

Mantenimiento y rehabilitación de sistemas de atirantamiento: tecnologías, patologías tipo, inspección, monitorización y reparaciones

Maintenance and rehabilitation of stay cable systems: Technologies, typical defects, inspection, monitoring and repairs

Nicolas Troitin^{a,*}, Jorge Sánchez de Prado^b, Patrick Ladret^c y Pablo Vilchez Motino^d

^a Ingeniero Industrial, Freyssinet España, Ingeniero Departamento Técnico, Madrid, España

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Freyssinet España, Director Área de Estructuras Cableadas y Mantenimiento, Madrid, España

^c Ingeniero Civil, Freyssinet España, Director Desarrollo Internacional, Madrid, España

^d Ingeniero Industrial, Freyssinet España, Director Técnico, Madrid, España

Recibido el 11 de abril de 2017; aceptado el 26 de mayo de 2017

RESUMEN

Este artículo trata de las tecnologías más comunes de sistemas de atirantamiento y las principales patologías que se han registrado a lo largo de las inspecciones llevadas a cabo en los últimos años. A medida que se va observando y conociendo mejor la variada casuística de problemas en tirantes, se desarrollan nuevas técnicas de inspección de sus distintos componentes y nuevas soluciones para su mantenimiento o mejora. Las publicaciones al respecto son numerosas, así que este artículo se centrará en los métodos de inspección y mantenimiento con aplicaciones más recientes.

© 2017 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Publicado por Cinter Divulgación Técnica S.L.L. Todos los derechos reservados.

PALABRAS CLAVE: Mantenimiento; Rehabilitación; Inspección; Tecnologías de tirantes

ABSTRACT

This article presents the most common technologies for stay cables systems, and the main defects that have been registered during the inspections carried out in the last few years. When the defects on stay cables are observed and their understanding improves, new methods for the inspection of the components of a stay cable are developed, as well as new solutions for their maintenance and upgrade. There are many publications on this issue, thus this article will mainly focus on the inspection and maintenance methods more recently developed and used on site.

© 2017 Asociación Española de Ingeniería Estructural (ACHE). Published by Cinter Divulgación Técnica S.L.L. All rights reserved.

KEYWORDS: Maintenance; Rehabilitation; Inspection; Stay cable technologies

1

TECNOLOGÍAS EMPLEADAS EN SISTEMAS DE TIRANTES Y PATOLOGÍAS MÁS FRECUENTES

Las tecnologías empleadas en los sistemas de tirantes están en constante evolución desde hace más de 35 años. A medida que se han ido descubriendo patologías, y gracias a los avances tecnológicos, se han modificado las características de los cables, de las barras y de los sistemas de protección de tirantes.

A continuación se describen brevemente las tecnologías más comunes y las patologías asociadas.

1.1. Cables cerrados y helicoidales

Compuestos por un núcleo central de hilos paralelos situado en el interior de una espiral de una o varias capas de hilos en forma de Z, los cables cerrados iban antiguamente cubiertos por una protección formada por una tela embetunada o una capa de pintura. Actualmente disponen de una

* Autor para correspondencia.
Correo electrónico: nicolas_t@freysinet-es.com (N. Troitin).

vaina extrusionada en el propio cable, recubrimiento metálico anticorrosivo y/o productos de relleno de intersticios. Las primeras aplicaciones datan de los años 1950 a 1970. Se siguen empleando en cables para cubiertas y péndolas, principalmente.

Generalmente por falta de mantenimiento, los primeros cables cerrados se encontraban expuestos a la intemperie y empezaron a desarrollar patologías, principalmente originadas por la corrosión de los hilos: rotura de hilos en capa exterior (fig. 1), desprendimiento de varios hilos rotos, entrada de agua en las capas interiores y corrosión no visible de los hilos (detectable por el cambio puntual del diámetro del cable).

Las zonas de anclaje en macizos de hormigón suelen ser puntos de acumulación de agua, no accesibles para la inspección. Los cables helicoidales, formados por hilos trenzados, presentan patologías similares.

1.2. Cordones de pretensado de 7 alambres en vaina inyectada

Constan de una tecnología similar a la de los tendones de pretensado exterior: cordones de 7 alambres, con o sin galvanizado, paralelos y cubiertos por una vaina global cuyo interior se inyecta con lechada de cemento. Un hilo con forma de hélice, colocado alrededor del haz, de cordones permite crear una separación entre estos y la vaina, en la generatriz superior del tirante, para facilitar el paso de la lechada y dejar un recubrimiento mínimo.

Las zonas de anclaje (en algunos casos hasta el desviador) van inyectadas con resina epoxy. Esta tecnología se empleó a partir de mediados de los años setenta hasta mediados de los años ochenta. Existen varios casos de tirantes donde se instalaron barras de pretensado con acopladores en vez de cordones. Por su longitud limitada, el uso de barras introduce un componente adicional: los acopladores, que pueden revelarse un punto débil en un tirante sometido a fatiga.

Las patologías más comunes son: fisuración de la vaina global, agrietamiento de la lechada (aparición del fenómeno de *fretting corrosion*), entrada de agua y corrosión de los cordones de acero (o barras), variación de volumen en ciclo de hielo/deshielo, etc.

El agrietamiento de la lechada favorece la circulación de agua más allá de las fisuras visibles en la vaina de polietileno. Adicionalmente, se ha observado que las variaciones de



Figura 2. Fisura longitudinal en acoplador de tirante de barras.

temperatura conducen al bombeo de vapor y humedad en el interior del tirante, en tramos con vaina dañada.

En tirantes de barras se pueden apreciar, además, fisuras en los acopladores por ciclos de fatiga (fig. 2).

El desconocimiento del comportamiento de la lechada en cables verticales (exudación excesiva) y las limitaciones de la época en cuanto a aditivos y equipos de inyección provocaron, en algunos casos, la aparición de «falsos llenados» que dejaban un tramo del tirante sin lechada y, por tanto, los cordones sin protección.

Para remediar este problema y evitar altas presiones de inyección, se solía perforar la vaina en distintos puntos para inyectarla en varias fases. Aunque ese proceso era más seguro, dejaba varios puntos débiles en la vaina, favoreciendo su fisuración (por concentración de tensiones) o la entrada de agua (en caso de falla, con el tiempo, del sistema de sellado del agujero de inyección) (fig. 3).

1.3. Hilos paralelos en vaina inyectada y anclaje con resina

Más conocidos como *button head wires* o cables HiAm, son una solución similar a la de cordones de pretensado en una vaina inyectada. Se utilizaron por primera vez en tirantes en 1960, y de forma continua, hasta 1985. Las patologías observadas son también muy parecidas: fisuración de la vaina y de la lechada, entrada de agua y corrosión de los hilos (fig. 4).

Mientras que los tirantes con tecnología de cordones paralelos (PSS) se ensamblaban in situ, los tirantes de hi-



Figura 1. Hilos exteriores rotos en cable cerrado.



Figura 3. Corrosión en punto de inyección (izquierda) y en interior de vaina fisurada (derecha).

los paralelos (PWS) se prefabricaban y se transportaban en bobinas, sometiendo la vaina de polietileno a tensiones altas que, con el tiempo, favorecen la fisuración bajo tensión prematura y reducen la vida útil de esta primera barrera de protección del tirante.

1.4. Cordones de 7 alambres, autoprotegidos y sin vaina global

Este sistema, empleado desde finales de los años ochenta hasta mediados de los noventa, presenta las mejoras aportadas a los cordones a lo largo del tiempo, de manera individual, puesto que estos disponen de 3 capas de protección (galvanizado, vaina individual de PEAD y material de relleno) y cuñas para anclado diseñadas para un mejor comportamiento a fatiga. Además, los anclajes disponen de una cámara de estanqueidad (zona de transición), generalmente inyectada con un producto de protección flexible como la cera petrolífera. No obstante, la ausencia de vaina global limita ampliamente la estanqueidad del sistema y, por tanto, facilita generalmente la entrada de agua en el tubo de encofrado inferior.

Por otra parte, el perfil aerodinámico del tirante, incluso con el haz de cordones compactados, no es el óptimo y las vibraciones suelen ser más importantes con este sistema, llegando a provocar también *rattling* y desgastes en los dispositivos de desvío del tirante.

