

Sustitución de 4 tirantes incendiados en el puente Vasco de Gama en Lisboa

Replacement of 4 stay cables damaged by fire on Vasco de Gama bridge in Lisbon

Patrick Ladret^a, Rui Monteiro^b, Jean Michel Odin^c, Nicolas Trotin^d, Michel Virlogeux^e

^a Ingeniero Civil. ENTPE. Freyssinet España. Director Desarrollo Internacional. pladret@freysinet-es.com

^b P Ingeniero Civil. Lusoponte Director de explotación. rui.monteiro@lusoponte.pt

^c Ingeniero Civil. ENISE. Arcadis ESG. Director adjunto Polo Obras y Geotecnia. jeanmichel.odin@arcadis.com

^d Ingeniero Industrial. Freyssinet España. Ingeniero Departamento Técnico. nicolas_t@freysinet-es.com

^e Ingeniero Polytechnique / Ponts et Chaussées. Michel Virlogeux Consultant SAS. Consultant. virlogeuxconsultant@orange.fr

RESUMEN

En la noche del 07 de junio de 2021, el incendio de un autobús en el vano central dañó cuatro tirantes. Las inspecciones y ensayos permitieron dictaminar que la estructura era segura pero que los daños provocados en las distintas protecciones de los tirantes obligaban a su sustitución para restablecer la vida útil requerida por el concedente. Una extensa fase de preparación y verificación de la estructura permitieron ejecutar el cambio de los tirantes manteniendo las 6 vías de circulación en servicio sin reducción de la operatividad. Por ello se desplegó una solución sin grúa y con accesos colgados diseñados a medida. Las operaciones de sustitución se realizaron tirante por tirante en un tiempo de 4 meses.

ABSTRACT

On the night of June 7th, 2021, a bus caught fire in the central span damaging four stay cables. The inspections and tests quickly performed allowed to determine that the structure was safe but that the protections of the stay cables were destroyed, forcing their replacement to restore the life span required by the owner. An extensive phase of preparation and verification of the structure allowed to carry out the stay cables replacement while maintaining the 6 traffic lanes in service without reducing operability. For this reason, a crane-free solution was deployed with custom-designed hanging accesses. The replacement operations were performed cable by cable over a period of 4 months.

PALABRAS CLAVE: puente atirantado, tirante, incendio, sustitución, durabilidad.

KEYWORDS: cable stay bridge, stay cable, fire, replacement, durability.

1. Descripción de la estructura

El puente Vasco de Gama, inaugurado en 1998, mide unos 12.3 km, 9 de los cuales se sitúan por encima del río Tajo, en Lisboa. El tablero consta de un ancho de 30 metros que soporta 3 vías de circulación en cada sentido.

El puente consta de 5 estructuras, 4 de acceso y un puente principal, atirantado con un

vano central de 420 m de longitud y vanos laterales de 203 m. Las torres en forma de H culminan a 150 m de altura. Las cimentaciones constan de 44 pilotes de 2,2 m de diámetro de hasta 90 m, están diseñadas para soportar el impacto de un barco de 30.000 toneladas. El tablero está formado por una estructura mixta

con 2 vigas laterales de hormigón y una losa de hormigón apoyada sobre vigas transversales metálicas. El galibo del puente es de 47 m sobre el nivel de las aguas del canal de navegación. El tablero está sustentado por un total de 192 tirantes, repartidos en 8 haces, con 1 tirante cada 8 metros, todos los tirantes del haz estando en el mismo plano vertical, paralelo al eje del longitudinal del tablero.

El sistema de tirantes se compone de cordones paralelos con triple protección (galvanizado, encerado, envainada) de 1770 MPa de resistencia y 150 mm² de sección, contenidos en una vaina global con doble hélice helicoidal de color blanco en toda la longitud del tirante, hasta el tubo antivandálico que cubre una altura proyectada de 2,50 m desde la acera.

