

Auscultación y sustitución de tendones de pretensado exterior del Viaducto de Río Blanco de la línea de AV Madrid-Barcelona

Auscultation monitoring and replacement of external prestressing tendons in the Rio Blanco Viaduct in the High Speed Railway line Madrid-Barcelona

Carlos Polimón Olabarrieta^a, Jaime Peribáñez Sebastián^b, Pablo Bellido

Montesinos^c y Antonio Burgos Martín^d

^a Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Retineo Ingeniería. Director de Ingeniería. cplimon@retineo.es

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Retineo Ingeniería. Director de Obras. jperibanez@retineo.es

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Retineo Ingeniería. Jefe de Obra. pbellido@retineo.es

^d Ingeniero de Obras Públicas. Retineo Ingeniería. Jefe de Proyectos. aburgos@retineo.es

RESUMEN

En agosto de 2021 se localizó en una Inspección Básica de ADIF la rotura de uno de los tendones de pretensado exterior del viaducto de Río Blanco, puente de la línea de Alta Velocidad Madrid-Barcelona que pertenece a la tipología de cajón cerrado con almas verticales de hormigón postesado de 558 m de longitud total que se ejecutó por empuje del tablero. Tras la auscultación de todos los tendones, se procedió a la sustitución en todo el viaducto de dos familias completas de pretensado exterior para garantizar el servicio de la estructura ante la patología que presentaban todos ellos.

ABSTRACT

During a basic inspection in august 2021, ADIF identified the breaking of one external prestressing tendon in the Viaducto Río Blanco belonging to the High Speed Railway Madrid-Barcelona. A prestressed concrete girder box with vertical shafts with a total length of 558 m erected by segmental launching. After the auscultation moritoning of the whole tendons, two complete families of tendons were replaced to assure the service of the structure with the pathology in all of the tendons.

PALABRAS CLAVE: pretensado exterior, rotura, sustitución, auscultación.

KEYWORDS: External prestressing, breaking, replacemete, auscultation monitoring.

1. Introducción

El viaducto de Río Blanco es un puente pertenece a la tipología de cajón cerrado con almas verticales de hormigón postesado de 558 m de longitud total. La estructura dispone de un único tablero de 14 m de ancho y 12 vanos de 48 m de vano a excepción de los estribos de 39 m en ambos casos. La relación canto/luz de la

estructura es, por tanto, de 1/12 que es ligeramente mayor de lo habitual.

Las pilas son de sección hueca de 6 m de ancho constante y de canto —según el avance— variable según un talud 2/100, con una dimensión mínima de 2,00 m en cabeza de pila. La altura de las pilas es variable correspondiendo

la mínima a la pila 1 con 28,175 m y la máxima a la pila 5 con 59,069 m.

El estribo 1 es de tipología cerrada y en él se ancla el tablero y recoge, por lo tanto, los esfuerzos de frenado del AVE. El estribo se ejecutó en dos fases debido al proceso de lanzamiento del tablero, sirviendo de estribo de empuje. Se diseñó el acceso al viaducto por el mismo. La tipología, por el contrario, del estribo 2 es abierta.

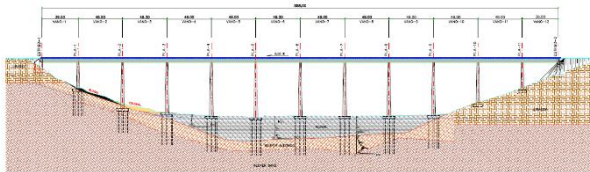


Figura 1. Alzado de la estructura.

La mayor parte de las cimentaciones de las pilas son profundas mediante pilotes de 1,5 m de diámetro a excepción de las pilas 10 y 11 que, al igual que los dos estribos, tienen cimentación directa.

El tablero se diseñó con dos familias de pretensado diferentes. Según se ha referido, el sistema constructivo fue el de lanzamiento o empuje, lo que obliga a disponer una primera familia que absorba los esfuerzos generados durante construcción y una segunda que complete, una vez terminado el empuje, el pretensado necesario para el servicio de la estructura.

El pretensado de lanzamiento se dispuso en la losa superior del tablero (8 unidades de 19 cordones 0,6") y en la parte inferior del alma (8 unidades de 14 cordones 0,6"). La resultante del pretensado, con dicha configuración, coincidía aproximadamente con el centro de gravedad de la sección. En el proceso de empuje, los vanos que sufren los esfuerzos pésimos son los dos primeros, por lo que la familia de pretensado de empuje se reforzó en dichos vanos.