El nivel de daño en los desviadores puede ser tal que las vibraciones lleguen al anclaje, dañando las rejillas de su sistema de estanqueidad provocando la entrada de agua hasta las cuñas,



Figura 4. Tirante con hilos paralelos roto a proximidad del anclaje inferior.

lo que da pie a la corrosión de las mismas y de los cordones, puesto que carecen de vaina de PEAD en esta zona. Asimismo, los anclajes de esta tecnología no disponen de filtro de flexión, dispositivo que permite evitar que las tensiones de flexión en el cordón alcancen el bloque de anclaje, y que las vibraciones puedan terminar llegando a las cuñas. En algunos puentes se ha observado deslizamiento de cuñas y, puntualmente, roturas repentinas de cordones (fig. 5).

No obstante, este sistema deja más posibilidades de mantenimiento que la tecnología anterior con vaina inyectada, puesto que se tiene acceso a cada cordón de forma individual.

1.5. Cordones de 7 alambres, autoprotegidos y con vaina global

El sistema más reciente (principio de los años 2000, con primeros desarrollos para el puente de Normandía después de 1995) consiste en cordones de 7 alambres con triple protección individual además de una vaina global, generalmente de polietileno de alta densidad, con tratamiento para mejorar su resistencia a los rayos UV. La mayoría de las estructuras dotadas de este sistema disponen de un manual de mantenimiento y están sometidas a inspecciones rutinarias en las cuales no se han detectado, hasta la fecha, patologías impor-



Figura 5. Rotura de un cordón.

tantes. Según las recomendaciones internacionales vigentes, los tirantes equipados con esta tecnología deben tener una vida útil de diseño de 100 años, incluyendo operaciones de mantenimiento periódico [1].

2 TÉCNICAS DE INSPECCIÓN Y MONITORIZACIÓN NO DESTRUCTIVAS

2.1. Inspección visual

Es la intervención más básica. Sus alcances vienen definidos en el manual de mantenimiento de la estructura y vienen recopilados en el Manual de Tirantes [2]. Suelen quedar bastante limitados por la dificultad de acceso a toda la longitud de todos los tirantes y sus anclajes, pero pueden ser llevados a cabo de manera frecuente por personal no especializado, además de ser aplicables a todos los tipos de cables. La inspección visual es el primer paso, imprescindible, hacia la detección de posibles defectos en el tirante. Las restantes inspecciones, que son descritas a continuación, deberán ser realizadas por personal especializado.

2.2. Inspección especializada: zona de anclajes

Los problemas que se pueden potencialmente observar en la zona de anclajes se suelen concentrar principalmente en el anclaje inferior del tirante: acumulación de agua y suciedad, proyecciones de sal, agua y suciedad por el tráfico, movimientos del tablero (y giros asociados) mayores que en la torre, etc.

2.2.1. Exterior del anclaje

La operación más sencilla, en caso de fácil acceso al anclaje inferior, es la retirada de las protecciones desmontables de los anclajes y del material de relleno flexible que cubre los cordones (fig. 6). Esta operación, que se puede realizar con medios ligeros, permite examinar el anclaje inferior para detectar presencia de agua en el capot de inyección, relleno inadecuado del mismo o aparición de corrosión en las cuñas, los cordones o el bloque de anclaje.

En función del resultado de esta operación y del estado de cordones, cuñas y bloques, se debe estudiar la necesidad de profundizar la inspección, a través de ultrasonidos, o de realizar una inspección visual del interior del anclaje mediante vaciado e introducción de un boroscopio.

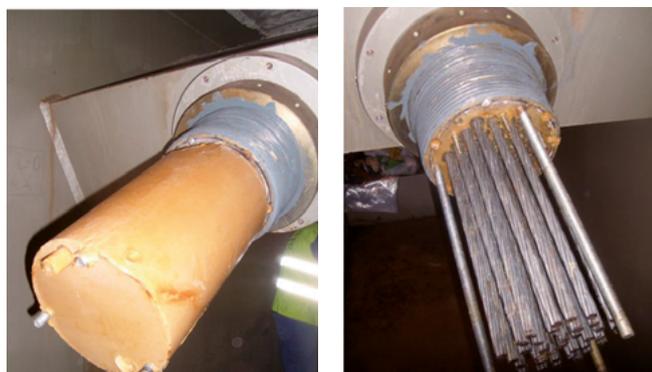


Figura 6. Vista de anclaje inferior, después de retirar el capot (izquierda) y la cera (derecha).



Figura 7. Interior de un anclaje vaciado.

En el caso de tirantes con capots inyectados con mortero o cualquier otro material no flexible, se ve dificultado el acceso a los cordones. Se puede contemplar retirar el material de relleno siempre y cuando el método empleado asegure que no se dañen los cordones ni las cuñas (o manguitos de extrusión, en su caso).

El acceso al anclaje inferior para tirantes pasantes a través del tablero es más difícil: se requiere usar una plataforma de inspección móvil (camión de inspección) o la plataforma de mantenimiento del propio puente, si esta existe y está en condiciones de uso adecuadas.

2.2.2. Inspección del interior del anclaje mediante vaciado

La zona propicia a la aparición de defectos se encuentra en el interior del bloque, donde están la cuña y por detrás del bloque de anclaje, dentro de la zona de transición entre tramo libre y anclaje. Para poder inspeccionar esta zona se ha desarrollado una técnica de vaciado del interior de los anclajes inferiores de los tirantes (los anclajes superiores no suelen presentar estos problemas). Consiste en aprovechar los taladros pasantes existentes en el bloque donde se alojan las cuñas (que se usan al final de la construcción para inyectar el interior de los anclajes) para introducir resistencias que, al calentarse, permiten derretir la cera. El anclaje se vacía luego por gravedad.

Estos mismos taladros pasantes del bloque sirven a continuación para insertar una cámara (boroscopio) e inspeccionar el interior del anclaje (fig. 7). El resultado de la inspección dependerá en gran parte de la calidad del vaciado, que depende a su vez de las condiciones ambientales (el frío y la lluvia afectan el proceso de limpieza) y de la calidad de los materiales inyectados inicialmente y fuertemente de los restos añadidos por las posibles filtraciones de agua, restos de oxidaciones del tubo de encofrado u otros.

Aunque la visibilidad en el interior del anclaje sea reducida, la inspección con boroscopio resulta útil para detectar anomalías en esta zona no accesible, estando esta limitada al ser una inspección meramente visual. Además permite disponer de más información antes de tomar decisiones sobre posibles actuaciones futuras más invasivas, como pueden ser la extracción de cordones y la realización de ensayos en laboratorio.

2.2.3. Inspección del interior del anclaje mediante ultrasonidos

La técnica de inspección por ultrasonidos se basa en el principio de reflectometría ultrasónica, según el cual una onda de



Figura 8. Inspección por ultrasonidos.



Figura 9. Sonda en tirante de prueba para calibración.

muy alta frecuencia se ve en parte reflejada hacia su punto de emisión cuando se encuentra con una discontinuidad en la sección del hilo. Esta onda guiada es generada por un transductor ultrasónico colocado en el extremo del hilo. El eco (señal de vuelta) permite identificar daños en el hilo y localizar aproximadamente las discontinuidades.

Para cables de 7 alambres o hilos paralelos, las tecnologías actuales operan hilo por hilo (fig. 8).

La detección tiene un alcance de varias decenas de centímetros, lo que corresponde generalmente a la zona inaccesible de los anclajes (dentro del bloque de anclaje), en la cual se pueden desarrollar fenómenos de corrosión. Los materiales de relleno, flexibles o no, así como el contacto entre hilos, facilitan la dispersión de las ondas, llevando a resultados poco fiables para longitudes mayores.

En particular, en la tecnología de tirantes de los años setenta a mediados de los años ochenta, tanto en cordones como en hilos individuales, la cabeza de anclaje puede ir inyectada con resina epoxy en la cual vienen embebidas bolitas de acero. Las ondas ultrasónicas se ven rápidamente atenuadas en tales zonas de anclaje.

2.3. Inspección especializada: tramo libre del tirante

2.3.1. Sonda capacitiva

El método de inspección por sonda capacitiva se centra principalmente en la detección de oquedades en vainas de

polietileno (o polipropileno) inyectadas con lechada de cemento o similar.

La durabilidad de este tipo de tirantes se ve condicionada por el proceso inyección de la vaina y las zonas de anclaje, así como por la calidad del producto inyectado. La similitud de estos tirantes con los tendones de pretensado exterior implica que se pueden observar los mismos defectos, como son las inyecciones incompletas o la presencia de lechada de mala calidad, generalmente en «puntos altos» del tirante.

Este método también permite detectar, además de las oquedades en el interior de una vaina de plástico, la presencia de acero, agua o «pasta blanca».

Un oscilador emite una onda entre dos electrodos. La frecuencia medida de vuelta varía en función de los materiales situados entre los electrodos. La variación de material (aire, lechada, PEAD, agua, etc.) modifica el valor de capacidad y altera la frecuencia de la oscilación medida. Los resultados pueden indicar qué material o combinación de materiales se encuentra en la vaina y dónde están ubicados, gracias a un dispositivo de medición de distancias integrado en la sonda.

La señal de la sonda se transmite a un ordenador portátil por tecnología Bluetooth, con el fin de visualizar los resultados en tiempo real, registrar los datos y llevar a cabo análisis a posteriori.

En primer lugar el operario procede a mover la sonda (fig. 9) siguiendo la generatriz superior del tirante (las bolsas de aire

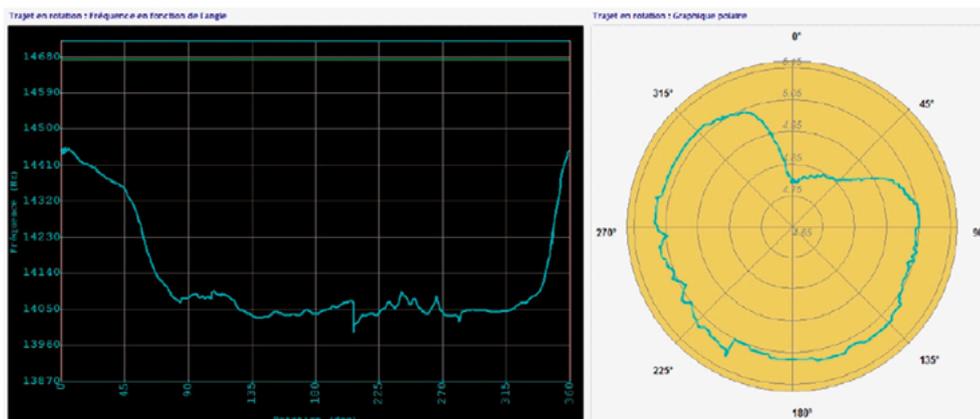


Figura 10. Sección de tirante con defecto de inyección.

suelen encontrarse en esa zona). En tiempo real, se visualiza la evolución de la señal; cuando se detecta un posible defecto, se realiza una rotación alrededor de la vaina para obtener una imagen de la sección completa del tirante (fig. 10).

Los defectos se van identificando a lo largo de la gráfica obtenida durante la traslación longitudinal de la sonda, para tener una referencia en cuanto a su posición y la de las rotaciones llevadas a cabo con el dispositivo.

Este método de inspección está especialmente recomendado por el Setra [3].

2.3.2. Otros métodos

En el mercado existen otros métodos de inspección adecuados para evaluar el estado de los tirantes. Se han desarrollado en diversas publicaciones, entre las cuales puede citarse el Manual de Tirantes [2], la síntesis realizada en obras del continente norteamericano [4] y artículos como [5]:

- Método magneto-inductivo, para detección de defectos en la sección de acero y cuantificación de la pérdida de sección.
- Radiografía, teóricamente aplicable a los tirantes pero con riesgos sanitarios debidos al uso de elementos radioactivos y problemas de tamaño de los equipos.
- Potencial e intensidad de corrosión: este método requiere entrar en contacto con la armadura, por lo que se debe abrir una ventana en la vaina.

2.4. Instrumentación

2.4.1. Medición de fuerza por cuerda vibrante o por pesaje

El método de la cuerda vibrante consiste en medir la frecuencia natural del tirante, sabiendo que es función de la fuerza (T), la masa lineal (μ) y la longitud libre del tirante (l). Esta técnica se ha desarrollado de manera pormenorizada en varios estudios [6] y queda recogida en [2] y [5]. El método estándar se basa en el uso de acelerómetros instalados sobre los tirantes, pero se han desarrollado nuevas técnicas que permiten medir la frecuencia de vibración de un tirante mediante láser, lo que reduce tiempos y necesidades de acceso. Las referencias de aplicación de esta nueva tecnología son, a día de hoy, poco numerosas.

La medición de fuerza se puede realizar de manera más precisa mediante pesaje con gato anular, que ayuda a deducir la longitud libre real del tirante (depende de la presencia de amortiguadores, desviadores y rigidez de su conexión a la estructura). Al combinar estas técnicas con un levantamiento topográfico de la estructura, en las mismas condiciones que la medición de fuerza, se obtiene una imagen fiable de su estado.

2.4.2. Monitorización de la estructura

Después de haber realizado la inspección de los tirantes y, en su caso, del resto de la estructura, se dispone de un cierto grado de conocimiento de su estado en ese momento. No obstante, se desconoce generalmente cómo va a evolucionar la estructura en el futuro. De esta evolución dependerán las actuaciones de mantenimiento o sustitución descritas a continuación.

Asimismo, las técnicas mencionadas anteriormente no permiten inspeccionar el 100% de la longitud de los cables,



Figura 11. Sensor de detección de roturas.

siendo los tramos comprendidos en los tubos de encofrado generalmente inaccesibles y, por tanto, el comportamiento futuro de la estructura es difícil de prever.

La monitorización de la estructura mediante una serie de sensores ubicados en los tirantes (acelerómetros), en los anclajes (célula de carga en cordones) y en la propia estructura (inclinómetros, transductores de desplazamiento, galgas extensométricas, detectores de roturas, etc.) facilita datos en tiempo real sobre el comportamiento de la estructura, como deformaciones, vibración de los tirantes y variaciones de carga, roturas de hilos en cables, etc. (fig. 11).

Estas últimas, en particular, se registran y se pueden ubicar con precisión en el tirante.

La monitorización de los tirantes es esencial a la hora de planificar sustituciones de tirantes u otras actuaciones de gran impacto económico.

3 ACTUACIONES DE MANTENIMIENTO Y MODERNIZACIÓN

Las inspecciones llevadas a cabo mediante las distintas técnicas descritas en los párrafos anteriores tienen como objetivo definir las actuaciones de mantenimiento necesarias para reducir el impacto de las condiciones ambientales sobre los cables y sus componentes, o modernizar el sistema de tirantes con tecnologías que podían no estar disponibles en el momento de la construcción. En definitiva, prolongar la vida útil de los cables.

Aparte de las operaciones comunes, tales como la sustitución de piezas de desgaste, juntas de estanqueidad, tornillería, o el restablecimiento de los revestimientos de protección anticorrosión, y de varias actuaciones más específicas como son los ajustes de carga, la sustitución de cordones individuales o de tirantes, la instalación de amortiguadores, la reparación local de la vaina, o la reinyección de lechada, cabe destacar las siguientes soluciones:

3.1. Mejora del perfil aerodinámico del tirante

A principios de los años noventa, y como consecuencia de las limitaciones del sistema de tirantes con cordones o hilos paralelos en una vaina de plástico inyectada, se empezó a instalar tirantes de cordones paralelos o incluso barras sin vaina global, exponiendo por tanto los tirantes a la intemperie y



Figura 12. Vaina en dos mitades en curso de instalación.

provocando acumulaciones de agua en los tubos de encofrado inferiores, además de vibraciones importantes.

Estos fenómenos se pueden reducir drásticamente mediante la instalación de una vaina global de plástico formada por 2 semicáscaras que tiene como principal ventaja la posibilidad de montarse sin actuar sobre el propio tirante. Esta vaina consiste en un tubo en 2 mitades (fig. 12) que encajan perfectamente mediante un sistema de clip integrado en la pieza extrusionada.

De dimensiones más compactas que la vaina de tirantes habitual, permite reducir los efectos aerodinámicos combinados con lluvia (va equipada con un doble ribete helicoidal), mejora la evacuación del agua mediante una campana de conexión al tubo de encofrado y protege los cables o barras de las radiaciones ultravioletas.

Los sistemas de tirante con vaina global lisa, generalmente anteriores a la aparición del ribete helicoidal, se pueden ver mejorados mediante la soldadura automatizada de este ribete en toda su longitud libre, que realiza un robot que se desplaza a lo largo del tirante.

3.2. Protección de los anclajes

En línea con la finalidad de la instalación de una vaina global (reducción de la entrada de agua), se pueden llevar a cabo varias operaciones con el objetivo de proteger el anclaje y evitar la penetración de agua en su interior.

La primera operación consiste simplemente en destapar los orificios de purga del tubo de encofrado o taladrar orificios nuevos si fuese necesario.

La segunda opción, en caso de que siga llegando agua al anclaje, es rellenar la parte inferior del tubo de encofrado con un producto flexible e hidrófobo que se adapte al movimiento de los cables sin dejar pasar el agua. Se realiza un taladro de purga por encima del nivel del relleno para evacuar el agua que pueda entrar en el tubo. Los productos de relleno flexibles son retirables para futuras inspecciones.

