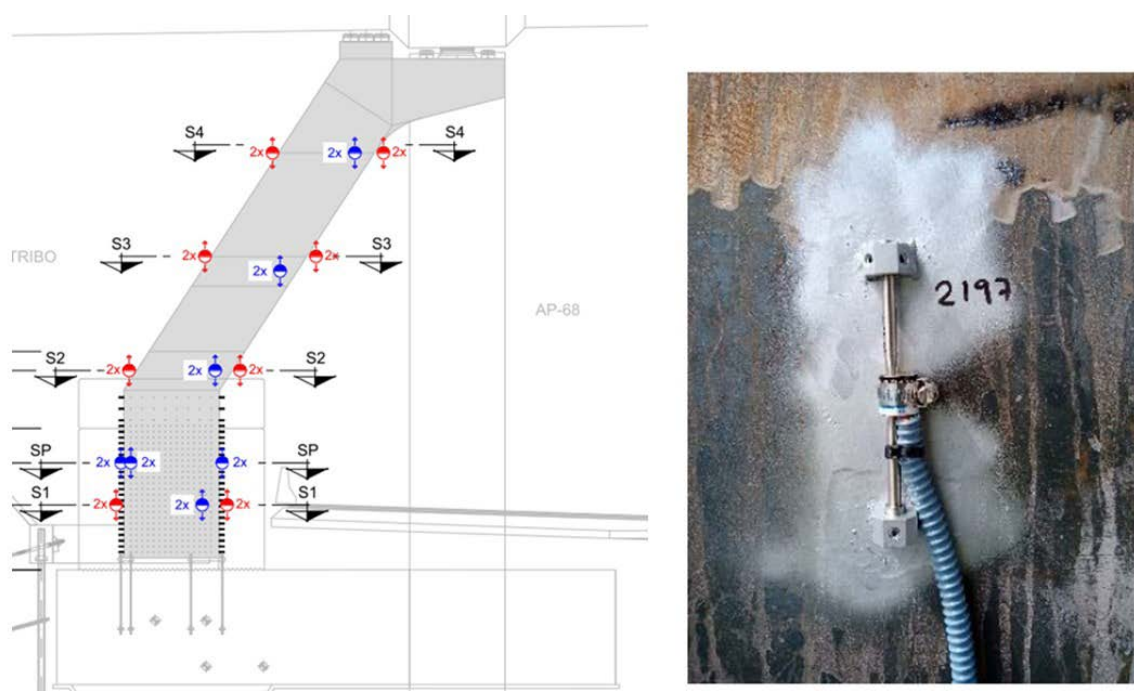


Figura 13. Secciones de control y ejemplo de galga instalada.

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 posibles 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 nos permitían conocer 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.

En los siguientes apartados se incluyen gráficas con los resultados obtenidos durante las maniobras de transferencia.

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 (figura 14). 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 14.60 x 9.00 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 15).

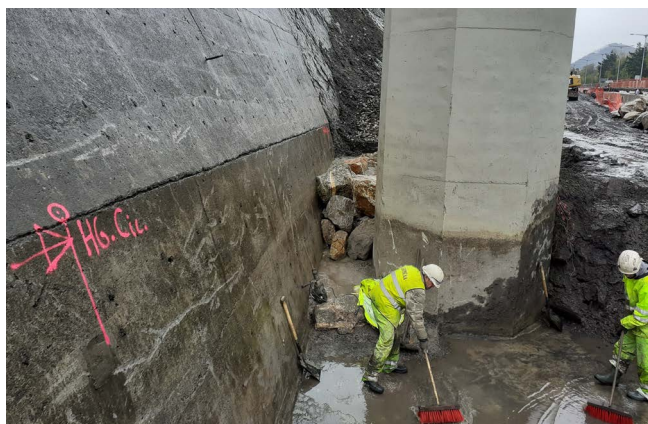


Figura 14. Excavación y limpieza para ejecución de la cimentación.

