

INSPECCIÓN DE TIRANTES EN PUENTES

Patrick LADRET

Ingeniero E.N.T.P.E.

Freyssinet S.A. Director técnico

pladret@freyssinet-es.com

Contenido

1. INTRODUCCIÓN	2
2. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LAS ESTRUCTURAS CABLEADAS	2
2.1. Tecnologías de cable	2
2.2. Composición típica de un tirante	3
2.3. Vida útil de un tirante	4
3. PLAN DE INSPECCIÓN	5
3.1. Objetivos de la inspección	5
3.2. Plan y tipos de inspección para obras nuevas	6
3.3. Plan y tipos de inspección para obras antiguas	7
3.4. Catálogo de principales. Criterios de inspección de los tirantes	8
3.5. Informes de inspección	14
4. MÉTODOS DE INSPECCIÓN DE TIRANTES	15
4.1. Medios de acceso al lugar de inspección:	15
4.2. Técnicas particulares de inspección	16
4.2.1. Pesaje de tirantes. Método lift off	17
4.2.2. Cuerda vibrante	17
4.2.3. Vibración libre-amortiguada	19
4.2.4. Medición por ultrasonidos	19
4.3. Flujo magnético	19
4.4. Medición del potencial de la corrosión	20
4.4.1. Sensores magneto-estriktivos (MsST: Magnetostrictive Sensor Reflectometer):	21
5. MONITORIZACIÓN	21
5.1. Alcance	21
5.2. La auscultación acústica	21
6. MANTENIMIENTO DE TIRANTES	22
6.1. MANUAL DE MANTENIMIENTO	23
7. EJEMPLOS DE INSPECCIÓN DE TIRANTES EN PUENTES	24
7.1. Inspecciones “punto cero”	24
7.2. Establecimiento de un programa de inspección en puente existente	25
7.3. Programa de inspección en puentes recientes	26
7.4. Inspecciones excepcionales	27
7.5. Ejemplo de monitorización continua: el Viaducto de Millau y el puente de Rion Antirion	28
8. BIBLIOGRAFÍA	29

1. INTRODUCCIÓN

La durabilidad de un cable, al igual que la de cualquier otro elemento estructural, se entiende como su capacidad para ser mantenido por debajo de un nivel de envejecimiento aceptable durante un tiempo determinado y a un coste razonable.¹

Sin embargo los cables de las estructuras colgantes y atirantadas deben considerarse un elemento particular y especial, tanto desde el punto de vista de la inspección como del mantenimiento. Su durabilidad se ve afectada negativamente por muchos factores difíciles de considerar en su globalidad y temporalidad tales como:

- Son elementos activos de la estructura, sometidos continuamente a cargas variables,
- Generalmente forman parte de estructuras complejas por su importancia en el tráfico, o por los condicionantes ambientales (salvan grandes luces, vías, ríos, estrechos, etc.)
- Son sensibles a los agentes climáticos, rayos UV (envejecimiento), aguas de condensación o lluvia (corrosión), viento (vibraciones y cargas dinámicas),
- El conocimiento del comportamiento de los cables se ha adquirido en los últimos decenios y es un campo de investigación activo,
- La tecnología de los tirantes está evolucionando continuamente, al tratarse de un campo de aplicación reciente.

Este documento se apoya ampliamente en las recomendaciones vigentes, que se recogen en el apartado de bibliografía, especialmente el “Manual de tirantes” editado por el Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos y la ACHE y las “recommendations for the acceptance of stay cable systems, using prestressing steels” de la FIB.

El documento se centra principalmente en los puentes atirantados al tratarse de la tipología de cables más frecuente en España. Sin embargo gran parte de los principios son de aplicación en puentes suspendidos u otras estructuras cableadas.

2. CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE LAS ESTRUCTURAS CABLEADAS

2.1. Tecnologías de cable

Existen diversos sistemas, fruto del continuo desarrollo en que se encuentra la tecnología de cables. Hoy en día, el sistema de cordones paralelos autoprotegidos está reconocido por todas las recomendaciones internacionales como el más adecuado para puentes atirantados en términos de prestaciones, durabilidad y facilidad de inspección y mantenimiento. Sin embargo, en otro tipo de estructuras se siguen empleando el resto de tecnologías: cable principal en estructuras suspendidas, péndolas, tirantes en cubiertas, etc.

	Elementos de protección	
	Vaina	Inyección
Cordones paralelos autoprotegidos	SÍ / NO	NO
Cordones paralelos	SÍ	SÍ
Hilos paralelos	SÍ	SÍ

¹ p177, Recomendaciones y Manuales Técnicos. Estructuras y Edificación, E-12 Manual de tirantes.

Cable cerrado	NO	NO
Cable helicoidal	NO	NO
Barra o grupo de barras	SÍ	SI / NO

Las tareas de inspección y mantenimiento variarán en función de la tipología de los tirantes. Así, la inspección de los cables inyectados tendrá unas necesidades específicas completamente distintas a las de un cable helicoidal desnudo o unos cordones autoprotegidos enfundados en vaina PEAD.

2.2. Composición típica de un tirante

A efectos del diseño de los cables y de la inspección se pueden distinguir las zonas principales:

- partes de **estructura colindantes al cable** o que el cable atraviesa (tubo de encofrado, placas de apoyo, conexiones y horquilla)
- **anclajes**: extremidades y conexión del cable a la estructura (para esfuerzos axiales) / **sillas de desvío**: fijas o móviles,
- **longitud libre** del cable,
- tubos guía y zonas de filtro de esfuerzos radiales (desviadores, centradores, amortiguadores),
- tubos antivandalismo y protección de la sección de cable frente a acciones a nivel de calzada.

Las 2 últimas partes citadas se denominan generalmente zonas de transición.

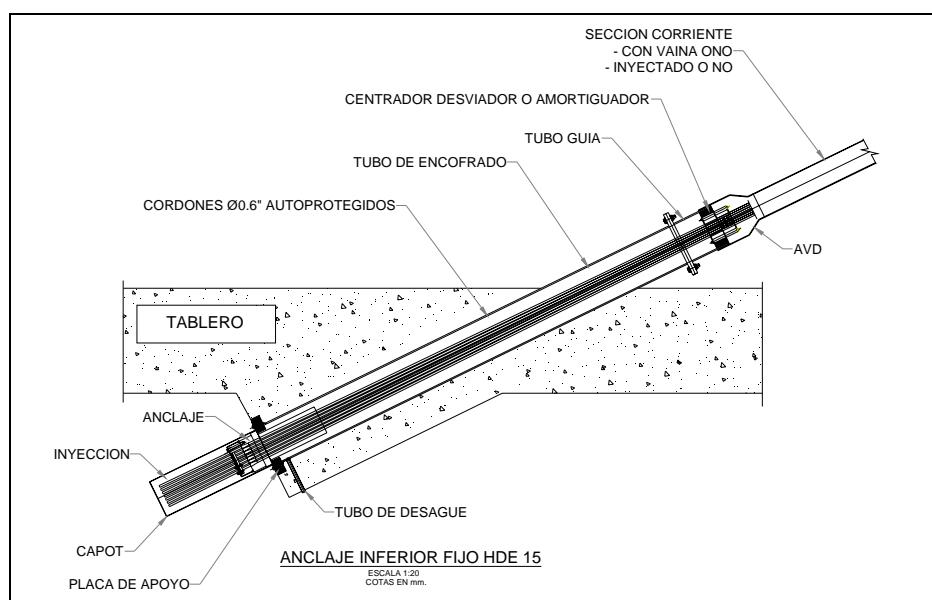


Figura 1. Disposición tipo de un anclaje inferior.