3.3. Protección contra el fuego

A raíz de varios accidentes de tráfico que se han producido en la calzada de puentes atirantados que han supuesto una exposición de los tirantes a fuegos con combustión de hidrocarburos durante varias horas, ciertas recomendaciones internacionales (PTI 6th edition [7], por ejemplo) han incluido requerimientos relativos a la protección contra incendios. Aunque originalmente concebidas para tirantes nuevos, las protecciones contra incendios se pueden implementar también sobre tirantes existentes, desde la parte visible del tubo de encofrado hasta la altura requerida en proyecto, mediante cobertura con elementos en dos mitades que se unen a posteriori con roblones o tornillos.

El sistema de protección consta de una capa de material intumesciente combinada con una capa de aire, y es capaz de mantener el tirante a una temperatura inferior a 300 °C durante más de una hora, mientras está expuesto a condiciones de fuego según la curva de hidrocarburos del Eurocódigo 1 [8], sin perder su capacidad portante.

3.4. Actuaciones en tirantes inyectados con lechada de cemento

Las actuaciones a llevar a cabo sobre tirantes con vaina inyectada dependen fuertemente del grado de oxidación del acero. La evaluación de la sección remanente del acero (ya sea en cordones, hilos o barras) y del estado de los tirantes adyacentes en la estructura es necesaria para decidir las operaciones a llevar a cabo.

La actuación menos invasiva consiste en retirar la vaina en una longitud mayor que el tramo dañado o fisurado y picar la lechada hasta encontrar acero y lechadas sanos a ambos lados de la zona afectada (fig. 13). La corrosión del acero y las fisuras en la lechada pueden propagarse más que los daños visibles en la vaina.



Figura 13. Tramo de tirante limpio (con hilo separador en forma de hélice).

Después de haber limpiado adecuadamente la zona afectada, se instala una vaina de polietileno de diámetro superior a la existente, con soldadura longitudinal en una o dos generatrices según el método de instalación y solapes en ambos extremos. Una vez asegurada la estanqueidad en zonas de solape, se inyecta la vaina nueva con lechada de cemento con formulación ensayada según normativas actuales [9].

Este tipo de reparación, con lechadas de épocas distintas, favorece la creación de una interfaz entre elementos de pH diferentes; en el caso de mantenerse la humedad y el oxígeno mínimo necesario, esto podría originar corrosión en las zonas vecinas al tramo reparado.

Si la sección remanente de acero se estima insuficiente o si se tienen dudas sobre el estado real del tirante (en zonas no inspeccionables con las técnicas disponibles), se deberá plantear la sustitución del tirante completo, ya que estos sistemas de atirantamiento no permiten sustituciones parciales.

La sustitución de un tirante implica generalmente una campaña de inspección del resto de la estructura y la eventual sustitución de más tirantes. Los sistemas de monitorización descritos en el párrafo 2.4.2 permiten escalonar las sustitu-

ciones y los gastos correspondientes mediante un seguimiento de la evolución de los daños en los tirantes.

Bibliografía

- [1] P. Ladret, *Inspección de tirantes en puentes*, Asociación Técnica de Carreteras. Comité de Puentes, 2011.
- [2] ACHE, *Manual de Tirantes*, 2007, apartado 5, pp. 177-200.
- [3] Sétra, *Note de sensibilisation sur les ouvrages existants à précontrainte extérieure protégée par du coulis de ciment au contact des armatures*, 2007.
- [4] Tabatabai H., *Inspection and maintenance of bridge stay cable systems: A synthesis of highway practice*, vol. 535 of NCHRP synthesis, 2005.
- [5] H. Yun, S. Kim, L. Wu, J. Lee, *Development of inspection robots for bridge cables*, *ScientificWorldJournal* 2013 (2013) ID 967508.
- [6] P. Ladret, M.A. Belinchon, J.R. Casas, *Inspection of cable forces of cablestayed bridges using a modified taut-string method*, *First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management*, Barcelona (2002).
- [7] PTI DC45. 1-12, *Recommendations for stay cable design, testing and installation*, 2012, pp 39-40.
- [8] Eurocódigo 1, *Bases de Proyecto y acciones en estructuras*, parte 2-2, *Acciones en estructuras*. *Acciones en estructuras expuestas al fuego*.
- [9] ETAG 013, *Guideline for European technical approval of post-tensioning kits for prestressing of structures*, 2002.