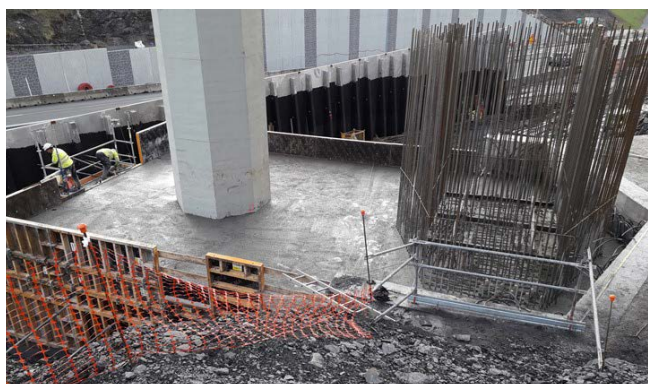
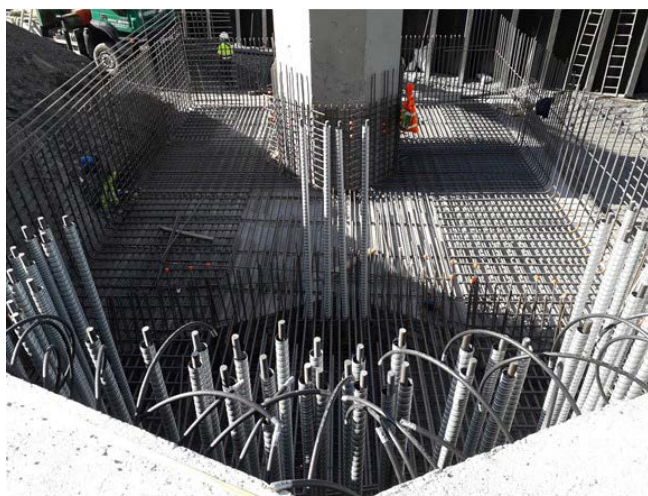


Figura 15. Trabajos de armado y hormigonado de la zapata.

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 la zona de obra y guiándose con unos carriles apoyados en el suelo y unos gatos manuales se posicionó enfrente a la pila. Con ayuda de un útil y dos grúas colocadas a ambos lados del acueducto se elevó y colocó en posición (figura 16).



Figura 16. 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 (figura 17).



Figura 17. Ejecución de pedestal de hormigón.

6.3. 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 mismo útiles que para la primera pieza (figura 18).



Figura 18. Montaje de dovela 2. Espesores de chapa y uniones soldadas.

La dovela 3, que consistía en los dos brazos independientes, 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 (figura 19).



Figura 19. Montaje de dovela 4.

Antes del inicio del montaje de cada pieza, se ensayó y comprobó el 100% de las soldaduras ejecutadas en obra, mediante las 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.

Los principales materiales y cuantías empleados en la construcción de esta estructura han sido:

- 520 m³ de hormigón.
- 150 tn acero en chapas.
- 80.tn acero armaduras barras
- 4 tn acero pretensado barras

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.

Previamente, como se ha indicado en los apartados anteriores, se comprobó que el acueducto era capaz de soportar tanto los nuevos esfuerzos globales derivados del incremento de luz del vano central, como los propios esfuerzos locales de cuelgue e introducción de cargas [9]. Con el objetivo de controlar este mecanismo y prevenir la expulsión de las aristas inferiores del acueducto se instalaron unas chapas metálicas en forma de L.

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 for-



Figura 20. Dovela 4 con gatos de fase 1 instalados.

ma 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 [10] (figura 20).

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 era imprescindible 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.

Como se ha indicado anteriormente, además del propio control mediante el sistema de izado sincronizado, se instalaron galgas, clinómetros y extensómetros que proporcionaban lecturas en continuo a través de una plataforma digital. Por último, también se dispuso de topografía, a través de lecturas de prismas y dianas previamente instaladas tanto en la pila como en el acueducto.