El acceso a las zonas de anclaje que se encuentran en el interior del pilono, que lo atraviesan, así como las zonas de anclaje inferior (por debajo del tablero) requiere generalmente medios especiales.

Gran parte de los elementos estructurales del tirante se encuentran protegidos (mediante capot, vaina o sistemas de protección) o ocultos (anclajes embebidos, sillas de desvío, cámaras de anclaje), por lo que la inspección principal de carácter visual se revelará insuficiente y deberá ser completada por visitas especiales conducidas por un personal especializado.

2.3. Vida útil de un tirante

La vida útil de un tirante es el tiempo que permanece en servicio con el mantenimiento rutinario previsto. La vida útil de los tirantes se fija normalmente mediante un contrato entre la propiedad y el contratista.

Todos los códigos establecen la vida útil de los puentes en 100 años. Pero el tirante condiciona por su función el comportamiento estructural y por lo tanto la vida útil de la estructura. Por ello un tirante no reemplazable debe tener una vida útil al menos igual a la de la estructura. En el caso de tirantes reemplazables, la vida útil puede ser inferior a la de la estructura, pero por la complejidad de la operación de sustitución se recomienda que en ningún caso la vida útil sea inferior a 25 años.

Hoy en día los tirantes de cordones paralelos autoprotegidos ofrecen una vida útil de diseño de 100 años. La FIB establece también esos 100 años. Para justificar esta vida útil de diseño las recomendaciones establecen un programa de calificación que consta de ensayos a escala real de un conjunto representativo. Además, estructuralmente, se comprueba que la pérdida / rotura de un tirante no provoque el colapso de la estructura y los elementos de conexión a la estructura no se dañen de forma irreversible con el objeto de limitar el impacto económico de este daño sobre la estructura.

De forma práctica, pero no exhaustiva, considerar la vida útil en el diseño debería resolver los siguientes interrogantes:

- Declaración de la vida útil de servicio de la estructura por parte del dueño,
- Definición de la vida útil de diseño del tirante y de sus componentes, con el objeto de minimizar el coste global de vida de la estructura, puesto que la vida útil de diseño puede ser intencionalmente inferior a la de servicio. En este caso, los medios de inspección, accesibilidad, redundancia en el diseño deben ser contemplados para poder cuantificar todos los impactos técnico y económico del mantenimiento (inclusive la sustitución parcial o total de los componentes según su declaración de vida útil de diseño) requerido para compatibilizar la tecnología de tirante con la vida útil de servicio de la estructura.
- Calificación de la agresividad del ambiente, bien sea para estructuras de hormigón o de acero (a modo de ejemplo para estructuras de hormigón la norma EN-206-1 o su aplicación nacional tabla 8.2.2 de la EHE 08),
- Evaluación de los riesgos especiales (heladas, vientos) o exposiciones particulares (polución atmosférica),
- Definición de la vida útil de las protecciones contra la corrosión en las condiciones reales de uso según los 2 puntos anteriores,
- Accesos para realizar la inspección y mantenimiento,
- Simulacro y metodología de sustitución parcial (componentes).
- Empleo de sistemas de tirantes calificados y ensayados según las recomendaciones en vigor.

A modo de ilustración de este último punto, las recomendaciones en vigor, preconizan las siguientes calificaciones que sirven como herramientas para justificar la vida útil de diseño:

- Ensayos de fatiga frente a acciones axiales y radiales simulando la flexión del cable en las zonas de anclaje,
- Evaluación de las medidas de reducción de la flexión en las zonas de anclaje y en las zonas de transición: estáticas en construcción y servicio (filtros de flexión), dinámicas en servicio (incorporación de amortiguadores, cables transversales),

- Ensayo de estanquidad de las zonas de anclaje, concierne principalmente a los tirantes de cordones para los cuales la barrera exterior (funda de PEAD) debe ser retirada y está sustituida por un recinto de anclaje estanco,
- Justificación de la durabilidad de la protección contra la corrosión de los anclajes con ensayos de envejecimiento,
- Justificación de la durabilidad de los vainas de cubrición empleadas en la longitud libre,
- Justificación de la durabilidad de las capas de protección de la armadura en su longitud libre.

3. PLAN DE INSPECCIÓN

3.1. Objetivos de la inspección

Como queda definido en el Manual de Tirantes², la inspección de los tirantes tiene 2 objetivos principales:

- Saber la fuerza a la que está sometido el tirante,
- Conocer la existencia y alcance de daños en los elementos que componen el tirante.

Esto es, conocer el estado, funcionalidad y seguridad actual de los tirantes, detectando las anomalías, previendo su comportamiento futuro, así como las posibles actuaciones de reparación.

A estos puntos deberíamos añadir: el conocimiento de la evolución del perfil geométrico de la estructura, y la medición de los parámetros ambientales (por lo menos temperatura) puesto que la evolución de fuerza indica una evolución del comportamiento de la estructura.

En el caso de un tirante, al igual que cualquier mecanismo, conviene relacionar y concertar objetivos de inspección y mantenimiento preventivo con el objeto de maximizar, para todos los componentes que forman el tirante, el tiempo que permanecen por debajo del umbral de propagación de un particular daño. Por lo que a nuestro entender, el plan de inspección y el mantenimiento preventivo van generalmente unidos.

En la fase de proyecto se debe establecer un *Programa de inspección y manual de mantenimiento* en el que se definen:

- los tipos de inspecciones, sus alcances, la periodicidad, los porcentajes de componentes a inspeccionar, así como los rangos esperables de las magnitudes a controlar y los valores de aviso y alerta.
- Las instrucciones de inspección: medios necesarios, accesos y equipos de seguridad, etc.
- Las instrucciones de mantenimiento preventivo que acompañan las inspecciones para contener y reducir el deterioro de los componentes por debajo de un umbral de deterioro “no reversible”.

² p184, Recomendaciones y Manuales Técnicos. Estructuras y Edificación, E-12 Manual de Tirantes.

3.2. Plan y tipos de inspección para obras nuevas

Nos vamos a referir, por ser la más completa, con la distinción que la FIB³ realiza de las inspecciones de tirantes.