La segunda familia de pretensado, que completa el pretensado necesario en servicio, se diseñó mediante pretensado exterior por el interior del cajón.

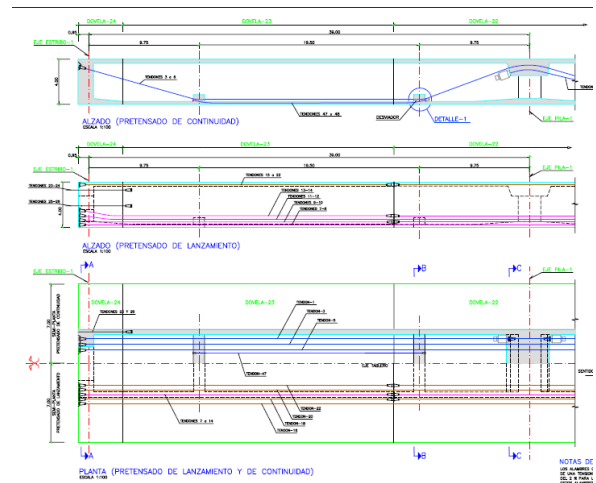


Figura 2. Familias de pretensado.

La familia de pretensado exterior se configuró mediante seis tendones de 25 cordones 0,6" —anclados cada tres vanos— con vaina de polietileno de alta densidad de 125 mm de diámetro exterior y espesores de 7 mm en zonas rectas y 11 mm en desviadores. La inyección de la vaina tras el tesado se contempló con lechada de cemento de la misma naturaleza que la utilizada en pretensados adherentes.

Tras la localización de la rotura del tendón, se procedió a la auscultación de todas las familias del tablero para determinar los procesos patológicos que habían llevado a este incidente.

2. Trabajos de auscultación

Los trabajos de auscultación consistieron en los siguientes:

- Determinación del foco de entrada de agua en las vainas mediante la realización de pruebas hídricas.
- Auscultación sónica de toda la longitud de las vainas.
- Drenaje interior de las vainas e inspección.
- Apertura de ventanas.
- Autopsia de tendón.

2.1. Determinación del foco de entrada de agua en las vainas mediante pruebas hídricas

Se realizaron pruebas hídricas desde la plataforma con trazadores (agua tintada con trazador ultravioleta) para determinar los focos de entrada en el interior y exterior de las vainas. El vertido se realizó sobre el balasto (simulando las condiciones de lluvia) sin necesidad de retirarlo ni afectando a la vía. Los puntos de vertido coincidieron con el eje de la pila sobre ambas vías para detectar entradas en ambos alzados.

Según las inspecciones realizadas, el trazador vertido sobre el viaducto se detectó en el interior del tablero, tanto en el exterior como en el interior de vainas de los cables de pretensado exterior, concluyendo que existían puntos de entrada de agua directa al interior del tablero, en zonas de los diafragmas de pilas y estribos, concentrados en puntos de paso de pila de cables y en capots. Y, por otra parte, que existía una filtración de agua más lenta, que discurría por el interior de las vainas y que alcanzaba el centro de vano de los tendones. El punto de entrada más probable eran los tubos de purga de la inyección.



Figura 3. Pruebas hídricas.

2.2. Auscultación sónica de toda la longitud de las vainas

Se realizó una inspección sónica con martillo de nailon de toda la longitud de las vainas clasificando el sonido de la respuesta en tres categorías: macizo, intermedio y hueco. La finalidad de esta auscultación era la de marcar todas las zonas que dieran como resultado que podía haber huecos en la vaina.

La auscultación sónica tiene dos limitaciones, una relativa a los sonidos «huecos» y otra en los «macizos». En los sonidos clasificados como huecos, hay que tener en cuenta que en vainas antiguas el despegue de lechadas correctamente ejecutadas respecto a la vaina puede dar un falso hueco y los cables estar protegidos. Por otra parte, en los sonidos clasificados como macizos, hay que tener en cuenta que vainas llenas de agua producen ese sonido y pueden presentar oquedades importantes.

De la auscultación sónica se dedujo que en torno al 17% de la longitud de los tendones presentaba un sonido intermedio, susceptible de presentar oquedades. Las citadas oquedades fueron corroboradas mediante los trabajos de drenaje y apertura de ventanas en las vainas.