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

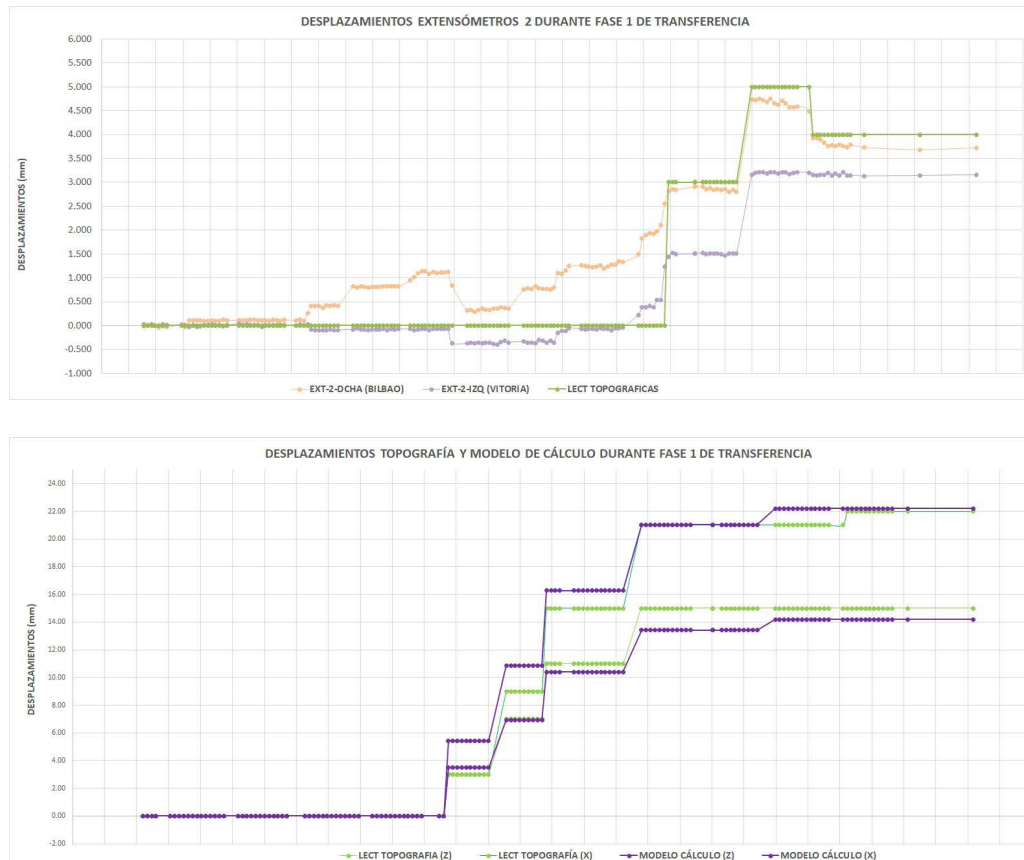


Figura 21. Gráficas con desplazamientos recogidos durante la fase 1 de transferencia.

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 23.8 mm en horizontal y 15.6 mm en vertical. Por lo tanto, la estructura se comportó como estaba previsto.

En la gráfica superior de la [figura 21](#) se muestra el registro de desplazamientos en los extensómetros del tablero y su correspondencia con las lecturas topográficas. La gráfica inferior representa las deformaciones de la estructura de la pila, incluyendo las lecturas topográficas y los desplazamientos esperados a partir de los modelos de cálculo. Como se aprecia en ambas gráficas, los datos de los distintos sistemas de control utilizados son prácticamente idénticos.

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%. En el ejemplo incluido en la [figura 22](#), se muestra la variación tensional en la galgas ubicadas en la sección 4 (superior), observándose cómo se registra un incremento de tensión derivado de la transferencia de cargas con valores medios de compresión y tracción de 40 MPa. En la parte derecha, se adjuntan gráficas con los valores esperados de los modelos de cálculo: tensiones medias de 44 MPa en la platabanda delantera (imagen superior, compresiones) y de 33 MPa en la trasera (imagen inferior, tracciones).