- **Inspección inicial**, realizada al finalizar la construcción y antes de entregar la estructura al propietario. Debería incluir un replanteo de la alineación de la superestructura, un registro de las fuerzas reales de cada tirante, y los períodos críticos de vibraciones en tirantes, reflejando las condiciones ambientales en el momento de realizar esta inspección.
- **Inspección rutinaria**, que forma parte de las inspecciones generales del puente desarrolladas una vez al año, o cada dos años como mínimo. Generalmente se limita a una inspección visual, sin necesidad de elementos auxiliares, excepto prismáticos, para permitir la inspección de la parte de cable que no se encuentra sobre el tablero. Se trata de una inspección con controles de carácter cualitativos:
 - Posición y estado aparente de los tirantes: longitud libre, soldaduras, desviadores, amortiguadores, tubos antivandálicos, etc.
 - Vibraciones anómalas en cables,
 - Signos de deformación, fisuras, manchas en los capot de anclaje y placas.
- **Inspección detallada**. Se aconseja realizarla cada 3-6 años. En ella se deben inspeccionar entre el 25% y el 50% de los componentes a fin de que en 12 años todos los componentes hayan sido inspeccionados. Esta inspección debe ser realizada por personal especializado y serán necesarios una serie de medios auxiliares. Generalmente será necesario retirar ciertos componentes protectores (capots, tubos antivandálicos, vaina, etc) para poder realizar la inspección. Además de los puntos señalados en una inspección rutinaria, una inspección detallada debe incluir los siguientes aspectos:
 - Inspección de los capot de anclaje para revisar la presencia de agua, o degradación del material de relleno,
 - Detección de corrosión en las partes expuestas de la armadura tesada una vez retirados los capots,
 - Estado de las conexiones en las zonas de transición: tubo antivandálico, conexiones de tubo guía, uniones atornilladas, uniones soldadas,
 - Estado de los sistemas de drenes en las zonas de anclaje y de transición,
 - Daños en la longitud libre: en la capa de protección del cable (pintura, galvanizados), en la vaina de cubrición,
 - Estado de desviadores, centradores, amortiguadores (si procede),
 - Estado de los cables transversales (si procede),
 - Control de los desvíos angulares entre los anclajes, el cable y la zona de conexión a la estructura.

Como complemento a los datos objeto de la examinación, la inspección detallada puede recurrir a:

- métodos de inspección y de medición no destructivos para calificar la corrosión, detectar las fisuras o roturas de armadura activa,
- Medición de la fuerza de los cables que se debería acompañar de un control topográfico de la estructura,
- medición del amortiguamiento intrínseco de los cables (con y sin amortiguador),
- Desmontaje, extracción de muestreo para verificar el envejecimiento de los materiales: en este caso la sustitución parcial de los componentes es recomendada

³ Capítulo 8, de la Recommendations for the acceptance of stay cable systems using prestressing steels de la FIB

frente a la extracción de las protecciones en zonas restringidas y reparación in situ (en el caso particular del cordón por ejemplo).



Figura 2. Extracción y sustitución de un cordón en el puente de Normandía.

- **Inspección excepcional.** Se realiza tras un accidente, catástrofe natural o acto de vandalismo. De igual manera se realizarían si durante una inspección rutinaria o detallada se detectaran daños importantes. Realizada por personal especializado, el programa de la inspección se adaptará en función del evento específico que haya provocado la inspección.

3.3. Plan y tipos de inspección para obras antiguas

Nos vamos a referir, a puentes en servicio para los cuales no se ha aplicado, desde su entrega y puesta en servicio, un plan de inspección.

En este caso todos los conceptos siguen viables, pero la Inspección inicial o punto “cero” va a revestir un carácter de inspección detallada.

A los trabajos de examinación física en obra, se deben sumar unos trabajos previos de compilación de datos como:

- Planos de obra,
- Estadio final de la obra ejecutada (proyecto modificado),
- Histórico de modificaciones y eventos extraordinarios que se produjeron entre la puesta en servicio.

Por otra parte, esta inspección pone de manifiesto generalmente una serie de deterioros que están en fase de gestación o en fase de propagación. Por esto, el informe de inspección debería además ser acompañado de un plan de inspección y mantenimiento que incorpore las medidas

correctivas a llevar a cabo para restablecer un nivel de seguridad aceptable al tirante, permitiendo restablecer o alcanzar, en parte, la vida útil de diseño.

3.4. Catálogo de principales. Criterios de inspección de los tirantes

3.4.1. *Envejecimiento técnico de los tirantes*

El Manual de tirantes define el envejecimiento técnico como la acumulación de daños de los materiales empleados⁴. Los daños más habituales son:

- Fatiga de los materiales,
- Corrosión de los aceros,
- Desgaste,
- Deterioro de protecciones superficiales,
- Deterioro de los materiales de sellado,
- Deterioro de los materiales de relleno,
- Envejecimiento de los plásticos,
- Deterioro de los materiales compuestos.

Tienen como causa:

- Las solicitudes mecánicas:
 - Dinámicas que se deben principalmente a la variación de fuerza axial combinada a una variación angular del tirante en sus extremos,
 - Las flexiones estáticas debidas a errores de implantación del anclaje en la estructura con la consiguiente desviación angular.
- Las solicitudes medio ambientales: como el viento, lluvia, radiación solar, variación térmica, ambientes agresivos por la ubicación de la estructura o por su condición de uso,
- Las solicitudes excepcionales debidas al uso: vandalismo, agresiones, incendios.

Se pueden distinguir los criterios de inspección sobre las distintas funciones del cable: resistencia del cable, durabilidad (protección contra la corrosión, fatiga, envejecimiento de los materiales, etc.) y control de los fenómenos de vibración. A continuación se recogen los principales deterioros y anomalías que se pueden encontrar durante la inspección de los tirantes.

3.4.2. *Deterioro de la protección contra la corrosión:*

- degradación de los capots: protección contra la corrosión, sellados, fugas de grasa, cera mineral, presencia de agua en las zonas de capot inyectados),

⁴ p178, Recomendaciones y Manuales Técnicos. Estructuras y Edificación, E-12 Manual de tirantes.



Figura 3. Corrosión en el exterior del capot

- acumulación de aguas en zonas de capot, tubos de encofrado (los que guían el tirante a través de la estructura), desagües,



Figura 4. Purgas de tubo de encofrado con presencia de corrosión

- degradación de la galvanización o pinturas contra la corrosión de las zonas colindantes (placa de apoyo, tubos de encofrado, tubos guía, tubos antivandalismo), acumulación de aguas por fallo de los desagües,



Figura 5. Corrosión de la cara interior de tubo de encofrado no galvanizado

- degradación en las zonas cercanas a la calzada: por proyección de aguas, nieblas salinas, abrasión por proyecciones desde la calzada, desgastes por roces y contactos, daños por impactos,



Figura 6. Erosión de pintura en tubos antivandálicos por proyección desde la calzada

- degradación de los fuelles sintéticos de sellado entre zona corriente de cable y tubos de encofrado, degradación del tapón de estanqueidad en cabeza de tubo antivandálico (en haces de cordones paralelos sin vaina exterior) y otros elementos que previenen la entrada de agua en la parte inferior del cable, falta de remaches en tubos antivandálicos,