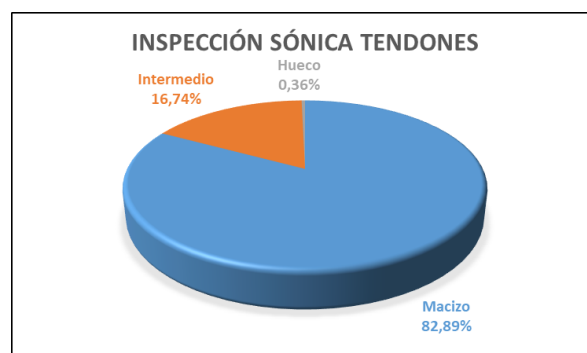


Figura 4. Resultado de la inspección sónica.

2.3. Drenaje interior de las vainas e inspección

De la observación de las vainas instaladas, se pudo deducir que se inyectaron únicamente desde la parte alta y que pudo haber un descolgamiento del material de inyección; por lo tanto, se realizaron taladros desde la parte alta hacia la baja hasta que no se detectó presencia de agua.

Los taladros tienen dos funciones principales: drenar las vainas con presencia de agua y, por otra parte, comprobar en qué longitud la inyección tenía presencia de huecos. Para ello, se perforó la vaina desde cabeza de pila hacia la parte baja cada 50 cm hasta comprobar que la vaina estaba llena de lechada y no se detectaba agua acumulada. Los taladros se

realizaron tanto en la parte alta como en la baja de la sección de vaina controlando la limitación de profundidad de tal forma que estas nunca llegaran al acero de pretensar.

Adicionalmente, se abrieron taladros en las otras partes de la vaina donde se habían detectado huecos mediante inspección sónica. De esta forma, pudieron descartarse los falsos positivos con una pequeña perforación.

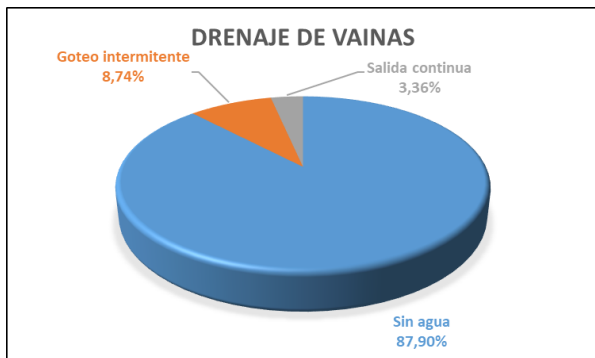


Figura 5. Resultado del drenaje de vainas.

Como puede observarse, de las más de 1300 perforaciones de drenaje realizadas en los tendones, en un 87,8% de los casos no se ha apreciado presencia de agua en la vaina, en un 8,8% se ha apreciado goteo intermitente y en un 3,4% salida continua de agua.

Se encontró agua en mayor o menor medida en los tramos inclinados de los tendones prácticamente en la totalidad de los puntos altos. Por otra parte, se corroboró que, en ciertos tendones, la presencia de agua respondía a las precipitaciones diarias, por lo que la circulación de la misma era continua.

2.4. Apertura de ventanas

Se decidió abrir ventanas en todos los puntos de la vaina donde se detectaron calcificaciones observadas desde el exterior. De la misma forma, se abrieron en aquellos puntos donde se apreció que el cable pudiera presentar corrosión al realizar la auscultación con las perforaciones y en los puntos donde se conocía que la vaina estaba llena de agua. La inspección se completó con la introducción de un endoscopio por los laterales de las ventanas si no existía inyección y era posible su introducción.

Se realizaron un total de 202 aperturas en las vainas de los tendones y, una vez completada la inspección, se cerraron con bridas metálicas, limitando al máximo el tiempo en el que la ventana estuvo abierta.



Figura 6. Apertura de ventanas.

En la siguiente gráfica puede observarse la comparativa de la inspección sónica con el resultado de la apertura de ventanas. Como se apuntó anteriormente, la presencia de agua en el interior de las vainas altera sensiblemente el resultado de los sonidos «macizo». En concreto, en el 62,5% de las veces en los que se marcaban zonas como macizas y, posteriormente, presentaban oquedades («falsos macizos»), estas se encontraban con agua o presencia de humedad. Por otro lado, la separación entre lechada y vaina altera los sonidos «intermedio».