8.

DEMOLICIÓN DE PILA E INSTALACIÓN DE DOVELA 5

Una vez realizada la maniobra de transferencia y garantizada la ausencia de reacciones bajo los apoyos de pila 1, comenzaron los trabajos previos de corte para la extracción de los aparatos de apoyo. En primer lugar, se realizaron dos perforaciones a cada lado de los apoyos para posteriormente introducir el hilo de diamante y comenzar con el corte.

No obstante, una vez realizado el corte, no se consiguieron separar las partes superior e inferior que conformaban el aparato de apoyo, por lo que se decidió eliminar el mortero de asiento inferior. De esta forma, se garantizaba al menos un espacio libre de unos 4 cms que permitía realizar la operación de retirada del dintel ([figura 23](#)).

Después de comprobar que este espacio era insuficiente y que la maniobra de retirada del dintel no podía acometer-

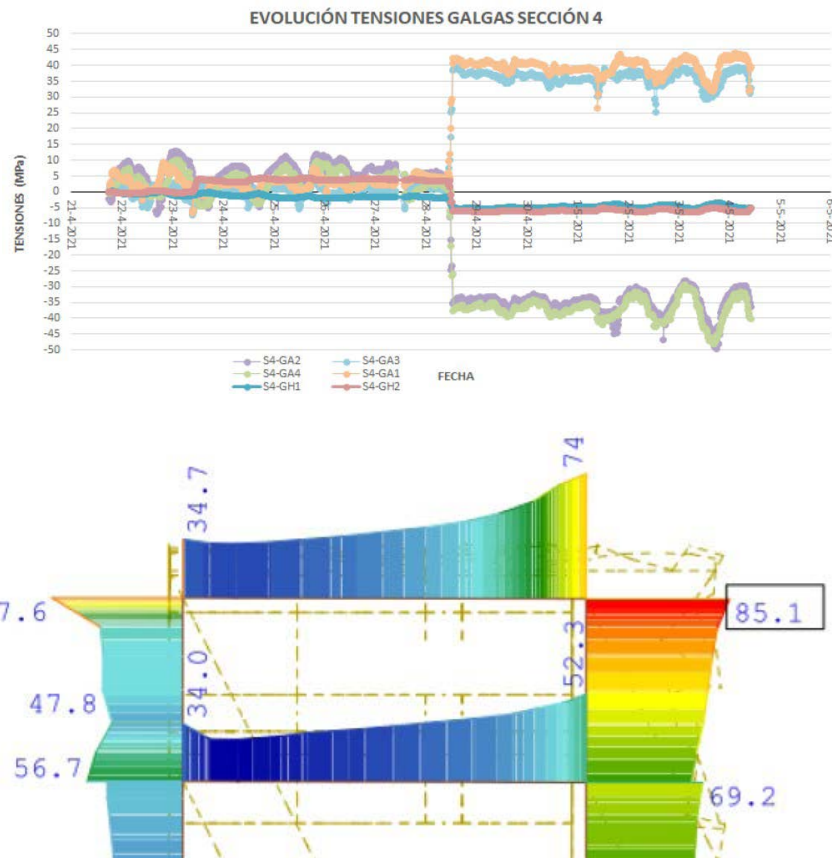


Figura 22. Gráficas con variación tensional en galgas de sección 4 (superior) y valores esperados del modelo de cálculo (inferior).



Figura 23. Aparatos de apoyo originales colgando del tablero.



Figura 24. Retirada del dintel de la pila original.

se con seguridad, se volvió a intentar retirar los aparatos de apoyo. Finalmente, y tras comprobar que las chapas superior e inferior del apoyo estaban unidas por los pernos de bloqueo, se cortaron dichos pernos y se extrajeron y separaron los aparatos de apoyo.