Los cordones paralelos se anclan de forma individual en anclajes situados por debajo del tablero (fijo, activo) y dentro de la torre (regulable, pasivo).

Todos los tirantes disponen de un sistema de amortiguamiento combinando dispositivos

de elastómero e hidráulicos en la salida del tablero.

Además de ser una obra colosal con recursos de prefabricación, ensamblado y de montaje desmesurados, el puente Vasco de Gama marca un hito en el sector del tirante con el desarrollo de la vaina coextrusionada con doble hélice para mejorar el perfil aerodinámico, el uso de esta vaina para enfilar los cordones y el desarrollo de los amortiguadores internos hidráulicos.

El puente está gestionado por Lusoponte que es la concesionaria actual de las travesías del Tajo: Puente Vasco de Gama y Puente del 25 de abril. Ambos puentes de la travesía constan de un peaje en el sentido de entrada únicamente. Actualmente el puente de Vasco de Gama tiene una intensidad de tráfico de más de 30000 vehículos por día y sentido.



Figura 1. Vista general del tramo atirantado.

2. Descripción del accidente

Durante la noche del 7 de junio de 2021, un autobús se incendió mientras cruzaba el puente principal Vasco Da Gama en Lisboa. El autobús, que iba de Lisboa hacia Montijo, se detuvo en el carril derecho de la carretera, entre los tirantes HNC 21D y 22D, aproximadamente a 2 metros del haz de tirante. El fuerte viento empujó las llamas hacia el haz de tirante y las vainas de los tirantes 21 y 22 acabaron inflamándose. Los bomberos llegaron a las 11:58 pm y comenzaron a apagar el fuego en el tirante HNC 22D y neutralizaron la combustión del autobús en cerca de media hora. Así que se estima que la exposición de los tirantes a altas temperaturas superó los 37 minutos.

3. Inspección y análisis

Las operaciones de inspección y diagnóstico comenzaron desde el día siguiente, detectando daños en 4 tirantes (HNC20D a HNC23D), con los tirantes HNC21D y HNC22D siendo los más afectados.



Figura 2. Daños en el HNC22D.



Figura 3. Daños en el amortiguador y los cordones.

3.1 Inspección visual

La primera inspección arrojó una fuerte degradación de las vainas, tubos, amortiguadores y de las barreras de protección del cordón.

Esta inspección fue acompañada de un levantamiento topográfico de ambas vigas longitudinales del tablero en la zona próxima a los tirantes afectados y sus simétricos para comparar el perfil del lado dañado con el del lado opuesto.

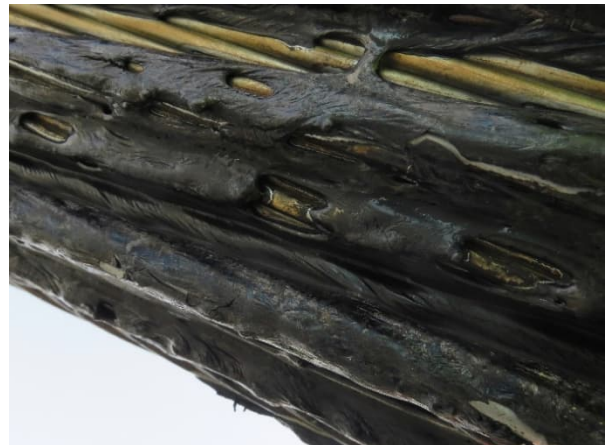


Figura 4. Daños en el haz de cordones.



Figura 5. Daños en la vaina HNC23D.

3.2 Medición de fuerza y topografía

La segunda inspección consistió en realizar una topografía completa del puente y una medición de la fuerza de los tirantes de ambas vigas en la parte central del vano y sus homólogos del vano de retenida. Los cuatro tirantes dañados se midieron tanto por el método de cuerda vibrante como con un pesaje con gato hidráulico, lo que permitió establecer una correlación entre los dos métodos y proceder a la medición de fuerza mediante el método de cuerda vibrante únicamente en el resto de los tirantes.