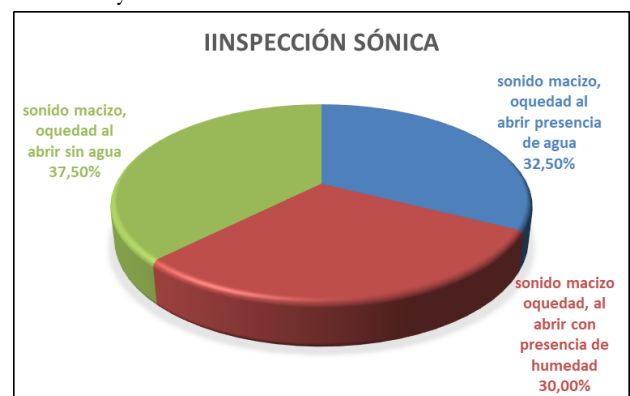


Figura 7. Comparativa inspección sónica-ventanas.

Atendiendo a las características de la lechada, se deduce esta se encontraba en buen estado en el 78,2% de los casos mientras que en un 10,9% de las mismas la lechada era

inexistente, se encontraba disgregada (6,9%), presentaba suciedad (0,5%) o presentaba porosidad (2,97%).

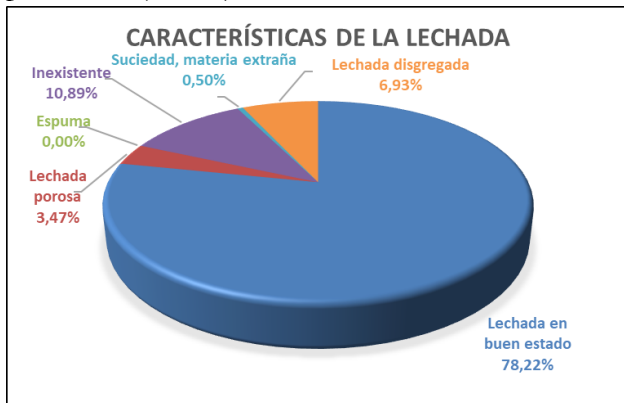


Figura 8. Característica de la lechada.

Atendiendo al estado de los cordones, el 43,6% no se pudo observar por estar protegidos por la lechada, el 36,1% estaban en buen estado, si bien es cierto que en alguna ocasión se encontraban húmedos por la presencia de agua en la vaina, el 19,3% presentaban oxidación superficial y en el 1% de los casos se ha apreciado pérdida de sección (cajeados 71 y 108). No se observó rotura de alambres.

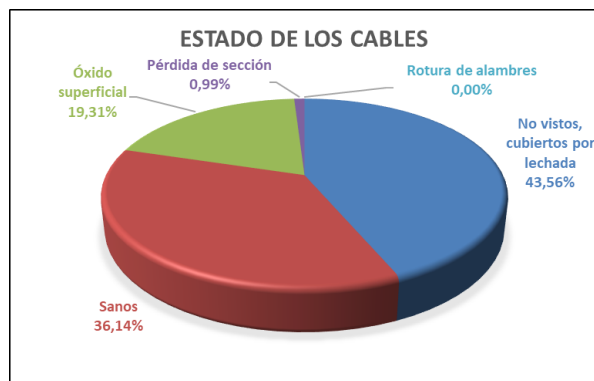


Figura 9. Estado de los cables.

2.4. Autopsia Tendón

El objeto de la auscultación fue documentar el estado del tendón que se encontró seccionado en agosto de 2021, analizando el estado de la lechada y los cables del interior de la vaina en toda su longitud.

El tendón se dividió en tramos de 130 cm aproximadamente, en los que, tras retirar la vaina de polietileno de 140 mm de diámetro exterior, se ha analizó el estado de la lechada y de los 25 cordones interiores.

En la siguiente gráfica, puede verse un ejemplo del estado de la lechada y de los cordones. En cuanto a la lechada se puede observar cómo la mayoría del tendón tiene un relleno de lechada deficiente, bien por mal relleno de la vaina o bien por el mal estado de la misma. La lechada se encontró húmeda en la mayoría del tendón analizado, aproximadamente en un 75% de su longitud, destacando la inexistencia de lechada en puntos altos de P-9 y P-10.