Es decir, durante la extracción de los apoyos, se comprobó que los pernos de bloqueo que unían ambas partes del aparato de apoyo (parte superior deslizante e inferior fija) no fueron extraídos en el momento de su colocación por lo que dichos apoyos se han comportado siempre como puntos fijos frente a acciones horizontales longitudinales (acciones de temperatura, vientos, frenado) cuando en realidad estaban previstos como apoyos deslizantes.

Una vez 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 24). 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.

Para ello, en primer lugar se tomó topográficamente la posición real de la dovela 4 (figura 25). Con ayuda de estos datos y la previsión de deformación durante la maniobra final de transferencia, se adaptó y cortó en taller la parte trasera de la dovela 5. De esta forma, se aseguraba que en situación definitiva la parte superior de esta última pieza quedara perfectamente horizontal.

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.



Figura 25. Situación provisional de apeo en Fase 1 previa a la instalación de la dovela 5.

9. 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 26). 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.

Del mismo 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.

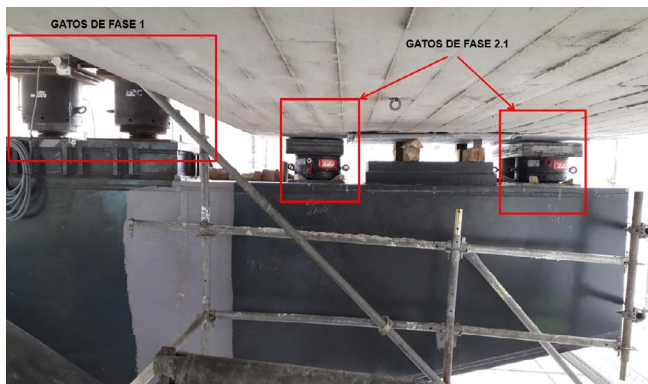


Figura 26. Ubicación de gatos para la fase de transferencia 2.1.

En primer lugar, se comprobó la presión existente en los gatos de fase 1, siendo equivalente a una reacción por alma de 6150 kN (se registraron pérdidas del 3%). Posteriormente, se aumentó ligeramente la presión de cada uno de estos gatos para poder liberar las tuercas y comenzar con la maniobra de transferencia.

El procedimiento de transferencia se inició con escalones de 100 bar (equivalente a unos 1600 kN de reacción por

alma), observándose cómo comenzaba la descarga en los gatos de fase 1. 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. De esta forma, se podía garantizar la transferencia total de cargas y conseguir a su vez el espacio suficiente para la instalación de los apoyos definitivos.

En esta situación final se registraron unos movimientos definitivos de 10 mm en el extensómetro 3 ubicado en la meseta de la pila (gráfica superior de la figura 27). 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 (gráfica inferior de la figura 27).

A nivel tensional, se registraron una vez más valores similares a los obtenidos en los modelos de cálculo (diferencias del orden del 5%). En concreto, en la sección 4 superior se midió una tensión de 105 MPa frente a 110 MPa de tensión media esperada (figura 28).

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. 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 29).

En primer lugar se comprobó la presión existente en dichos gatos siendo de aproximadamente 270 bar. A continuación, se aumentó ligeramente la presión de los 8 gatos (4 en cada alma) para poder desbloquearlos, realizando a continuación los siguientes escalones de descarga: 220 bar – 170 bar – 120 bar – 60 bar – 0 bar.

En los primeros escalones de descarga se apreciaron descensos del tablero del orden de 2 mm, debidos al reajuste del mismo sobre los aparatos de apoyo, ya que no se registró durante la maniobra ningún movimiento en la estructura de la