Figura 7. daños en faldón de conexión entre vaina y tubo guía,

- aspecto, color de la vaina exterior o de la capa de pintura,
- degradación de la protección por pintura, brea que cubren los cables de acero,



Figura 8. Protección contra la corrosión dañada. Péndolas del puente de las Américas . Panamá,

- degradación de las cintas de cubrición de haces de acero o vainas (wrapping),
- degradación de los plásticos (polietileno, polipropileno) que forman la vaina (microfisura o cortes),
- rotura de la vaina y de la lechada por corrosión interna como resultado de la entrada de agua en cables inyectados



Figura 9. Rotura de vaina de cubrición, falla de lechada y corrosión de los hilos paralelos,



Figura 10. Filtración de agua, expansión de lechada, rotura de vaina y corrosión de los cordones

3.4.3. Deterioros que afectan a la función resistente:

- corrosión y reducción de la sección. En este aspecto se deben distinguir las secciones de tirante compuestas de cordones paralelos protegidos, secciones de cordones inyectadas de lechada de cemento y secciones monolíticas de cable como cables trenzados o cerrados donde la circulación de agua en los intersticios entre hilos al interior del cable es posible. Para estos últimos, como consecuencia del trazado rectilíneo de un tirante la corrosión es poco probable en toda su longitud pero se puede concentrar en las zonas cercanas a los anclajes inferiores.
- rigidez y pérdida de fuerza: aumento de la catenaria, variación del perfil longitudinal (indicando una redistribución de carga entre los tirantes).
- alineación incorrecta de los cables (cambio de inclinación del cable en las zonas de anclaje), que provoca la fatiga en las zonas de transición anclaje-longitud libre.



Figura 11. Exceso de desvío en haz de tirante

- Contactos y roces con los elementos de conexión, tubos,... que provocan resquicios, propagación de fisura por fatiga en la sección de cable.

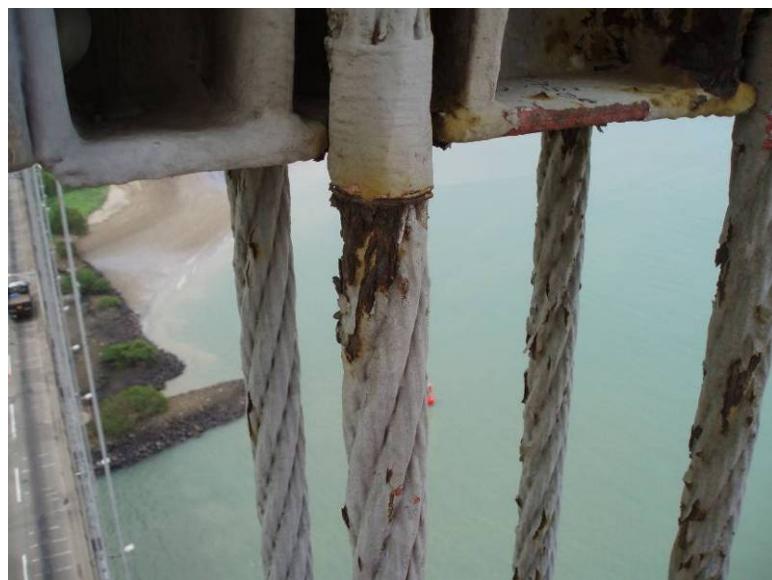


Figura 12. Corrosión y reducción de sección por resquicio y roce

- deterioro de las uniones atornilladas (tornillos sueltos o falta de tornillos) en uniones de tubos guía y tubos de encofrado, en los desviadores y centradores,
- verificación de las soldaduras y uniones de tubos de encofrado a paramento de tablero o pilono.

3.4.4. *Degradación por fenómenos aerodinámicos (vibraciones):*

- oscilaciones (que afectan al confort del usuario),
- generan fenómenos de fatiga de la sección corriente del cable, en particular en las zonas de conexión y puntos singulares,



Figura 13. Rotura de hilos periféricos con reanclado

- daños por golpes entre cables y elementos auxiliares como tubos, centradores, ...generan rotura y desprendimiento de elementos de conexiones.



Figura 14. Pistones de elastómeros reptados fuera del tubo de encofrado por oscilaciones del tirante.

3.5. Informes de inspección

La documentación que deberá producir la inspección de una estructura atirantada deberá incluir como mínimo:

- fecha de la inspección, nombre de los inspectores,
- programa de inspección,
- datos recuperados durante la inspección como resultado de la observación, de la medición, de la lectura de los sistemas de auscultación,
- documentaciones como fotografías y gráficos, muestras,
- condiciones meteorológicas de la inspección.

4. MÉTODOS DE INSPECCIÓN DE TIRANTES

El éxito de la inspección radica en obtener unos datos precisos, con un método fiable que se pueda reproducir en las sucesivas inspecciones, lo que pasa por:

- analizar los datos de la obra y de la tecnología de tirantes,
- proporcionar el acceso adecuado al inspector para permitir el examen detallado,
- disponer de zonas de trabajo correctamente delimitadas y señalizadas para garantizar la seguridad de los inspectores y de los usuarios de la estructura,
- proporcionar la técnica de medición adecuada para realizar las inspecciones no directas,
- disponer de unas herramientas de recogida, almacenamiento y procesado de datos acorde al volumen de información proporcionada por el plan de inspección.

4.1. Medios de acceso al lugar de inspección:

Para que el inspector pueda tener una visión detallada de la zona a examinar, resulta importante definir y recurrir a sistemas auxiliares como:

- Medios ópticos que permitan alejarse físicamente de la zona examinada, como teleobjetivos,
- Video vigilancia embarcada en robots que deslizan a lo largo del cable,
- Endoscopia o boróscopos que permitan inspeccionar las zonas ocultas o de transición estructura-anclaje donde la herramienta tradicional o la mano no puede llegar,
- Medios de accesos especiales que van desde las cestas, grúas móviles y camiones con brazos telescopicos para el acceso por debajo del tablero, hasta los accesos particulares que se trasladan sobre la longitud libre del cable (carrito con cesta), por debajo del tablero (pasarela inferior) o por fuera del pilono (ascensor) a fin de acceder a las zonas de transición y anclajes,



Figura 15. Pasarela inferior motorizada en el puente de Arade – Portugal.



Figura 16. Camión con plataforma de acceso inferior telescopica – Puente Vasco de Gama – Portugal.

- Técnicos especializados en trabajos en altura.



Figura 17. Inspección con alpinista en el puente de Normandía

4.2. Técnicas particulares de inspección

Tal como se ha mencionado antes, existe una serie de técnicas no destructivas, complementarias a la examinación que permiten obtener información sobre el estado de los cables. Las características del puente, su tipología, el sistema de cable empleado y las limitaciones presupuestarias determinarán la elección de las técnicas en cada caso. A continuación describimos los métodos más empleados por haber proporcionado datos fiables y útiles para:

- Medir la fuerza de los tirantes,
- Medir el grado de corrosión en los cables,
- Detectar fisuras y roturas en los aceros.