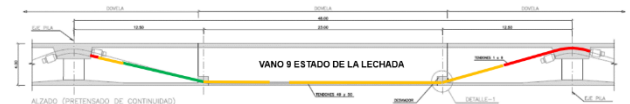


Figura 10. Estado de la lechada.

Con respecto al estado de los cables, se apreció pérdida de sección y cables rotos, en concreto en las zonas inclinadas, junto a los diafragmas de pilas.

3. Trabajos de sustitución de tendones.

El proceso de ejecución completo de reemplazo de tendones, englobó desde la implantación en obra, seguido del corte en remoto del tendón a sustituir, troceado y gestión de residuos del propio tendón, la reposición y reemplazo por uno nuevo (cables + vaina), la inyección de lechada, hasta finalizar tensándolo y colocando elementos de remate, como capots, y su posterior relleno de resina de protección. Las actividades principales de dicho proceso de ejecución, se pueden resumir en las siguientes:

- Implantación y accesos
- Medidas de protección en el interior del viaducto
- Suministros (agua, electricidad, ventilación, calefacción e iluminación)
- Destesado de tendones en servicio
- Retirada de tendones destesados o rotos y gestión de residuos
- Disposición de nuevos tendones

Finalmente se reemplazaron un total de 10 tendones, el primero de ellos y causante de la

actuación de emergencia se rompió solo por corrosión bajo tensión de los cables, y los otros 9, fueron destesados mediante corte en remoto con máquinas de hilo de diamante.

A continuación, se realiza una descripción pormenorizada de cada una de las actividades enumeradas anteriormente.

3.1. Implantación y accesos

Uno de los principales problemas a resolver en esta actuación, fue el acarreo manual desde la plataforma de acopios, ubicada a pie de talud de la propia plataforma de vía, junto al estribo 1, hasta las ubicaciones de todos y cada uno de los tendones a reemplazar. Dada las condiciones del único acceso existente y posible al interior del viaducto, el cual consistía en un pasillo en forma de L, con un ancho máximo de 1 m y mínimo de 90 cm y un recorrido de unos 11 m, hizo que se optara, como única opción viable, por el acarreo manual, tanto de materiales, como maquinaria y equipos hasta la ubicación de cada tajo en el interior del viaducto.

Además, unido a, que cada vano poseía dos desviadores de hormigón armado de unas dimensiones de unos 0,8 m de canto y 1 metro de ancho, los cuales formaban obstáculos, imposibilitando la idea de introducir cualquier tipo de útil que pudiera ir rodando sobre la cara superior de la losa inferior del cajón del viaducto.

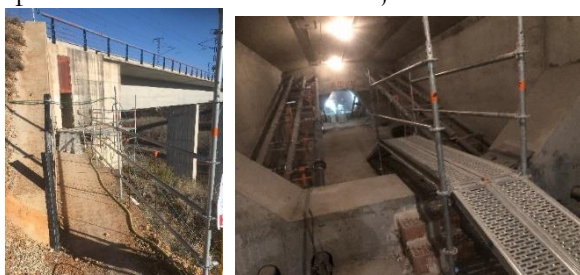


Figura 11. Acceso e interior del cajón.

Para salvar los obstáculos a modo de escalones que presentaba la disposición de desviadores, se implantaron unas rampas de andamio, cuya función era facilitar el acarreo al pasar por encima de los mismos. Igualmente se hizo necesaria hacer una plataforma de acceso con material de andamio, para poder salvar un desnivel que existía entre el pasillo de acceso

junto a aleta de estribo 1 y la puerta de acceso al interior del viaducto.

Cabe mencionar, que para el caso particular de los tendones que se anclaban en el mamparo del estribo 1, no se disponía de acceso a las cabezas de anclaje, ello conllevó a que para anclar los nuevos tendones, se tuviera que diseñar y construir un refuerzo del propio mamparo de estribo, recreciendo dicho mamparo. De este modo mediante unos marcos de volteo, se conseguía anclar los nuevos tendones por delante del mamparo de estribo.

Estos marcos iban anclados con un total de 12 anclajes activos con barras de acero de alto límite elástico Y1030 y 32 mm de diámetro, ancladas con resina tipo DYWIDOX SPK 2. El recrecido del mamparo se cosió en todo el perímetro del tablero mediante barras pasantes tipo GEWI con placa y tuerca en ambos extremos, previamente a este cosido se realizan una serie de catas con ayuda de hidrodemolición controlada con lanza, para detectar la disposición del armado actual, así como de las vainas de pretensado interior.



Figura 12. Sistema de izado de piezas.

Para poder introducir los marcos de volteos, se diseñó un sistema de izado, formado por carriles tipo IPE160 de acero S275, por los que se deslizaban unos carritos, de los cuales

colgaban unos polipastos de cadenas, de este modo se consiguió introducir y posteriormente posicionar dichos elementos metálicos (marcos de volteo), en el interior del viaducto.

Todo ello, hizo que los rendimientos de reemplazo de cada tendón disminuyeran significativamente, en comparación con actuaciones similares, pero con condiciones de acceso más favorables.

3.2. Medidas de protección.

En este trabajo las medidas de protección de las personas debían ser máximas al tener que trabajar rodeados de tendones deteriorados no detectados, que, ligado a las bajas temperaturas, pudiera producirse la rotura repentina de otro de los tendones que al romper, debido al efecto látigo, pudiera herir o dañar a un operario que estuviera trabajando en las inmediaciones del mismo. Por todo ello, se decidió disponer de un eslingado de protección. Dicho eslingado consistió en disponer eslingas dobles, con capacidad de carga de 5 t cada una, las cuales abrazaran los tendones de dos en dos y dispuestas a una distancia máxima de 1,30 m. La misión de dicho eslingado era absorber y disipar la energía provocada por la rotura de uno de estos tendones en servicio. La eficacia de esta medida se pudo comprobar tras el corte en remoto del primer tendón dañado.



Figura 13. Eslingado de seguridad.

Además, si mediante la campaña de auscultación llevada a cabo, se detectaba algún punto de los tendones, que presentara un daño significativo (proceso de corrosión avanzado de

alguno de los cables que forman el tendón, rotura o pérdida de sección de hilos, etc...), se disponía de una protección adicional, mediante colocación de puntales de suelo a techo a modo de barrera y/o montaje de cimbra de acodalamiento, también se dispusieron de eslingas dobles dispuestas cada 0,65 m a modo de mayor protección en zonas puntuales.



Figura 14. Apuntalamiento de seguridad.

3.3. Suministros.

Se dispuso de un sistema de suministro de agua formado por mangueras, ubicando puntos de suministro de agua en cada vano, de igual modo se hizo con el suministro eléctrico, disponiendo tomas de 220 v y 380 v cada tres vanos.

Con respecto al sistema de iluminación, el viaducto disponía de uno antiguo, que debería de estar instalado cuando se construyó, dicho sistema se aprovechó y se reforzó, instalando luminarias tipo LED.

Otro aspecto relevante durante toda la obra fue el sistema de ventilación, ya que el interior del cajón del viaducto, no deja de ser un espacio semiconfinado, ya que las únicas entradas de aire desde el exterior se producían por Estribo 1 y 2 y por los pasos de hombres de las pilas (huecos de unos 80 cm de diámetro). Dada la casuística, se decidió instalar un sistema de ventilación formado por 4 extractores y 4 ventiladores, de manera que se formara un flujo continuo de aire en el interior del viaducto, este

flujo de aire se iba formando por vanos, en función de dónde se ubicaran los tajos.

Debido a las bajas temperaturas, sobre todo en los meses de diciembre, enero y febrero, se instala un sistema de calefacción, formado por cañones eléctricos de generación de calor. Dicho sistema colaboraba y hacía posible que, en los momentos de inyección de los nuevos tendones, se produjera un correcto proceso de fraguado de la lechada de inyección.

3.4. Destesado de tendones en servicio.

En la actualidad, se consideran dos métodos seguros para el destensado de tendones exteriores:

- Destensado mediante corte por ventanas.
- Destensado controlado mediante abrazaderas.

Tras realizar los estudios pertinentes, se optó por un destensado secuencial del tendón mediante corte en ventanas.

El corte de los tendones se llevó a cabo mediante equipos de hilo de diamante de alta frecuencia accionado de manera remota, situados en la zona horizontal recta del tendón en el vano central. No se permitió el acceso de personal a los vanos por los que discurre el tendón durante el corte, por lo que se dispusieron equipos de respaldo que permitían continuar con el corte sin acceder a la zona de trabajo en caso de avería de la máquina principal.

Estos equipos de hilo de diamante permitieron realizar un corte muy preciso sin necesidad de retirar vaina o lechada de cemento, lo que permitió controlar el corte prácticamente alambre a alambre hasta el fallo de los cordones restantes y evitar trabajos sobre un elemento en riesgo de fallo.

Durante el corte, una parte de la energía liberada es absorbida por el pandeo del tendón y la compresión de la lechada en la vaina. Dependiendo de las condiciones de adherencia, parte de esta energía también es absorbida por la

estructura durante el destensado, generando una carga horizontal en los desviadores adherentes en los pasos de pila y en la zona de anclaje.

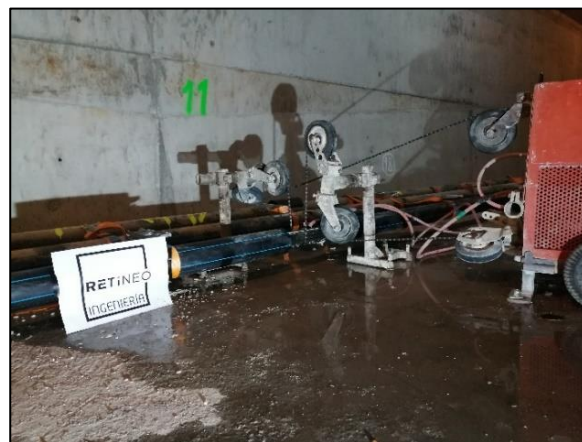


Figura 14. Corte de tendones en servicio.

Una vez realizado el destesado, fue necesario extraer los anclajes y vainas de los desviadores superiores.

Se emplearon técnicas ingeniosas para la extracción de las vainas adheridas en los desviadores de los puntos altos, siendo necesario en algunos casos aplicar tracciones de hasta 8 toneladas para lograr su extracción. La extracción de los anclajes y del tendón en la zona de la trompeta se llevó a cabo mediante herramientas accionadas por gatos hidráulicos, requiriendo fuerzas del orden de 100-180 toneladas para la extracción.

3.5. Retirada de tendones.

Una vez destesados los tendones en servicio, se procedió a trocear los tendones en multitud de trozos de menor longitud, que pudieran ser manejables por dos operarios. Dicho corte se realizó con ayuda de una radial de gasolina tipo Hilti con disco de corte 350/25mm SPX metal y refrigerado con agua. Se trocearon en trozos de unos 2-3 metros de longitud, permitiendo realizar en el interior del propio viaducto la retirada selectiva de los residuos, separando la vaina de polipropileno, la lechada de cemento y el acero de los cables. De este modo, se consumaban dos objetivos, por un lado, hacer manejables manualmente los tendones para poder extraerlos del interior del viaducto, y por otro lado, el hacer una separación selectiva de residuos en origen.

Una vez separados, se acarrearón manualmente con ayuda de herramientas manuales y carretilla de mano, desde el interior del viaducto a la zona de acopio, ubicada en el exterior del mismo, lugar dónde se ubicaban los distintos contenedores de gestión de residuos.

Debido a lo laborioso y lentitud del proceso, se decidió extraer los residuos por el interior del viaducto, mediante el montaje de trompas de desescombro ubicadas en los pasos de hombre de las pilas.

3.5. Disposición de nuevos tendones.

El principal criterio para el diseño del nuevo tendón se centró en mejorar la durabilidad del sistema frente a la corrosión. Se optó por utilizar un sistema de postesado tipo PL2 con 4 barreras de protección. El tendón instalado es el VSL E-WT PLUS 6-22, del tipo activo-activo y está compuesto por un haz de 22 cordones de acero S7 Y1860 Ø15,7 (150 mm²) autoprotegidos, engrasados y protegidos individualmente. Estos cordones están contenidos dentro de una vaina global de polietileno de 140 mm SDR17, que se encuentra dentro de una matriz cementicia de lechada VSL HPI. Los anclajes utilizados para 22 cordones cuentan con un sistema de sellado especial que permite la inyección del tendón antes de realizar el tesado final.