El objeto de esta medición fue el de verificar la posible pérdida y redistribución de fuerza, así como alimentar los modelos de cálculo y disponer de un punto de partida para conocer tanto la geometría como la fuerza de los nuevos tirantes por sustituir.

3.3 Extracción de muestras y ensayos

Para obtener datos adicionales sobre el estado de los cordones, se extrajeron, en una tercera fase, 2 cordones en cada uno de los dos tirantes más afectados. Con las muestras se realizaron ensayos de tracción y fatiga y unos análisis micrográficos. Los resultados indicaron que la dureza y estructura cristalina de los hilos no había variado, y que los cordones seguían siendo dúctiles, con una resistencia a tracción parecida a la nominal; sólo su comportamiento a fatiga resultó inferior a lo esperado (rotura a un millón de ciclos). Además,

los análisis micrográficos mostraron la degradación de la capa de cinc superficial.

Estos resultados hacen presagiar que el tiempo de exposición no fue suficiente para que la temperatura de los cordones supere el umbral de transformación microcristalina que se acompaña de una pérdida de resistencia tal como se explica gráficamente en el Eurocódigo 2, parte 1-2, figura 3.3 [2].

Se realizó adicionalmente un control del estado de fisuración de la cara inferior de las vigas longitudinales de hormigón del tablero.

3.4 Resultados de las inspecciones

Los resultados de las inspecciones y posterior análisis fueron que:

- No se observaron deformaciones anómalas del tablero,
- No hubo redistribución de la fuerza entre los tirantes afectados a largo del tablero longitudinal y transversalmente,
- No habiendo padecido los cordones una pérdida de capacidad resistente, la estructura no se encontraba en situación de riesgo a corto plazo. No obstante, se observó una reducción de su capacidad frente a la fatiga,
- Los tirantes no cumplían los requisitos de durabilidad de vida útil remanente del puente (100 años) tanto mecánicamente por la bajada de resiliencia a fatiga y el daño en todas las barreras de protección contra la corrosión [2].

Por ello se tomó la decisión de sustituir los 4 tirantes afectados para restablecer la durabilidad requerida. Debido al derretimiento del polietileno de los cordones, éstos se encontraban pegados entre sí, imposibilitando la sustitución parcial del haz. Por lo tanto, se debía sustituir integralmente cada uno de los tirantes.

Tabla 1. Elementos por sustituir.

Tirante	H20	H21	H22	H23
Tubo guía	X	X		
Tubo AVT	X	X	X	
Amortiguador	X	X	X	
Vaina Global		X	X	Parcial
Cordones	X	X	X	X



Figura 6. Léxico de componentes del tirante.

4. Estudio de factibilidad

En esta fase Arcadis (el proyectista original del puente) bajo la supervisión del profesor Virlogeux (representante de la administración) modelizó las distintas fases de la sustitución de los tirantes.

Las hipótesis de partida consistieron en viabilizar soluciones de sustitución de los tirantes sin recurrir al corte total de tráfico y sin el empleo de tirantes provisionales.

La sustitución de los tirantes requiere el despliegue de medios de acceso en altura para acceder al tirante fuera de la torre y por debajo del tablero, ya sea mediante alpinistas, plataformas de trabajo aéreo suspendidas o cestas telescópicas de gran envergadura, así como medios de izado de cargas para descender e izar la vaina de los tirantes. El uso de grandes equipos desde el tablero podía suponer una afectación grande a las condiciones de uso del puente, así como unas cargas no despreciables en la estructura.

De cara al uso del puente durante los trabajos, y la carga de servicio correspondiente, se tuvieron que barajar varias opciones con diferentes

números de carriles abiertos y velocidades de circulación.

La modelización de la estructura enseñó que no había redistribución de fuerzas entre el lado aguas abajo y el lado aguas arriba del puente; asimismo, con los resultados del modelo, se mostró que no era necesario instalar un tirante provisional y que se podía proceder a la sustitución tirante por tirante.

5. Descripción de la solución elegida

5.1 Reparto de carriles

Se escogió finalmente la solución de 2x3 vías estrechas con velocidad reducida para no reducir la capacidad de este eje principal de acceso a Lisboa.

Para ello, se habilitaron 4 carriles en el sentido de entrada a Lisboa y 2 carriles en el sentido de salida, dejando un pasillo de 5.9 metros de ancho para la realización de los trabajos; se protegió ese pasillo mediante una barrera de hormigón en toda la longitud de la zona de trabajo.



Figura 7. Vista general en planta.

5.2 Medios de acceso

Puesto que los tirantes afectados eran los 4 más largos del vano, se necesitó acceso a la parte más alta de la torre. El uso de grúas y plataformas elevadoras hubiera requerido cortes de tráfico combinados con las incertidumbres debidas al viento (con velocidades frecuentemente superiores a 40 km/h); como consecuencia, se viabilizó una alternativa mediante andamio tubular colgado desde la parte superior de la torre.

Se instalaron mallas alrededor del andamio y por debajo del mismo, durante su montaje y su utilización, reduciendo así drásticamente la posibilidad de caída de objetos.

El acceso al anclaje inferior se realizó mediante la plataforma de servicio. Puesto que el acceso original a la plataforma de servicio se situaba en las torres, se montó un andamio colgado de acceso a la misma en el centro de vano para reducir los tiempos de traslado.

5.3 Medios de izado

Para evitar el uso de grandes grúas y los consiguientes cortes de tráfico, se diseñó una viga en voladizo, librando el ancho del andamio colgado, equipada con un cabrestante lineal eléctrico, dotado de una línea de seguridad. Para eliminar los riesgos de caída de una vaina sobre los carriles en servicio, se montó una red de cuerdas entre la torre y el tablero.

5.4 Orden de sustitución

El orden de sustitución de los tirantes fue dictado por la magnitud de los daños, actuando primero en los tirantes HNC21D y HNC22D. Se siguió con el tirante más largo HNC23D, donde se recuperó el acero activo sano para reinstalarlo en HNC20D.

De la misma forma, las vainas de los 3 tirantes más dañados se cambiaron en su totalidad mientras que se pudo reutilizar parte de la vaina del tirante HNC20D.

6. Inspección y análisis

Freyssinet y Arcadis trabajaron en conjunto para definir las fases principales de la sustitución y las diferentes cargas, tanto su magnitud como su posición, necesarias en el tablero para la correcta ejecución de los trabajos.

Arcadis desarrolló el proyecto de sustitución teórico etapa por etapa y elaboró una lista de puntos de control (fuerzas y deformaciones, principalmente) que se tuvieron que respetar durante la ejecución.

En cada fase definida por Arcadis, Freyssinet elaboró un plano con todas las cargas (equipos, materiales, vehículos) presentes en la zona de trabajos para que se puedan introducir en el modelo y comparar el comportamiento real de la estructura con el teórico.

Con el fin de evitar la aparición de fisuras en la cara inferior de la viga longitudinal del lado aguas abajo, fue necesario llevar a cabo un retesado temporal de los tirantes adyacentes HNC20D a HNC24D. Al ser un aumento de fuerza temporal, se realizó desde el anclaje superior regulable mediante un el uso de un gato anular puesto que es una operación reversible.

En paralelo, se instalaron células de carga en el anclaje inferior de 7 tirantes (HNC18D a HNC24D) para disponer de lecturas de fuerza instantáneas.

De forma general, la secuencia definida para la sustitución de cada tirante fue:

- Levantamiento topográfico y lectura de fuerzas,
- Destesado cordón por cordón y descenso de la vaina,
- Levantamiento topográfico, lectura de fuerza y medición de la longitud de referencia de los cordones desmontados,
- Colocación de los equipos, instalación de la vaina y los cordones nuevos, tesándolos al 80% de la carga objetivo,
- Retirada de equipos y cargas del tablero,
- Levantamiento topográfico y lectura de fuerzas,
- Tesado final al 100% del tirante nuevo.

7. Organización de la obra y gestión de coactividad

La gestión del impacto de los trabajos sobre los usuarios, la simultaneidad de los trabajos de sustitución con el control, las restricciones de uso permitidas por la administración y los riesgos inherentes a los trabajos de sustitución fueron estudiados, fase por fase, en una mesa de trabajo conjunta con el concesionario, el proyectista, Freyssinet y los principales intervinientes en la operación. Así se validaron los métodos de trabajo, los accesos, la secuencia de trabajos fase por fase con las restricciones de tráfico y los puntos de control durante la sustitución.

La instalación de la obra se dispuso al pie de la torre norte siendo una de las zonas con menor impacto en la estructura durante el cambio de los tirantes. Esta zona en altura es particularmente expuesta al viento por lo que se dispuso un sistema de seguridad antivuelco de los contenedores y oficinas.

8. Principales fases de la sustitución de los tirantes

8.1 Trabajos preliminares

Además de las operaciones definidas por Arcadis, se tuvieron que ejecutar otros trabajos previos al inicio de la sustitución de los tirantes.

8.1.1. Refuerzos estructurales y accesos

La losa superior de la torre forma una tapa que se colocó al finalizar la construcción de la estructura y por lo tanto no está preparada para recibir cargas importantes. Para poder apoyar el andamio y la viga de izado (ver figuras 8 y 9), se añadieron unas ménsulas debajo de la tapa y tejidos de fibra de carbono para reforzar las zonas de apoyo de la losa.

Adicionalmente, se diseñaron estructuras de retenida en el interior de la torre que permitieron no solicitar a tracción la tapa superior, lo que hubiera provocado un levantamiento de ésta.

Una vez instalados los refuerzos y las estructuras de retenida vertical, se montó el andamio en su parte superior, para poder montar posteriormente la parte exterior de forma descolgada.



Figura 8. Viga de izado en curso de montaje sobre tapa de cierre de pilono.



Figura 9. Refuerzo en el interior del pilono para el apoyo y tiro de la viga de izado.

8.1.2. Preparación de los tirantes

La vaina global de los tirantes HNC21D y HNC22D fue expuesta a las llamas durante el incendio y se fundió; bajo el efecto de su peso, a medida que se iba consumiendo, fue bajando. En total, se perdió una longitud de 20 m en ambos tirantes. Para poder guiar los cordones durante su destesado y evitar una posible caída a la calzada en servicio en caso de que ocurriera un incidente durante los trabajos, se decidió reconstruir temporalmente los 20 metros de vaina mediante tubos metálicos en dos semi-cáscaras. Se montaron en tramos de 2 metros, empujando hacia arriba la vaina y los tramos conectados para instalar el siguiente.

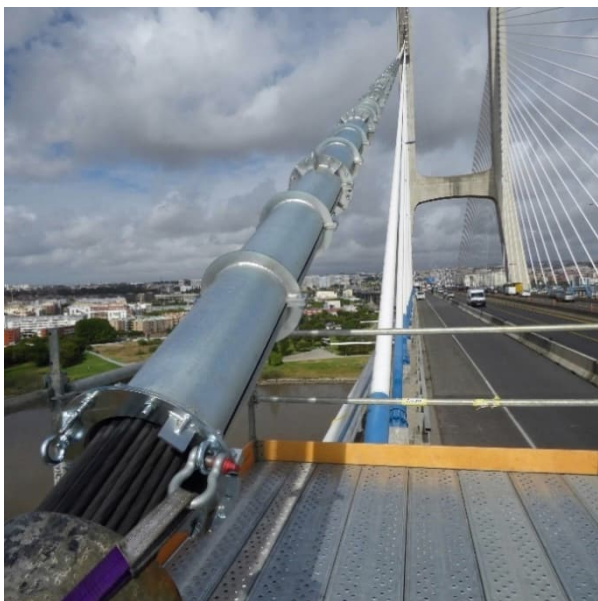


Figura 10. Reconstrucción temporal de la vaina.