4.2.1. Pesaje de tirantes. Método lift off

Se trata de un sistema que permite conocer la carga existente en los tirantes mediante la aplicación de una tracción progresiva y controlada al anclaje. Por ello se conecta un gato anular, generalmente roscado al exterior del anclaje. Se aplica una tracción hasta que el anclaje se despegue de su apoyo, siendo entonces la presión de apoyo nula. De aquí se puede deducir que la fuerza de tracción es igual a la fuerza del tirante.

Generalmente se aplica el método de "lift off" que consiste en registrar las curvas presión-deformación y deducir por rectas de regresión la presión de despegue.

Es un método directo y muy preciso, cuyos únicos inconvenientes son las grandes dimensiones y peso de los gatos anulares necesarios.

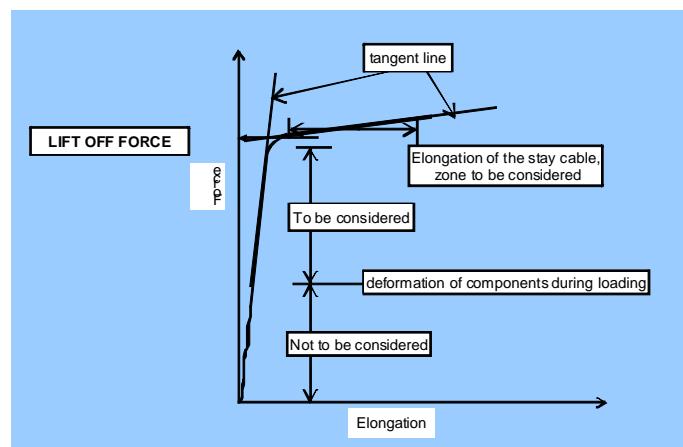


Figura 18. Pesaje por el método de lift-off en el puente de Arade en Portugal

4.2.2. Cuerda vibrante

El método de la cuerda vibrante consiste en medir la frecuencia natural del tirante, sabiendo que esta misma está en función de la fuerza, de la masa lineal y de la longitud del tirante. Para eso, se dispone un acelerómetro en el tirante y se provoca su vibración en un plano vertical. Sus ventajas

radican en la sencillez de ejecución, rapidez (multiplica por 4 a 5 el rendimiento con respecto al pesaje directo).

La frecuencia de vibración de una cuerda se relaciona con la tensión de la misma mediante la siguiente relación:

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

donde:

f_n : frecuencia del modo de vibración número n.

n: número del modo de vibración

l: longitud libre de vibración

T: fuerza de tensión del cable

μ : peso por metro lineal del cable



Figura 19. Método de la cuerda vibrante en el Puente Barrios de Luna

El acelerómetro registra el movimiento de vibración de un punto del tirante. Para ello se fija a unos dos metros de altura sobre el tablero. El eje del acelerómetro se sitúa en la generatriz superior del tirante. Una vez en su posición, el acelerómetro se conectará al analizador.

La puesta en movimiento del tirante se realiza manualmente tirando de un punto medio del tirante, tratando de acompañar y amplificar la oscilación con un período parecido al primer modo de vibración.

La señal del acelerómetro es recogida por el analizador de frecuencias que realiza un análisis FFT (Fast Fourier Transform) en el que se identifican las frecuencias de los diferentes modos de vibración.

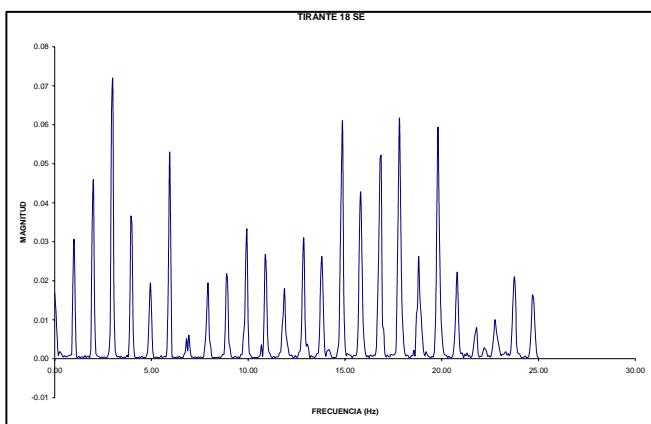


Figura 20. Ejemplo de espectro de frecuencias de un tirante del Puente Barrios de Luna

Dependiendo de la tecnología de tirante, es difícil determinar la longitud libre de vibración (distancia entre puntos de vibración nula), puesto que existen elementos desviadores, centradores, ...en la longitud libre del cable. Se puede actualizar la longitud libre a partir de la fuerza de un número representativo de tirantes obtenido, además, por el método directo de pesaje.

4.2.3. Vibración libre-amortiguada

El método de registro de movimiento de vibración mediante acelerómetro, se puede emplear a su vez para la caracterización de eficacia real de los amortiguadores de tirantes. Básicamente consiste en medir el decremento logarítmico del tirante, haciéndolo vibrar con el amortiguador puesto y sin él.

El amortiguamiento natural del tirante se caracteriza mediante el cociente de los logaritmos de 2 amplitudes de vibraciones contiguas.

4.2.4. Medición por ultrasonidos

Este método consiste en inspeccionar cables desde sus extremos. Así, en el caso de los anclajes de cuñas, se envía una pulsación ultrasónica desde el tramo de armadura que sobresale del anclaje (puntas). Se detectan los ecos de energía ultrasónica de respuesta que se producen cuando la pulsación se encuentra obstáculos (rotura) o anomalías (atenuación-dispersión por materiales oxidados).

Esta tecnología requiere la calibración previa de los ecos en función del tipo de cable y tipo de defecto. Su principal limitación reside en la longitud efectiva que se limita a 1,5 metros. Por ello está especialmente recomendado para la inspección de los anclajes.

El sistema automático de control da una gráfica de amplitud-tiempo de recepción de señal de respuesta. Por comparación se categorizan las respuestas con unas anomalías tipo (fisuras, roturas de alambres, contactos, defectos en el anclaje).

4.3. Flujo magnético

Se trata de un método no destructivo de inspección para localizar la presencia de corrosión o roturas en los hilos, cordones o alambres. Consiste en colocar unos sensores magneto-inductivos alrededor del cable e inducir un campo magnético. La transmisión del campo será completa si la sección del cable se mantiene constante. En el caso contrario, se provocarán perturbaciones y pérdidas en la transmisión del campo magnético.

Requiere una muestra sana de cable con el objeto de calibrar inicialmente el campo y poder a su vez evaluar cualitativamente las pérdidas globales de sección. Si no se dispone de esta muestra el

método se limita a indicar las zonas de mayor daño donde se observa una variación importante y repentina del campo.

Esta técnica da buenos resultados en caso de medios homogéneos, como los cables cerrados, pero no permite el estudio de puntos críticos como el interior de los macizos y las zonas de anclajes. Tampoco es posible su aplicación en los tirantes formados por un haz cordones paralelos auto protegidos o en secciones de cables con fuertes variaciones de sección metálica (vaina, collares).



Figura 21. Medición de flujo magnético en cables de puente colgante - Huesca

4.4. Medición del potencial de la corrosión

Se trata de un método cualitativo que determina la presencia de corrosión y su actividad, consiste en aplicar pequeñas señales eléctricas a un trozo de cable y medir la relación voltaje/intensidad, de la que se deduce la velocidad de corrosión I_{corr} .

Exige hacer contacto directo con el cable y situar el electrodo de referencia o los electrodos de medida sobre el hormigón.

En función del potencial de corrosión (E_{corr}), de la intensidad de corrosión (I_{corr}), de la resistividad del medio en caso de cables inyectados o embebidos en hormigón (ρ), se estima el consumo medio de sección anual en función de la velocidad.

Este método indica la actividad de la corrosión pero no la pérdida total o local de sección desde el estado original.

Esta actividad la desarrolla entre otros el CSIC IETS.



Figura 22. Medición de potencial en cabezas de cable de retenida embebido en hormigón - puente colgante.

4.4.1. Sensores magneto-estrictivos (MsST: Magnetostrictive Sensor Reflectometer):

El MsST es un dispositivo que genera y detecta ondas guiadas electromagnéticamente en materiales ferromagnéticos. Un impulso de ondas guiadas de frecuencia baja es enviado a lo largo del cable, y cuando este impulso encuentra defectos dentro del cable, una porción de la onda vuelve al lugar de emisión y es detectada por el mismo sensor. El tratamiento y la evaluación de la señal reflejada permite indicar los defectos del cable, para determinar la perdida de sección por corrosión o rotura.

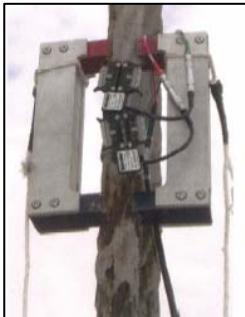


Figura 23. Puente Las Américas en Panamá (sistema Cable Scan® desarrollado en colaboración entre Pure Technologies y el SRWI (Southern Research Institute)).

5. MONITORIZACIÓN

5.1. Alcance

Monitorizar significa inspeccionar de forma continua para detectar y registrar los daños que pueden alterar el servicio y la funcionalidad de la estructura afectando a su seguridad.

A diferencia de una instrumentación, el objeto no es de proporcionar solamente datos que requieran un procesado y análisis, sino que está asociado a un sistema de gestión de alertas que permiten tomar de forma rápida las medidas de restricción de servicio y puesta en seguridad de la estructura.

A pesar de disponer de tecnologías y sistemas de transmisión fiables, monitorizar las estructuras nuevas no es frecuente.

Limitándonos a la monitorización de los tirantes, los aspectos más importantes a instrumentar son:

- Evolución de la fuerza de los tirantes, mediante la disposición de unas células de carga,
- Vibraciones de los tirantes. Como comentado anteriormente, se realiza mediante la incorporación de acelerómetros sobre el tirante,
- Detección de rotura de alambres, por el método que se describe a continuación.

5.2. La auscultación acústica

La vigilancia acústica trata de detectar la energía liberada por la rotura repentina de un hilo en tensión. La onda se propaga desde la fuente a través de la estructura asemejándose a un sonido. Al colocar un sensor en cada extremo del cable, y midiendo el tiempo de propagación hasta ambos sensores se permite localizar la posición de la fuente de la onda.

Por lo tanto el método permite la auscultación del 100% de la longitud del cable y de las zonas de anclaje.

Esta solución no proporciona una información directa sobre el grado de corrosión de la sección de tirante en un instante dado. Pero sí que permite, en función del número de eventos detectados, definir una velocidad de propagación de las roturas por corrosión.

Como parte de un sistema de monitorización continua, la auscultación está conectada a un sistema informatizado, donde se recogen todos los datos y se envían alertas.

La técnica se desarrolló para estructuras con problemas declarados con el objeto de monitorizar la evolución de las roturas individuales de la armadura. Proporciona la información necesaria para decidir cuándo se deben emprender medidas con el objeto de limitar los riesgos de daños mayores y colapso.

Este sistema ha sido ampliamente empleado en Estados Unidos, y de forma experimental en Francia para los puentes colgantes de Aquitaine y Tancarville. Actualmente se está empleando de forma preventiva en algunos de los grandes puentes como el puente sobre el Forth en Escocia, e incluso para puentes nuevos como el Viaducto de Millau en Francia o el puente Rion-Antirion en Grecia.



Figura 24. Puente sobre el estuario del Forth - Escocia. Acelerómetro de sistema auscultación acústica desarrollado por advitam.

6. MANTENIMIENTO DE TIRANTES

La valoración de las operaciones de mantenimiento debe hacerse tomando en cuenta: los estudios económicos y técnicos, las interferencias provocadas por la circulación y la perturbación del uso de la estructura. Podemos hablar de cuatro tipos de mantenimientos:

- **Mantenimiento rutinario.** Trabajos periódicos y programados (limpieza, pintura, reparación del galvanizado, etc.), estos trabajos pueden coincidir con las inspecciones rutinarias.
- **Mantenimiento especializado.** Trabajos programados pero que exigen una partida de presupuesto especial. Estos trabajos se pueden hacer coincidir con las inspecciones principales. Incluyen, esencialmente, el mantenimiento de los componentes auxiliares con una vida útil limitada y refección de las protecciones contra la corrosión. Estas operaciones deben tener una incidencia mínima sobre los usuarios ya que deben estar programadas desde el proyecto.
- **Mantenimiento Preventivo.** Trabajos que se efectúan antes de la aparición de problemas para evitar posibles daños o degradaciones y bajada de vida útil de la estructura principal. Entre las causas que lo pueden motivar están: ciertos defectos de proyecto y/o ejecución, desconocimiento del comportamiento a largo plazo de los materiales utilizados, desconocimiento a largo plazo del funcionamiento de elementos auxiliares o equipamientos, aparición de problemas en puentes similares, agresividad del ambiente no prevista en proyecto, etc. Se realizan como consecuencia de la valoración del estado del puente a lo largo de las inspecciones rutinarias y principales.

- **Mantenimiento Curativo.** Se tratan de las operaciones de reparación o refuerzos mayores, considerando como refuerzo aquellos trabajos que incrementan la capacidad portante inicial del puente o cualquier otra característica y que mejoran el nivel de servicio previsto en el proyecto original. En este caso incluiríamos la sustitución de un tirante.

6.1. MANUAL DE MANTENIMIENTO

El manual de mantenimiento es un documento que el fabricante e instalador de los tirantes debe entregar al contratista principal al finalizar la obra. Las principales funciones del manual son:

- planificar las inspecciones (periodicidad, responsabilidad, medios necesarios, etc),
- indicar los defectos y anomalías que pueden aparecer en los tirantes, cómo deben detectarse y reportarse,
- las acciones de mantenimiento recomendadas para cada evento.

Debe incluir una relación de los elementos que constituyen el tirante, codificándolos para facilitar su identificación, el equipo y herramientas necesarias para las inspecciones especiales de los tirantes. Así como una lista de repuestos y métodos básicos de reparación.

A continuación se reproduce una tabla en la se resume la periodicidad y el responsable de la inspección de cada elemento del tirante. Está tomada del Manual de mantenimiento del segundo puente sobre el río Orinoco en Venezuela.

Formulario de Inspección Nº Referencia	Designación del Mantenimiento	Responsable	Periodicidad en meses	Porcentaje a comprobar en cada inspección
A.1.1	Placas de apoyo y tubos de acero inferiores	N.S.*	12	50%
A.1.2	Exterior del anclaje inferior	N.S.	12	50%
A.1.3	Interior del anclaje inferior	FREYSSINET**	24	10%
A.2.1	Exterior del anclaje superior	N.S.	12	50%
A.2.2	Interior del anclaje superior	FREYSSINET	24	10%
A.2.3	Tubos de acero superior: inspección simplificada exterior	N.S.	12	50%
A.2.4	Tubos de acero superior: inspección completa exterior	FREYSSINET	24	10%
A.3	Mantenimiento de la vaina del tirante	N.S.	12	30%
A.4	Amortiguador de tirante	FREYSSINET	24	10%
B.1	Después de gran tormenta	N.S.	N/A	100 %
B.2	Después de accidente	FREYSSINET	N/A	N/A
B.3	Después de rayo	FREYSSINET	N/A	100 %
B.4	Después de terremoto	FREYSSINET	N/A	100 %
B.5	Después de incendio	FREYSSINET	N/A	N/A

*NS (Equipo No Especializado)

**FREYSSINET (Trabajos a cargo de la empresa especializada)

7. EJEMPLOS DE INSPECCIÓN DE TIRANTES EN PUENTES

7.1. Inspecciones “punto cero”

El **Puente Internacional de Guadiana** que une España y Portugal (1992, Cancio Martins, 324 m de vano central) y el **Puente de Arade** (1992, Armado Rito, 256 m de vano central) son dos estructuras atirantadas pioneras en el empleo de los cordones autoprotegidos. Los tirantes no están provistos de una vaina exterior global, quedando el haz de cordones paralelos a la vista con unas bridas entre cordones con el fin de evitar la vibración entre ellos.

Ninguno de los dos puentes había seguido una planificación de inspección y mantenimiento, por lo menos en lo que se refiere a tirantes. Al alcanzar los 15 años de edad, estos puentes fueron sometidos a una inspección detallada de toda la estructura que sirvió de punto cero para conocer el estado real de la estructura y así poder planificar las acciones de inspección y mantenimiento futuras mediante un plan de mantenimiento. Para la toma de datos se utilizaron como accesos pasarelas sobre carriles y elevadores sobre mástiles telescopicos. Toda la información quedó organizada en una base de datos especialmente creada para estos puentes con el software de gestión de estructuras scanprint®.

En lo que se refiere a los tirantes, se trató de conocer el estado de conservación de los elementos y medir los parámetros físicos (fuerza, geometría) para realizar la verificación estructural. Para ello se llevaron a cabo las siguientes tareas:

- Recopilación de los datos de proyecto, planos as built e histórico de la construcción,
- Diseño, fabricación, suministro y montaje de accesos por debajo del tablero y en la cara exterior del pilono,
- Inspección visual de cada tirante, realizando un inventario exhaustivo del estado de conservación de cada uno de los tirantes, base para un programa de mantenimiento,
- Endoscopía de las zonas de anclaje inferior,
- Reposición de elementos dañados como capots, desviadores, etc.
- Reinyección de los anclajes,
- Medición de la fuerza de los tirantes mediante el método de la cuerda vibrante, analizando los resultados junto con la nivelación de tablero,
- También mediante el método de la cuerda vibrante se midió el amortiguamiento natural del tirante.

Como conclusión a la inspección se redactó un manual de mantenimiento en el que se estableció un calendario de inspecciones con los alcances de las mismas. Finalmente se redactó un proyecto de reparación/mejora de los tirantes, actualizándolos con la evolución de la tecnología.

Con el objeto de alargar su vida útil las principales mejoras fueron: incorporar una vaina global de cubrición aerodinámica a los tirantes, incorporar unos amortiguadores internos en los tirantes de más de 80m de longitud y renovar los sistemas de protección anticorrosión.



Figura 26. Inspección de los anclajes superiores del Puente de Arade

7.2. Establecimiento de un programa de inspección en puente existente

Dos de los puentes atirantados pioneros en España, el **Puente de Rande**, que cruza la bahía de Vigo, el primer puente atirantado construido en España de 400 metros de luz, y el **Puente Ingeniero Carlos Fernández Casado**, de 440 metros, construido en 1978 y que cruza el embalse de Barrios de Luna utilizan la tecnología de cordones paralelos en vaina de PEAD inyectada con lechada de cemento. Desde 2000 se vienen realizando inspecciones y mantenimientos del puente con una periodicidad aproximada de unos tres años.

En el puente de Rande, las campañas han consistido en:

- Una inspección principal inicial que incluyó el diseño y suministro de los sistema de acceso al exterior del pilono, el pesaje de tirantes mediante cuerda vibrante con una calibración de la longitud libre de vibración mediante el pesaje con gato anular, una inspección visual de los tirantes con desmontaje de capots, inspección de cabezas de anclaje, sustitución de los tubos telescopicos superiores,
- inspecciones posteriores que vienen acompañadas por ciertos trabajos de mantenimiento tanto de los tirantes (cortes de vaina, pasivación de armadura, reinyección de mortero, sustitución de tramos de vaina...) como de otros elementos de la estructura (saneamiento y reparación de paramentos de hormigón, sustitución de juntas de dilatación, apoyos, barras de las bielas de retenida, apoyos guías transversales).



Figura 27. Acceso al exterior del pilono en el Puente de Rande

Además en el caso de Barrios de Luna realizó una medición del potencial de la corrosión de los cordones.

Estas inspecciones principales también se realizaron en otros puentes de luces medias como el **Viaducto Tamaraceite** (Las Palmas de Gran Canaria) o el **Puente de Los Olivos** (Getafe) donde al igual que en los anteriores ejemplos, se realizó una medición de la fuerza de los tirantes mediante el método de la cuerda vibrante y pesaje con gato anular, así como una inspección de los componentes del tirante, incluyendo:

- Una inspección visual global,
- Una inspección detallada de los tubos guía y desviadores,
- Una inspección del estado del interior del anclaje y su material de relleno.
- La entrega de un manual de inspección y mantenimiento.



Figura 28. Inspección del interior del anclaje superior del Viaducto de Tamaraceite

7.3. Programa de inspección en puentes recientes

Desde finales de los años 90, Freyssinet viene acompañando la entrega de sus sistemas de tirantes con manuales de inspección y mantenimiento.

Un ejemplo claro de inspecciones programadas es el **Puente Vasco de Gama**. Explotado en régimen de concesión por el consorcio Gestiponte, con sus 17,2 Km (12.345 m de viaductos y 4.840 m de accesos) se trata del puente más largo de Europa. Consta de un tramo atirantado de 824m con vano central de 420m. Inaugurado en 1998, se han realizado inspecciones principales en 1999, 2004 y 2008, alternadas con inspecciones rutinarias anuales de acuerdo con la agenda descrita en el Manual de Inspección y Mantenimiento.

El manual de mantenimiento, que incluía registros de inspección manual ha sido sustituido por una gestión integral de la inspección y el mantenimiento mediante software Scanprint®.

En la base de datos se dispone de un inventario informatizado del conjunto de informaciones relacionadas con la estructura (descomposición, planos, fotos, desordenes, fichas técnicas y de inspección).

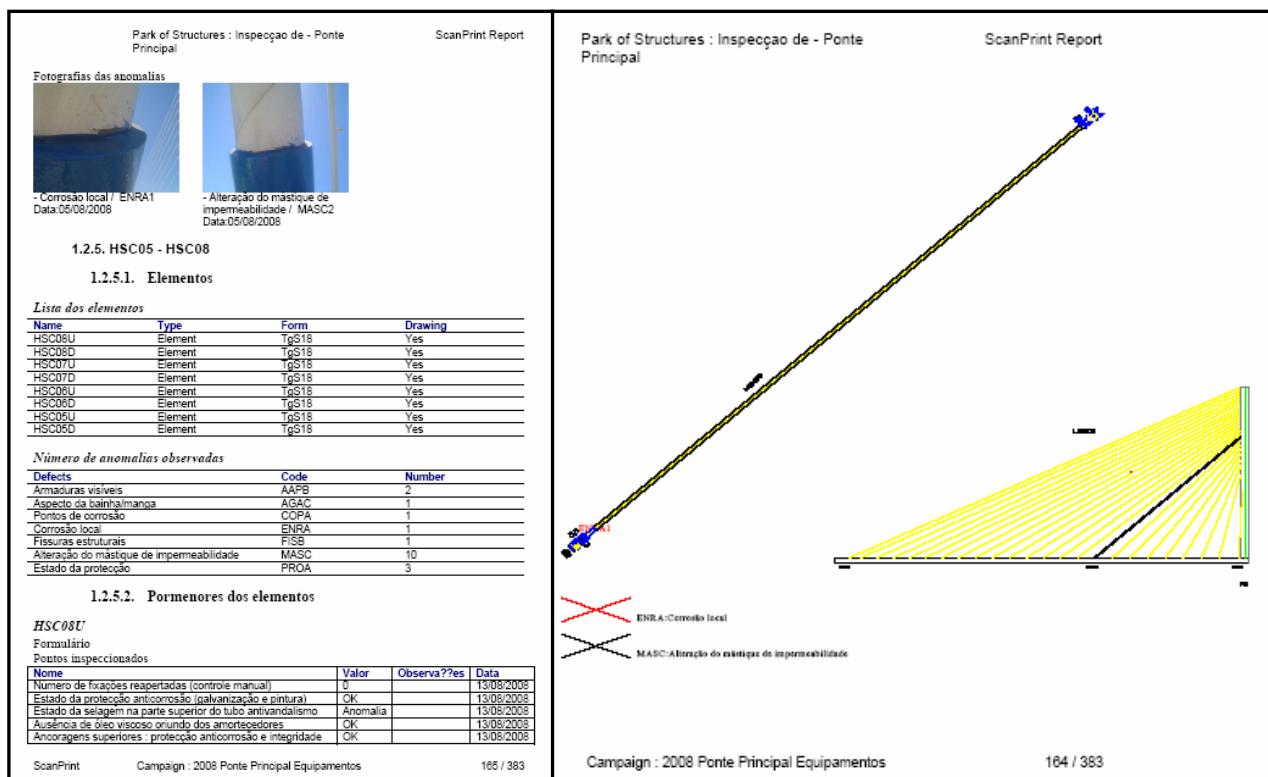


Figura 29. Ejemplo de informe de inspección de un tirante del puente principal

El puente se descompone en facetas, a las que le corresponde una hoja de inspección con la lista de los puntos y criterios a inspeccionar. La faceta toma la forma de un dibujos Autocad y con la ayuda de terminales informáticos móviles se realizan las inspecciones in-situ para señalar los defectos directamente sobre plano-faceta y grabación directa a la base de datos de Scanprint®.

7.4. Inspecciones excepcionales

Un ejemplo claro de inspección tras evento no esperado, es la desarrollada en los 2 **puentes atirantados gemelos sobre brazos del río Paraná en Zárate**, Argentina. Con un vano principal 330 m fueron construidos entre 1972-77, equipados con tirantes tipo HiAm (alambres paralelos enfundados en vaina de PEAD inyectada con lechada de cemento) y anclajes en forma de "mazarotas". Son puentes asimétricos frente a la carga viva, ya que recibe de un lado cargas ferroviarias y del otro lado cargas de carretera.

En 1996, un tirante del puente que cruza el brazo Paraná-Guazú se rompió cerca del cabezal del anclaje inferior. Los análisis posteriores mostraron que la mayoría de los 121 alambres de 7 mm de diámetro fallaron a 2 cm del cabezal con signos de corrosión y roturas frágiles en los alambres.

Para establecer unos umbrales de seguridad de los cables se procedió a una inspección de emergencia que incluyó: la determinación de la fuerza de los tirantes y nivelación del tablero, y la inspección visual complementada con una medición de rotura de hilos por el método de ultrasonidos en las zonas adyacentes al anclaje.

Posteriormente se estableció un protocolo de medición periódica por Ultrasonidos a cargo de la Unidad de Actividad Ensayos No Destructivos y Estructurales de la Comisión Nacional de Energía Atómica (C.N.E.A.) a fin de localizar hilos rotos y determinar la velocidad de degradación. Estas inspecciones mediante ultrasonidos fueron usadas como base para decidir los tirantes a sustituir durante la primera rehabilitación parcial, tomando como criterio de sustitución que el 10% de los hilos de los cables que conformaban cada tirante estuvieran rotos o gravemente deteriorados. Lo que supuso el reemplazo entre 1998 y 2002 de un total de 18 tirantes

Entre 2005 y 2007 se procedió a la sustitución de todos los tirantes del lado carretero (42) puesto que las inspecciones revelaban una evolución de los fenómenos de corrosión en las zonas cercanas al anclaje de una forma más marcada en los del lado carretero.



Figura 30. Detalle de la falla del tirante roto en Zárate

7.5. Ejemplo de monitorización continua: el Viaducto de Millau y el puente de Rion Antirion

El viaducto de Millau (Francia) está compuesto de 8 vanos atirantados: dos laterales de 204 metros de longitud y 6 claros intermedios de 342 metros de longitud. La instrumentación continua de los tirantes consta de:

- