

Rehabilitación del Viaducto de Osormort en la C-25

Rehabilitation of the Osormort Viaduct on the C-25

Manuel Reventós Rovira^a, Jaume Guàrdia Tomàs^b Abraham Hidalgo Olea^c,

Guillermo Ramírez Rodríguez^d, Juan Lima^e

^aIngeniero de Caminos Canales y Puertos, Enginyeria Reventós, SL., mreventos@ereventos.com

^bIngeniero de Caminos, Canales y Puertos, Enginyeria Reventós, SL. jguardia@ereventos.com

^cIngeniero Geólogo, VSL Construction Systems S.A., Ingeniero Producción, abraham.hidalgo@vsl.com

^dIngeniero Industrial, VSL International Ltd., Engineering Manager, guillermo.ramirez@vsl.com

^eIngeniero Civil, VSL Construction Systems S.A., Director técnico juan.lima@vsl.com

RESUMEN

El Viaducto de Osormort, construido en 1995, fue pionero por su tipología de losa continua postesada y vanos atirantados inferiormente. En 2023, una inspección especial reveló corrosión avanzada en varios tendones exteriores lo que comprometía la integridad estructural. Se decidió realizar una sustitución completa de los tendones por un sistema de vanguardia con cinco niveles de protección anticorrosión, retesable y reemplazable cordón a cordón. La sustitución de los tendones implica el destensado de los tendones, lo que requiere un profundo conocimiento de la tecnología de pretensado instalada, del comportamiento estructural y de las condiciones de contorno para realizarlo de forma gradual y segura.

ABSTRACT

The Osormort Viaduct, built in 1995, was a pioneer due to its post-tensioned continuous slab and n under-deck cable-staying system with extradosed tendons. In 2023, a special inspection revealed advanced corrosion in several exterior tendons, compromising the structural integrity. It was decided to completely replace the tendons with a state-of-the-art system with five levels of corrosion protection, which can be restressed and replaced strand by strand. The replacement of the tendons involves de-tensioning them, which requires a deep knowledge of the installed prestressing technology, the structural behaviour and the boundary conditions to carry it out gradually and safely.

PALABRAS CLAVE: Rehabilitación, Refuerzo, Pretensado exterior, tirantes, destensado, extradadoso.

KEYWORDS: Rehabilitation, Strenthening, external prestressing, stay cable, detensioning, extradosed.

1. Introducción y contexto

El Viaducto de Osormort es una obra emblemática del Eje Transversal (C-25), construida entre febrero de 1993 y junio de 1995. proyectado por Javier Manterola Armisen y Leonardo Fernández Troyano, de la oficina de Carlos Fernández Casado, S.L., y construido por Agroman, S.A., con dirección de obra de Taller d'Enginyeries, S.A.

Destaca por su tipología estructural: una losa aligerada de hormigón pretensado de 13 vanos continuos, atirantados inferiormente mediante pretensado exterior. Fue pionero al aplicar esta tipología en un viaducto continuo y en todos los vanos, lo que, en un valle tan amplio, le confiere un carácter único. Esto le hizo merecedor del Premio Construmat en 1995.

Anteriormente se habían construido viaductos atirantados inferiormente, pero solo en el vano principal y con tableros metálicos (como el Viaducto sobre el Neckar en Alemania).

En 2007, al desdoblar el Eje Transversal, se construyó un viaducto paralelo al original, respetando diseño de pilas y estribos, pero con una losa postensada convencional.

Entre el 12 y el 14 de diciembre de 2023 se llevó a cabo una inspección especial del viaducto, solicitada por el Departament de Territori, Habitatge i Transició Ecològica de la Generalitat de Catalunya. La inspección, centrada en el atirantamiento inferior, concluyó que los tendones presentaban una corrosión severa, por lo que su integridad estaba en riesgo y, por lo tanto, se decidió la sustitución total. En febrero del 2024 se iniciaron los trabajos de reparación de emergencia, finalizando en octubre del mismo año.

1.1 Descripción del viaducto original

Con una longitud total de 509 m, 504 m entre ejes de estribo, está distribuida en 13 vanos: 32 m + 11 x 40 m + 32 m. El tablero mantiene un ancho constante de 13,20 m. La imposta-barrera original dejaba un ancho útil de 12 m, pero la instalación posterior de una barrera tipo New Jersey lo redujo a 10,55 m. La sección funcional incluye 2 carriles de 3,5 m y arcones de 2,5 y 1,05 m.

Presenta un trazado curvo de radio constante de 1.550 m con un peralte del 2%. El tablero es una losa aligerada continua y postensada de canto constante de 1,60 m. Su geometría es singular: dos vigas triangulares de 5,5 m de ancho, donde se sitúan los aligeramientos y el pretensado interior, unidas por una losa de hormigón de 20 cm de espesor y 2,2 m de ancho. Esta losa de gran esbeltez se refuerza con un diafragma en los apoyos y centros de vano. El centro de gravedad de la sección aligerada donde se anclan los tendones

extradosados, se sitúa a 50 cm de la cara superior.

La sección de hormigón está postesada con 10 tendones longitudinales de 19 cordones de 140 mm² cada uno. Sobre cada pila hay un pretensado transversal con 5 tendones de 9 cordones de 140 mm² en una franja de 1,5 m de ancho.

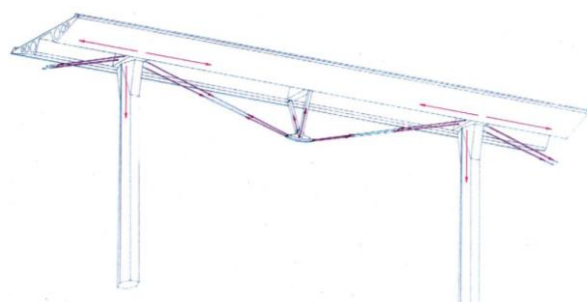


Figura 1. Fuerzas sustentantes del tablero.

Cada vano del viaducto está atirantado inferiormente por un par de tendones extradosados, anclados a las pilas vano a vano, atravesando un desviador central situado en el centro del vano bajo un puntal.

Al tesar los tirantes, los puntales generan una reacción vertical en el tablero, simulando el efecto de una pila. Cada tirante en los vanos de 40 m tenía 27 cordones desnudos de 140 mm² dentro de una vaina de PEAD, inyectada con lechada de cemento. Todo el acero activo es Y1770S7. El sistema permitía reemplazo completo del tendón, pero no retesado. Los capots estaban inyectados de cemento.

Los desviadores están formados por 2 puntales metálicos de sección cuadrada de 320 mm y chapas de 20 mm. Éstos salen en ménsula desde la cara inferior del tablero y se unen al extremo inferior del desviador, formando una celda triangular en la sección transversal, aunque longitudinalmente son un voladizo. En la parte inferior están soldados los 2 tubos deflectores de acero por donde discurren los tendones, y en el medio se sitúa un tercer tubo de reserva.

En cada pila y estribo, el viaducto se apoya en dos puntos; sobre las pilas, los aparatos de apoyo están separados 2,60 m y en los estribos están a 6,50 m.

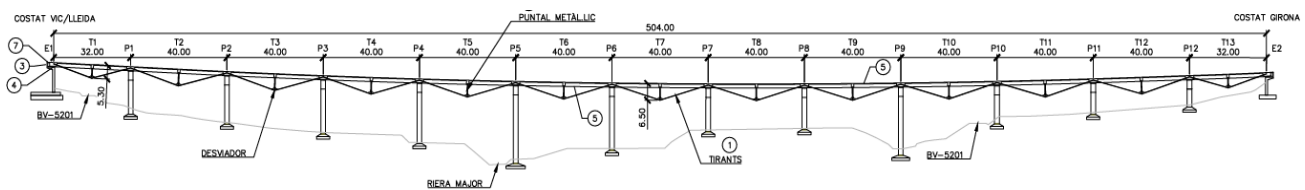


Figura 2. Alzado del viaducto.

En el tablero, las traviesas de apoyo son de 3,5 m de ancho y en los estribos de 3,00 m. Las 12 pilas del viaducto son de sección hexagonal variable, rematadas con un capitel, y la cimentación es superficial.