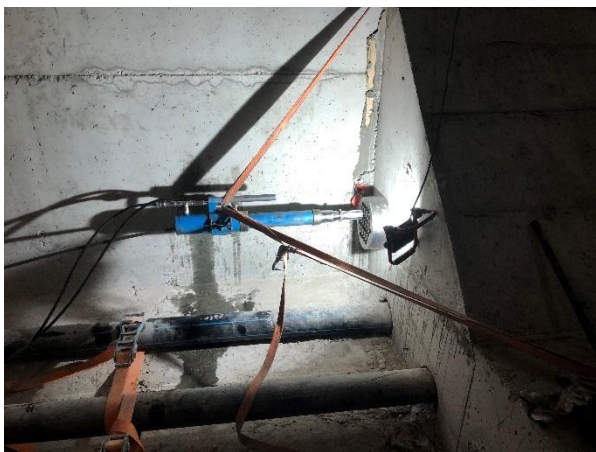


Figura 15. Introducción de nuevos cordones.

Este sistema presenta mejoras significativas en comparación con la solución original. Por ejemplo, permite la sustitución total

del tendón, incluso cordón por cordón, lo que permite operaciones de retesado posterior e incluso destesado mediante un gato hidráulico. Además, en caso de rotura de uno de los cordones, el mecanismo de fallo es individual y no se produce transferencia de carga hacia los demás cordones, lo que resulta en una pérdida gradual de eficiencia.

Otro aspecto destacable es que se realizaron intervenciones poco invasivas en la estructura para adaptar el nuevo sistema de postesado. Se llevaron a cabo perforaciones de alta precisión en el hormigón para reutilizar las perforaciones existentes en los desviadores superiores y los anclajes. Además, fue necesario enhebrar la nueva vaina a través de las perforaciones existentes.

La instalación de los nuevos anclajes requirió la disposición de distanciadores externos para crear suficiente espacio para alojar las nuevas trompetas de polietileno en su interior, cumpliendo con los estándares actuales de distancias y desviaciones máximas permitidas.

La nueva vaina de polietileno de alta densidad es continua de extremo a extremo y se une a la trompeta mediante soldadura a espejo. Fue necesario volver a enhebrarla a través de los espacios negativos dejados por las vainas existentes en la zona de las pilas. Además, se colocaron tramos telescópicos en la vaina para controlar el enfilado de los cordones y permitir el acomodo de los cables. Todas las uniones se realizaron mediante soldadura a espejo o manguitos de electrofusión, mientras que los collarines de inyección se atornillaron y no se utilizaron manguitos termorretráctiles para unir las vainas.

La instalación de los cordones en el interior de la vaina se realizó enhebrando todo el haz de cordones mediante tracción, lo que reduce las posibilidades de enredo o trenzado y mejora el comportamiento global del tendón durante la inyección y el tesado.

Después del enfilado, se realizó un tesado inicial a baja carga para alinear los cordones y la

vaina. Este tesado se llevó a cabo utilizando un gato de tesado unitario. Posteriormente, se soldó completamente la vaina en los tramos telescópicos y de unión, evitando así tensiones inducidas en la vaina debido al tesado posterior al soldado. Se realizaron pruebas de estanqueidad antes de la inyección utilizando una bomba de vacío para detectar posibles fugas.



Figura 16. Introducción de nuevos cordones.

La siguiente fase fue la inyección asistida por vacío de una lechada cementicia ensacada (VSL HPI) diseñada especialmente para esta aplicación. El objetivo de la inyección era rellenar el espacio entre los cordones en la zona de los desviadores y proporcionar protección anticorrosiva y mecánica al tendón. El equipo utilizado para la inyección contaba con una mezcladora coloidal, y se utilizó una bomba de vacío que actuaba a -0.850 bar para extraer el aire del interior de la vaina y garantizar un llenado completo.

Durante la aplicación de la lechada, se realizaron ensayos de fluidez de cada una de las mezclas y se tomaron muestras para su posterior análisis en laboratorio.

Debido a las limitaciones de espacio, el tesado se realizó utilizando un gato unitario, realizando múltiples pasadas en varias etapas. Fue necesario realizar el retesado desde el extremo opuesto al punto de tesado inicial.

En el estribo 2, fue necesario corregir la alineación del tendón original, ya que presentaba desviaciones que no eran compatibles con el

sistema actual. Para ello, se realizó una nueva perforación concéntrica en el hormigón. Para el retesado del tendón en la zona del estribo entre el espaldón y el tablero, se utilizó un gato hidráulico ultra compacto que requería el montaje desde el lado opuesto, ya que el espacio disponible era de apenas 450 mm.