8.1.3. Banco de medición y corte

A proximidad de los tirantes, se estableció una bancada destinada a recibir los cordones desmontados para poder medir algunos de ellos y disponer de su longitud de referencia o longitud a tensión nula. Para ello, sobre la bancada, se colocó un cordón con marcas de referencia dispuestas mediante topografía.

La bancada sirvió igualmente para cortar a la longitud correcta el primer cordón (“o de referencia”) de cada tirante.

8.2 Desmontaje de un tirante

Los tirantes se destesaron desde el anclaje inferior, actuando en los cordones, uno por uno, con un gato unifilar. Una vez eliminada la carga remanente en un cordón, se quitaba su cuña en el anclaje superior y se procedía a su descenso en el interior de la vaina hasta dejarlo tendido en la bancada.

El último cordón de cada tirante sirvió de soporte para el descenso controlado de la vaina mediante el uso del cabrestante lineal en la viga en voladizo instalada en la parte superior de la torre (ver figura 11).

La retirada de todos los cordones del tirante permitió extraer los anclajes existentes para su inspección y mantenimiento.

8.3 Preparación e instalación del tirante nuevo

La nueva vaina global se fabricó con la misma longitud que la vaina desmontada. Asimismo, el cordón de referencia nuevo se prefabricó en base a la longitud de los cordones desmontados.

Los tirantes nuevos se instalaron como un tirante en una estructura nueva, mediante un sistema de vaivén viajando por el interior de la vaina, después de haberla izado sin grúa, con el cabrestante situado en la viga en voladizo.

9. Accesos elegidos

Los accesos fueron diseñados y suministrados por la empresa ULMA; su diseño fue revisado por la empresa MC2 (TYPESA). Un muestreo importante de los anclajes de los andamios al hormigón fue ensayado a tracción por un técnico independiente hasta una carga de 1000 kg. La conformidad de los andamios fue a su vez comprobada por un supervisor externo.

9.1 En la torre

Se transportaron todos los componentes del andamio mediante sistemas de izado en el interior de la torre, hasta salir por su parte superior. Después de haber montado la parte de acceso del andamio situado sobre la torre, se procedió a construir la parte colgada, desde arriba hacia abajo, para alcanzar en total una altura de 18 m.

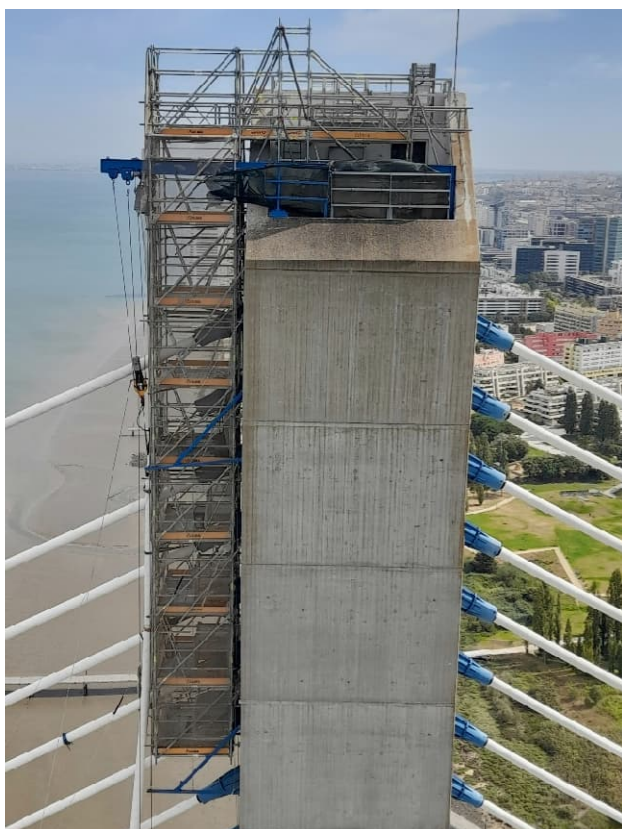


Figura 11. Andamio y viga en voladizo.

El montaje del andamio de la torre se hizo sin la ayuda de grúas, para ello se dispusieron medios de elevación para elevar todos los

componentes hasta la cima del pilono desde su interior. Se aisló la zona de montaje del andamio con mallas laterales e inferiores, como protección frente a la caída de objetos, lo que permitió trabajar sin afectar al tráfico.

9.2 Debajo del tablero

El acceso a la plataforma de servicio existente se desplazó al centro de vano con la construcción de un andamio colgado por un lateral del tablero y fijado en su posición mediante anclajes y un contrapeso. El montaje se realizó con la asistencia de un camión grúa situado en el pasillo reservado para los trabajos.

Se añadió una estructura de andamio ligero en la plataforma inferior móvil para alcanzar los anclajes.

Cabe indicar que la capacidad limitada de la plataforma hizo necesario el diseño de una estructura independiente de soporte anclada al hormigón del tablero para el desmontaje y el mantenimiento de los anclajes.



Figura 12. Vista general – plataforma de servicio móvil y acceso.

10. Control de carga y geometría del puente

Fueron en total 12 las operaciones de control de carga y levantamiento topográfico con corte total del tráfico, durante la noche, y con aviso a las autoridades y medios de comunicación 5 días antes del corte. Unos datos adicionales como la velocidad de viento y la temperatura en varios puntos de la estructura se obtuvieron mediante el sistema de monitoreo del puente.

Después de la sustitución de los 4 tirantes afectados y la restitución del estado tensional de los tirantes que se habían retesado inicialmente, se realizó un último levantamiento topográfico completo de la estructura (vano atirantado, con 72 puntos en el tablero y 24 en las torres) y una medición de fuerza mediante el método de la cuerda vibrante de todos los tirantes, acompañada por un pesaje de 16 tirantes con gato anular hidráulico, para definir el estado final de la estructura y sus tirantes.

11. Conclusiones

Los trabajos de sustitución, incluyendo las instalaciones de obra, el montaje de los andamios y los trabajos de montaje de tirante, se realizaron en cinco meses entre el 18/04/22 y el 20/09/2022.

La última campaña de topografía y medición de fuerzas permitió verificar que la estructura había vuelto a su geometría inicial (antes del incendio) y que las fuerzas en los tirantes se habían restablecido. Sirvió asimismo de base para los levantamientos topográficos periódicos que se llevan a cabo en la estructura, conforme a lo requerido por su manual de explotación.

El desmontaje completo de los tirantes afectados confirmó el buen estado de los componentes del tirante no expuestos a las llamas,

como se pudo comprobar en varias campañas de inspección especial durante la vida del puente. Entre otras cosas, se comprobó la estabilidad del color de la vaina blanca, 23 años después de la construcción, y la ausencia de daños tanto en los anclajes como en la longitud libre de los cordones.

Agradecimientos

Agradecemos a Lusoponte, y en particular al ingeniero Monteiro, la gestión del incidente para conducir tanto a la inspección, desarrollo del proyecto de sustitución, análisis y mitigación del riesgo de la sustitución sobre la estructura en uso.

Agradecemos particularmente la supervisión del profesor Virlogeux, quien ha promovido mantener las 6 vías de circulación durante los trabajos de reparación simplificando la gestión de tráfico, el riesgo de incidente en la vía, la interfaz con las autoridades por no reducir en ningún momento el servicio requerido al concesionario.

Agradecemos al trabajo conjunto con Arcadis, su disponibilidad e integración de las problemáticas de la obra para ayudarnos a cumplir la planificación de los trabajos.

Agradecemos a ULMA y MC2-TYPSA por su contribución y aporte para los medios de acceso.

Referencias

- [1] Eurocódigo 2 parte 1-2.
- [2] Boletín 89 de la FIB.