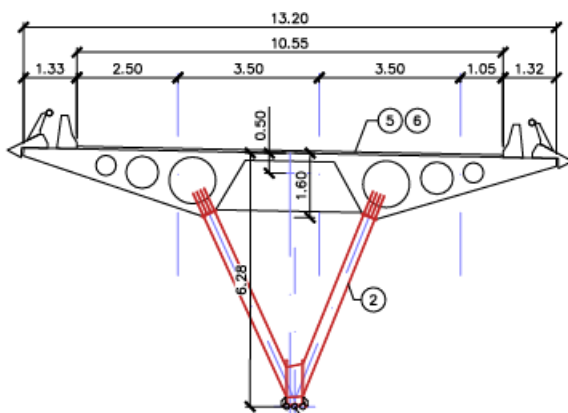


Figura 3. Sección tipo del tablero.

1.2 Inspección de los tendones

Durante la inspección se utilizó una plataforma de cota negativa para acceder a todos los componentes visibles del sistema



Figura 4. plataforma de cota negativa.

El alcance de la inspección se centró en varios aspectos clave. La condición de la inyección de los tendones, purgas y capots. Integridad de la vaina en la longitud libre y en

zonas de desvío. No fue posible inspeccionar los tramos ocultos del tendón a través de los diafragmas sobre pila. Los hallazgos más relevantes de la inspección se presentan a continuación.

Se detectó un sellado deficiente en los orificios de inyección de los tendones, lo que facilita el ingreso de agua al interior del tendón.



Figura 5. Orificio de inyección en vaina..

Grave oxidación de los cordones situados en la zona superior, subsecuente pérdida de sección resistente y expansión volumétrica debido a la corrosión que degenera en el desgarramiento de la vaina y exposición de los cordones.



Figura 6. Fisuración de la vaina.

Apertura de juntas de soldadura de la vaina debido a soldadura defectuosa o diferencias en el coeficiente de dilatación térmica, provocando en algunos puntos la rotura completa y exposición de los cordones.



Figura 7. Apertura de soldadura.

Las purgas de inyección presentes en el capot quedaron pasantes en el tablero y no se dispusieron tapones de sellado, facilitando la entrada de agua y sales de deshielo provenientes de la capa de rodadura hacia el interior del capot.



Figura 8. Oxidación del capot.

También se detectaron zonas de llenado incompleto de las vainas y tras los anclajes, donde los cordones presentaban corrosión avanzada.

1.3 Mecánica del fallo del sistema de pretensado instalado

Estructuralmente el sistema de pretensado es no adherente a la estructura. El tendón está compuesto por cordones desnudos de 7 alambres, inyectados con lechada de cemento. En esta tipología de pretensado, cuando un cordón rompe, y debido a la adherencia con la lechada, éste vuelve a reanclarse. La energía no se libera y la tensión del cordón roto se transfiere al resto, aumentando las tensiones que deben resistir los cordones restantes.

Inicialmente, los cordones se deformarán de manera elástica, hasta que la fuerza aplicada supera su límite elástico. A continuación, los cordones se alargarán plásticamente, hasta que la fuerza supere la resistencia a tracción y rompan.

Debido a la disposición de los cordones rotos en el tendón (principalmente externos) y su excentricidad respecto al centro de gravedad, la transferencia de tensión al resto de los cordones no puede ser calculada por estricta proporcionalidad. La rotura del tendón puede ocurrir mucho antes de que el límite de ruptura teórico se alcance sin ser proporcional a la sección de acero perdida. Esta ruptura se produce de forma repentina y violenta, liberando toda la energía residual del tendón.

2. Secuencia de trabajos

El procedimiento general para la sustitución de los tendones se basa en la posibilidad de instalación de tendones provisionales únicamente en vanos alternos, por lo que el proceso de sustitución se realiza en dos fases. La sustitución de los tendones se realiza de uno en uno. En los siguientes apartados se presentan las etapas más relevantes de la sustitución.

2.1 Instalación del tendón provisional

Se instaló un tendón pasante a través del diafragma de las pilas y el desviador central utilizando los tubos guía de reserva contemplados en el proyecto inicial (Figura 9).



Figura 9. Tubo deflector de reserva en desviador.

El tendón consistió en 22 cordones de acero desnudo Y1860 S7 Ø15,7 mm (150 mm²).

EN 10138, contenidos dentro de vaina PEAD de $\varnothing$ 140 mm, anclados en bloques de anclaje VSL E 6-22 (QT) y tesados a 3.228,58 kN (52,6% GUTS).

El tesado se realiza simultáneamente por ambos extremos mediante gato multifilar para introducir simétricamente la carga en la estructura y evitar que el puntal se desequilibre.

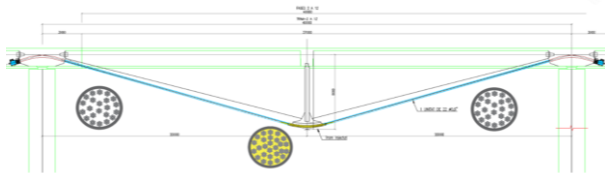


Figura 10. Tendón provisional.

En la zona de anclaje, correspondiente a la riostra del tablero sobre la pila, solo se dispone de un único desviador de tendón, sirviendo el mismo para el vano precedente y el posterior.

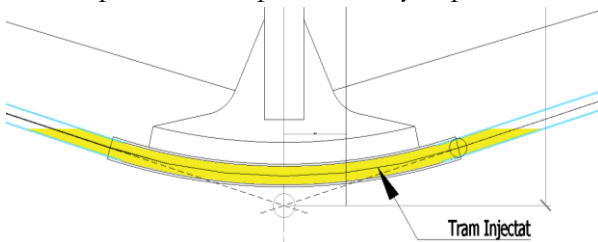


Figura 11. Zona inyectada tubo deflector tendón provisional.

Se inyectó el punto bajo del tubo deflector inferior para que actuara como arriostramiento del puntal frente a esfuerzos horizontales, obteniendo un rozamiento entorno al 28% de fuerza de tesado.



Figura 12. Tesado mediante gato multicordón.

Para no exceder las tracciones en la cara superior del tablero durante el tesado del tendón provisional, fue necesario disponer un

sistema de calas en el anclaje para el destesado.

2.2 Aseguramiento de los tendones

El aseguramiento de los tendones pretende evitar el efecto látigo del tendón en caso de ruptura, impidiendo el pandeo lateral de los tendones, pero no el movimiento longitudinal.

Consistió en el arriostramiento de los 2 tendones a sustituir por medio de cinchas de carraca cada 0.50 m, asegurados al tresbolillo al tendón provisional.



Figura 13. Arriostramiento de los tendones.

2.3 Desmontaje del tendón existente

Las condiciones de empotramiento y adherencia del tendón, tanto en la zona de anclaje como en los desviadores, son críticas a la hora de planificar su destesado. En la zona de paso de pilas el tendón era no adherente, pero una de las principales preocupaciones fue que el posible acodamiento del tendón en la zona de desvío inferior que derivase en una inestabilidad del puntal durante el corte.



Figura 14. Línea de corte del tubo deflector.

La estabilidad del puntal juega un papel fundamental en la capacidad resistente de la estructura, si falla el puntal se pierde la

contribución de los dos tendones.

La vaina original fue enfilada a través del tubo deflector con dificultad como indican las erosiones encontradas en la superficie exterior. Además, se intuía una posible ovalización del tubo deflector en la zona central debido a su curvado, que unido al macizado de la vaina con lechada podría generar un bloqueo mecánico durante el corte. Por lo que se propuso cortar el tubo en media caña para liberar el tendón.

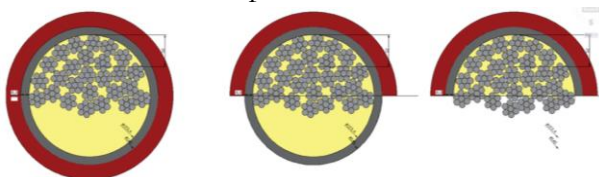


Figura 15. Secuencia de corte del tubo deflector.

Para asegurar que el tubo deflector resistiera las cargas horizontales y verticales una vez cortado en forma de U invertida, se soldaron unas cartelas de acero al mismo tubo, lo que garantiza la sustitución futura de los tendones. Se cubrieron los huecos susceptibles de acumular agua mediante chapas de acero y se restituyó la protección anticorrosiva de los puntales.

Para minimizar el efecto de la liberación repentina de energía, se planteó realizar unas “ventanas” a los tendones donde se descubrieron los cordones de acero (retirando la vaina y la lechada de cemento).



Figura 16. Desviador reparado.

Las ventanas permiten que la energía elástica del tendón se disipe a medida que se cortan los cordones uno a uno, puesto que se elimina la adherencia con la lechada. De este modo, cuando los últimos cordones alcanzan la carga de rotura, la tensión global del tendón será

mucho menor que la tensión inicial.



Figura 17. Esquema de ventanas.

Antes de realizar el corte, se realizó un cálculo inicial simplificado para dimensionar la longitud de las ventanas con el objetivo de reducir la fuerza remanente en el tendón durante el corte.

No se tuvo en cuenta la deformación plástica del tendón durante el corte y se consideró una longitud de transferencia de la fuerza dentro del tendón únicamente de la longitud de la ventana.

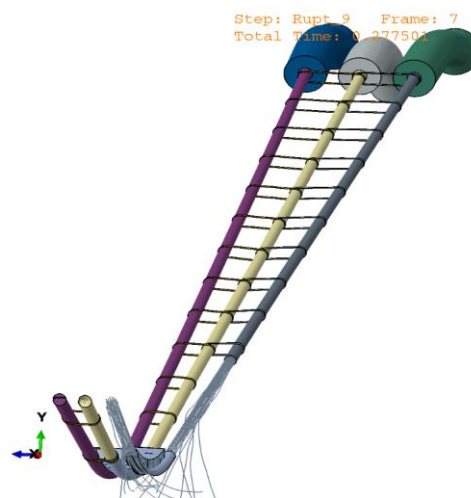


Figura 18. Simulación corte de tendones.

El objetivo era conseguir un destesado progresivo hasta el corte del último cordón, sin que sobreviniera una rotura súbita de los cordones aún por cortar. El corte debía realizarse desde el punto medio para que la liberación de la carga se produjera de la manera más simétrica posible respecto al eje del puntal.

Se llevó a cabo una modelización del corte mediante elementos finitos considerando comportamientos no lineales y análisis a alta

velocidad de los diferentes escenarios de corte.

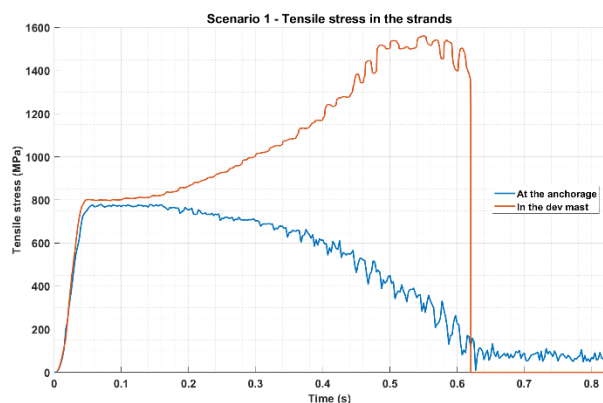


Figura 19. Evolución de la tensión durante el corte.

La simulación confirmó que el corte en el eje de simetría del puntal es el escenario más favorable, ya que se produce una pérdida gradual la fuerza del tendón, permitiendo el corte hasta el último cordón, evitando una liberación brusca de la fuerza en el desviador-puntal.

La simulación también arrojó datos sobre la posible rotación del puntal durante el destesado, siendo esta insignificante.

Se ejecutaron las ventanas manualmente para no dañar los cordones a ambos lados del tubo deflector inferior.

Durante las tareas de destesado se extremaron las precauciones de seguridad durante los trabajos: soldando varios segmentos de U de acero en la zona del corte para evitar el efecto látigo de los cordones cortados y usando una lanza de oxicorte de 1.2 m, que alejara al operador de la zona de corte sin perder precisión.

El corte se ejecutó de forma muy controlada y minimizando el riesgo, tratando de realizar la transferencia de carga lo más gradual posible. El objetivo era cortar los cordones uno a uno hasta el último evitando una rotura súbita.

Se realizaron los cortes de los 26 tendones sin incidentes y el comportamiento de rotura del tendón se asemejaba al obtenido en las modelizaciones. Una vez cortado cada tendón, se procedió a retirar la vaina y los anclajes en los diafragmas de las pilas.



Figura 20. Proceso de corte tendón prototipo.

2.4 Selección del nuevo sistema de pretensado

Se ha instalado el sistema de pretensado más avanzado que dispone VSL para tendones de pretensado exterior. Estos nuevos tendones disponen de 5 barreras frente a la corrosión (galvanizado, engrasado individual, vaina individual PE, lechada de cemento, vaina global PE) a lo largo de toda su longitud libre y están específicamente diseñados para permitir el retesado o reemplazo eventual de los cordones en el futuro uno a uno.

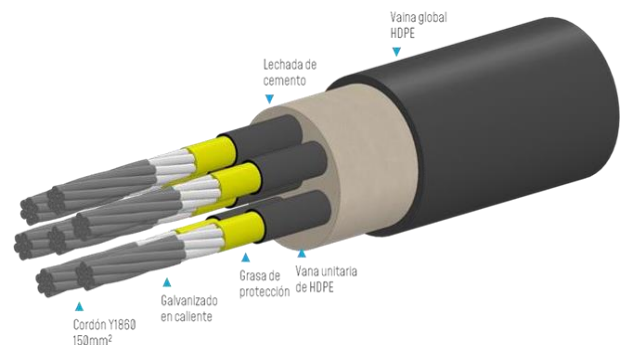


Figura 21. Sección tendón instalado.

El mecanismo de fallo de los nuevos tendones es individual, no se produce un reanclaje y tampoco se transfiere la tensión al resto de cordones.

El nuevo tendón está compuesto por:

- Bloque de anclaje VSL XT-M PLUS
- 22u-0.62" Cordones galvanizados, engrasados y envainados individualmente.
- Vaina PEAD de Ø 140/160x8.3

- Reductores electrofusión PEAD
- Inyección relleno flexible en los capots
- Inyección vaina general mediante lechada tipo VSL HPI

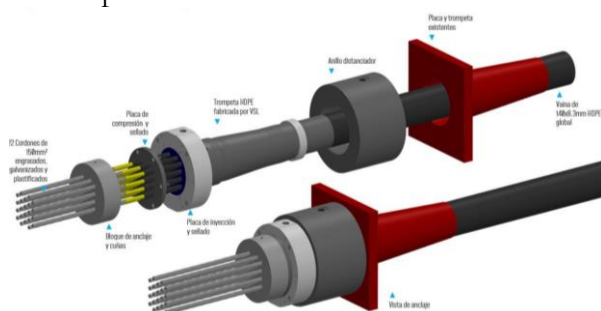


Figura 22. Esquema del nuevo anclaje.

2.5 Montaje de los tendones definitivos

Los anclajes se instalaron con un distanciador para albergar la nueva trompeta plástica en el interior del tubo de encofrado existente.

Posteriormente se instaló la vaina, un tubo PEAD de $\varnothing 140 \times 8,3$ mm. Ésta es continua y estanca y discurre a través de los diafragmas y los desviadores superiores e inferiores evitando que las soldaduras queden ocultas en el interior de los desviadores o diafragmas, para permitir la inspección posterior. Un tramo de vaina de $\varnothing 160$ mm. se conecta al anclaje y atraviesa el tubo de encofrado de la riostra. Es de diámetro superior a la vaina general para actuar de forma telescópica como compensador de dilataciones y absorber variaciones geométricas de longitud por márgenes de montaje, de catenaria durante la instalación y ejecución del tesado.

Para garantizar la estanqueidad general entre la vaina general y la del anclaje se instaló un manguito electrofusible reductor de $\varnothing 160/140$ mm. Después, se enfiló el paquete completo de cordones, prefabricado a nivel de suelo y enfilado mediante tiro.