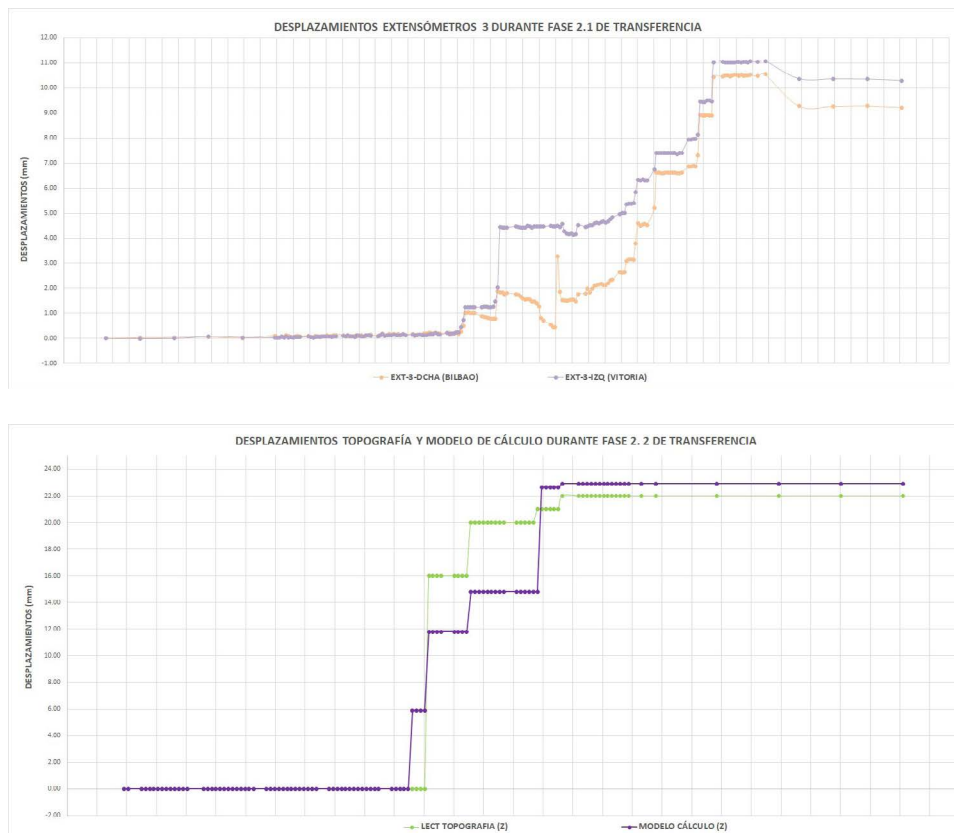


Figura 27. Gráficas con desplazamientos recogidos durante la fase 2.1 de transferencia.

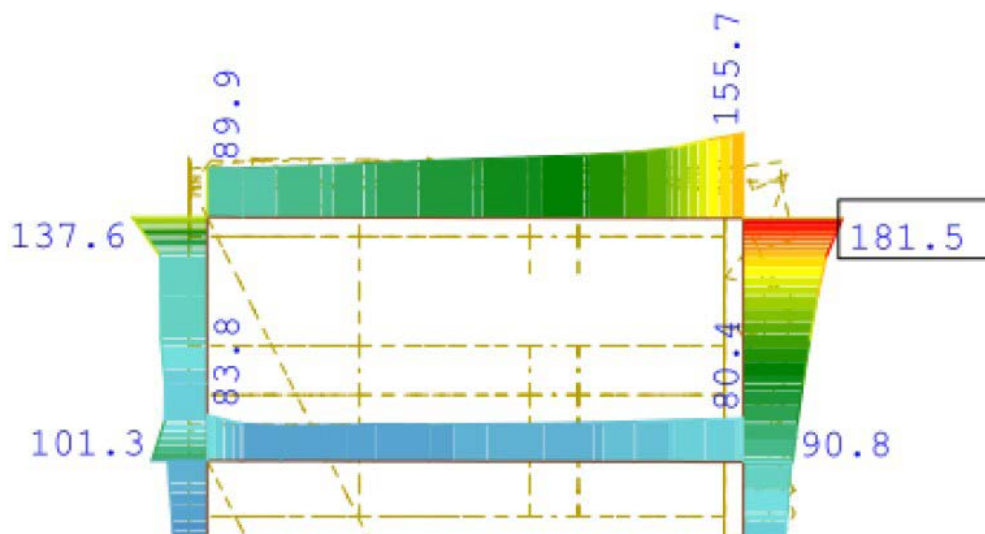


Figura 28. Gráficas con variación tensional en galgas de sección 4 (superior) y valores esperados del modelo de cálculo (inferior).

pila. De esta forma, se consiguió el objetivo de controlar y evitar desplazamientos adicionales en la nueva estructura.



Figura 29. Gatos y aparato de apoyo para la fase de transferencia 2.2.

10. 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 30).

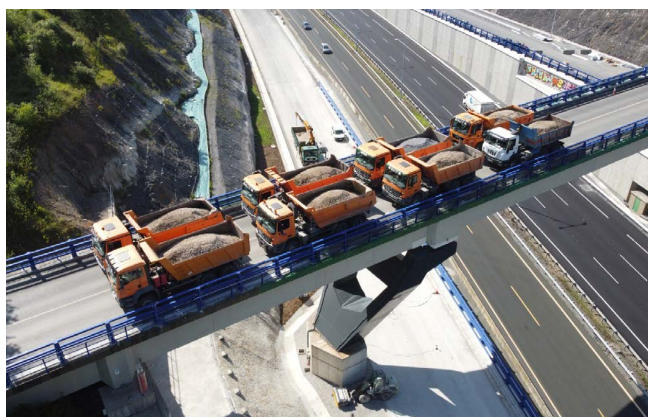


Figura 30. Prueba de carga_etapa 2.

Se realizaron lecturas topográficas a prismas y dianas de control ubicadas tanto en el tablero como en la pila. También se instaló un extensómetro vertical y un palpador de movimientos horizontales en cada uno de los aparatos de apoyo.

Los desplazamientos máximos medidos en la pila fueron del orden de 5 mm tanto en horizontal como en vertical (figura 31). 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. En la estructura de la pila se registró en algún punto alguna deformación remanente de 1 mm en vertical, que se consideró admisible.

Adicionalmente a la prueba de carga estática ya descrita, se realizó una prueba de carga dinámica con el paso de un camión de 26 tn a velocidad constante. El objetivo de esta prueba era conocer si la nueva pila y su cambio de rigidez habían modificado el comportamiento dinámico del acueducto.

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.

Según estos resultados, puede observarse cómo existen frecuencias que se han mantenido constantes y que corresponden a modos de vibración independientes del cambio de pila, mientras que también han aparecido nuevas frecuencias en la parte baja del espectro motivadas por el cambio de rigidez de la estructura.

Por lo tanto, dado que 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, se puede concluir que se mantienen las condiciones de rigidez y funcionalidad previas a la transferencia de pila.

11. CONCLUSIONES

Cuando se comenzó a estudiar cómo resolver esta actuación, se tuvo especial cuidado en que la afección sobre el acueducto fuera mínima. 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 (figura 32).

La nueva pila ejecutada recoge el tablero, evitando su caída a pesar de la demolición del apoyo original, asemejándose a dos brazos que se lanzan a soportar un gran peso. 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 (figura 33).

Para finalizar, queríamos agradecer a todas las empresas y trabajadores que participaron de alguna forma durante la ejecución de esta estructura. A modo particular, a los Directores de Obra, Pedro Rivas y Luis Ángel Rojo por la oportunidad y su confianza, y también a Francisco Javier Gómez Corral por su acompañamiento y consejo durante tantos años.

Anexo 1. Principales participantes en el proyecto y obra

Propiedad y Dirección de Obra: Interbiak Bizkaia

Constructora: UTE PAGABIDEA (Geotúnel, Campezo, Gai-maz, Excavaciones Cantábricas)

Proyecto y Asistencia Técnica a la Dirección de Obra: IDOM, Consulting, Engineering, Architecture

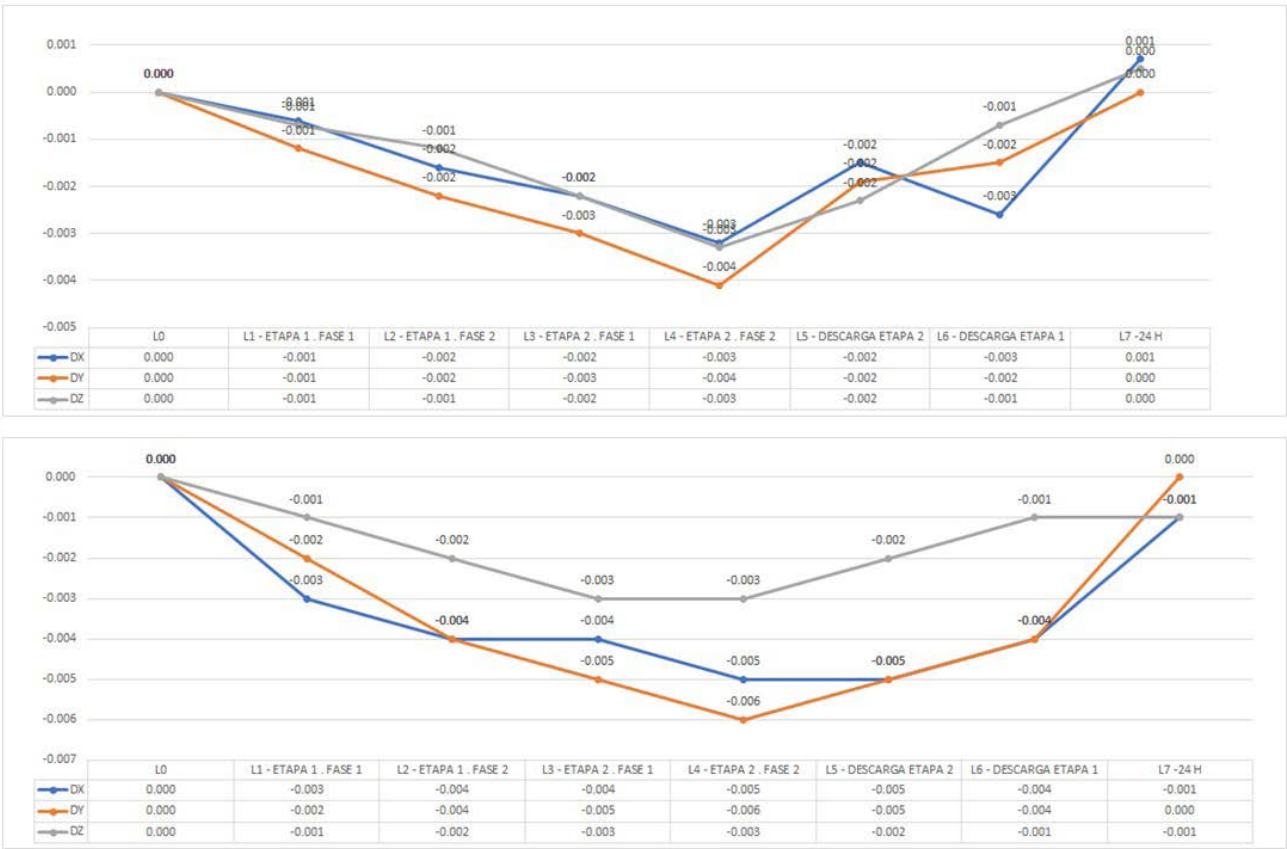


Figura 31. Desplazamientos en pila, lado norte y sur (mm).



Figura 32. Vista frontal.



Figura 33. Vista nocturna de la estructura.

Taller Estructura Metálica: Martifer

Instrumentación: Teknés Innovación

Demolición y Operación de Transferencia de Cargas: Grupo Orion

Referencias:

- [1] Siegrist, C. 591-2-152- (1979) 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
- [9] Schäfer, K. (1996) *Strut and Tie Models for the Design of Structural Concrete*. Workshop, Universität Stuttgart. Tainan
- [10] Van Lund, J.A. (1991) Jacking Steel Bridge Superstructures in Washington State. *Transportation Research Record* 1319.