

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 TROTIN

Ingeniero Industrial
Freysinet S.A.
Ingeniero Departamento Técnico
nicolas_t@freysinet-es.com

Jorge SÁNCHEZ DE PRADO

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Freysinet S.A.
Director área de estructuras cableadas y mantenimiento
jorge_s@freysinet-es.com

Patrick LADRET

Ingeniero Civil
Freysinet España
Director Desarrollo Internacional
pladret@freysinet-es.com

Pablo VILCHEZ MOTINO

Ingeniero Industrial
Freysinet España
Director Técnico
pablo_v@freysinet-es.com

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.

ABSTRACT

This article is about the most common technologies for stay cables systems and the main pathologies 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. The related publications are quite numerous, which explains why this article will mainly focus on the inspection and maintenance methods more recently developed and used on site.

PALABRAS CLAVE: Mantenimiento, rehabilitación, inspección, tecnologías de tirantes.

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, barras y 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 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, 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).



Figura 1: Hilos exteriores rotos en cable cerrado

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. 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 70 hasta mediados de los años 80. Existen varios casos de tirantes donde se instalaron barras de pretensado con acopladores en vez de cordones.

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

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 o la entrada de agua.



Figura 2: Corrosión en punto de inyección (izquierda) y en interior de vaina fisurada (derecha)

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.

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

Este sistema, empleado desde finales de los años 80 hasta mediados de los 90, presenta las mejoras aportadas a los cordones a lo largo del tiempo, de manera individual puesto que éstos 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, 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.



Figura 3: Rotura de un cordón

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

El sistema más reciente (principio de los años 2000) consiste en cordones de 7 alambres con triple protección 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 importantes.

2. Técnicas de inspección y monitoreo 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 [1]. 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. Zona de anclajes

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

2.2.2. Interior del anclaje

La zona propicia a la aparición de defectos se encuentra 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. 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.

Aunque la visibilidad en el interior del anclaje sea reducida, la inspección con boroscopio resulta útil para detectar anomalías en esta zona no accesible. 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.



Figura 5: Interior de un anclaje vaciado

2.2.3. Ultrasonidos

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

La detección tiene un alcance de varias decenas de centímetros (30 centímetros aproximadamente), 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, facilitan la dispersión de las ondas, llevando a resultados poco fiables para longitudes mayores a las mencionadas.



Figura 6: Inspección por Ultrasonidos

2.3. 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".



Figura 7: Sonda en tirante de prueba para calibración

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 siguiendo la generatriz superior del tirante (las bolsas de aire 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.

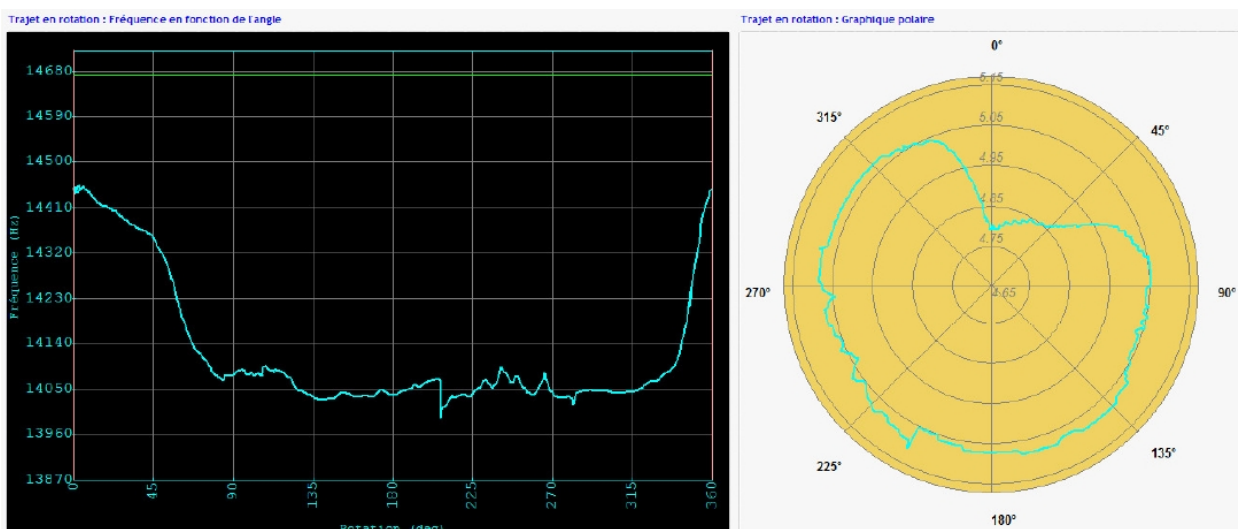


Figura 8: Sección de tirante con defecto de inyección

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.

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 [1]:

- 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,
- 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 [4] y queda recogida en [1]. 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.

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 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.

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



Figura 9: Sensor de detección de roturas

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 90, 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 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 semi-cáscaras, que tiene como principal ventaja la posibilidad de montarse sin actuar sobre el propio tirante. Esta vaina consiste en un tubo en 2 mitades 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 ultra-violetas.



Figura 10: Vaina en dos mitades en curso de instalación

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 [5], 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 2 mitades que se unen a posteriori con roblones o tornillos.

El sistema de protección consta de una capa de material intumescente 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 [6], sin perder su capacidad portante.

4. Referencias

- [1] ACHE, Manual de tirantes, 2007, apartado 5, pp177-200
- [2] H. Yun, S. Kim, L. Wu, J. Lee, Development of inspection robots for bridge cables, 2013
- [3] H. Tabatabai, Inspection and maintenance of bridge stay cable systems: a synthesis of highway practice, vol. 535 of NCHRP synthesis, 2005
- [4] J.R. Casas, M.A. Belinchon, P.Ladret, Inspection of cable forces of cable-stayed bridges using a modified taut-string method, 2002
- [5] PTI DC45.1-12, Recommendations for stay cable design, testing and installation, 2012, pp39-40
- [6] Eurocódigo 1, Bases de Proyecto y acciones en estructuras, parte 2-2, Acciones en estructuras. Acciones en estructuras expuestas al fuego
- [7] P. Ladret, Inspección de tirantes en puentes, Asociación Técnica de Carreteras. Comité de Puentes, 2011