Se instalaron los bloques de anclajes y dispositivos de sellado y se tesaron al 10% los cordones mediante gato unitario.

Se realizó el relleno completo de la vaina usando una lechada predosificada VSL HPI

específica para tendones de pretensado, mediante una mezcladora coloidal y la inyección se realizó asistida por vacío. Una vez la lechada adquirió la resistencia de 20 MPa se procedió al tesado final 2.977 kN equivalente al 48,50% de la carga de rotura mediante gato unitario.



Figura 23. Enfilado de cordones.

El tesado se realizó en fases y de manera simétrica en ambos extremos del tendón, controlando en todo momento la flecha del tablero como comprobación indirecta de la correcta introducción de la fuerza.

Por último, se realizó la inyección de los capots mediante material flexible y se sellaron las tomas de inyección de la vaina mediante tapones por soldadura a espejo.

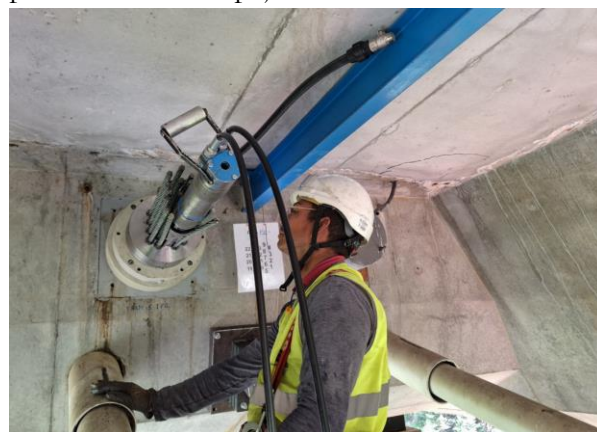


Figura 24. Tesado mediante gato monocordón.

Los anclajes situados en los estribos no eran accesibles, ya que se encontraban encajados entre el espaldón del estribo y la losa de transición.

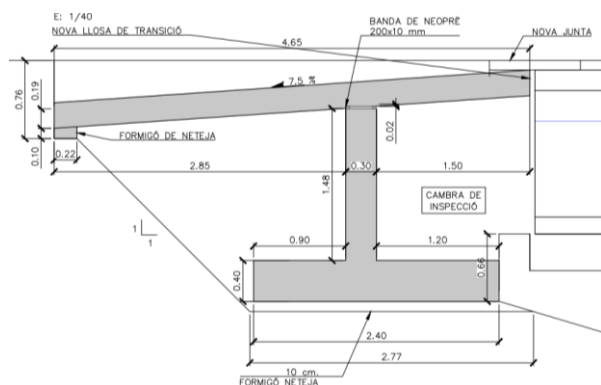


Figura 25. Cámara de inspección en los estribos.

Para acceder durante la ejecución de la obra, se demolió la losa de transición, se llevó a cabo una excavación y se abrió un paso en el espaldón de ambos estribos. Con el objetivo de conservar este acceso una vez la obra estuviera en servicio, se construyó una cámara debajo de la losa de transición, a la cual se puede ingresar a través de una abertura en la aleta existente.

2.6 Monitorización

Se realizó una monitorización completa del primer vano prototipo mediante control de las tensiones en el puntal, giros y desplazamientos.

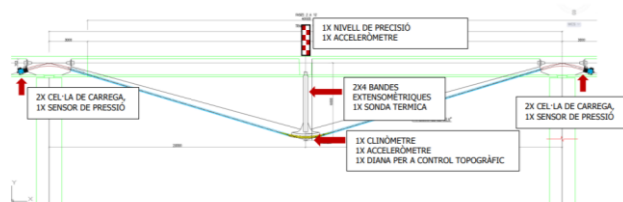


Figura 26. Esquema de instrumentación del tablero.

A este efecto, se dispusieron:

- En el tendón provisional, 2 sensores de presión en los gatos multicordón. Y 4 células de carga monocordón.
- Sobre el tablero: 1 nivel de precisión y 1 acelerómetro.
- En el centro de luz sobre los puntales del desviador: 8 bandas extensométricas y 1 sensor de temperatura.
- En el centro de luz sobre el propio desviador: 1 inclinómetro, 1 diana topográfica y 1 acelerómetro.

En cada puntal se han instalado 4 bandas extensométricas configuradas en un puente de Wheatstone, de manera que 2 miden la deformación longitudinal en el puntal y las otras 2 miden la deformación transversal, para compensar la deformación térmica isostática de la estructura metálica y la flexión en dirección longitudinal. Cada canal mide la deformación axial pura de cada puntal, de manera similar a una célula de carga, que está directamente relacionada con la tensión del tirante.

Durante todas las etapas de la ejecución se llevó un control de todos los parámetros y una verificación del comportamiento de la estructura respecto a los modelos de cálculos, siendo especialmente crítica la puesta en carga del tendón temporal y los subsecuentes destesados de los tendones existentes y tesados de los nuevos. Los resultados obtenidos durante esta etapa fueron fundamentales para diseñar el sistema de monitorización en fase de servicio.

Se ha instalado un sistema de monitorización permanente que proporciona datos sobre los esfuerzos axiales en todos los puntales de los 13 vanos del tablero, mediante bandas en el puntal.



Figura 27. Lecturas prueba de carga.

Se establecieron límites de aviso y alarma según las descompresiones admisibles para los tendones y el tablero. Como dato adicional, los días 1 y 2 de octubre de 2024 se realizó la prueba de carga y se pudieron observar los saltos de deformaciones en cada vano cuando se cargaba y descargaba.

3. Remplazo de apoyos POT

Los apoyos POT de los estribos 1 y 2 presentaban procesos de corrosión muy severos y en algún caso la expulsión del PTFE. Se reemplazaron por los siguientes apoyos:

- 2u - PU-5700 kN ± 120 mm (unidireccional)
- 2u - PL-5700 kN ± 120 mm (libre)



Figura 28. Apoyo POT en estribo 2.

Se realizó un gateo instrumentado de la estructura, mediante una pareja de gatos de 200 tn por apoyo hasta alcanzar una reacción de 2.770 kN y 3,00 mm de levantamiento.



Figura 29. Hidrodemolición de hormigón de apoyos.

Para el reemplazo de los apoyos fue necesario utilizar hidrodemolición para poder instalar los nuevos pernos en el hormigón y posterior reconstrucción.

4. Reparación del hormigón

Para evaluar el estado del hormigón, se extrajeron testigos y se realizaron ensayos de compresión, carbonatación y cloruros. Se detectó un 0,12 % de cloruros a 5 cm de profundidad en la cara superior del tablero, sin carbonatación.



Figura 30. Zona de apoyos hidrodemolidada.

Se aplicó un inhibidor de corrosión en la cara superior del tablero, verificando su efectividad con ensayos de velocidad de corrosión. El hormigón se encontraba en buen estado en general, excepto en las zonas de los tubos de drenaje y juntas, donde fue necesario realizar reparaciones puntuales. Además, se impermeabilizó toda la superficie del tablero, se sustituyeron juntas e imbornales y se instalaron nuevos tubos de drenaje.

Agradecimientos

Agradecer al personal del Servicio de Vías de Alta Capacidad y al personal de la Dirección General de Infraestructuras de la Movilidad del Departament de Territori, Habitatge i Transició Ecològica de la Generalitat de Catalunya que han facilitado en todo momento la gestión de la obra.

A COPCISA por su profesionalismo, dedicación y compromiso con la calidad y seguridad. Su experiencia y enfoque colaborativo fueron clave para cumplir plazos y objetivos.

Referencias

- [1] K. Otsuka, C.M. Wayman, Shape Memory Materials, Cambridge University Press, United Kingdom, 1998.
- [2] M. Frenzel, R. Ortlepp, S. Scheerer, M. Curbach, Hormigón armado con textiles. Un material innovador, ligero y moldeable, Hormigón y Acero. 64 (2013) 47–74.
- [3] Comisión Permanente del Hormigón, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-2008, Ministerio de Fomento, Madrid, 2008.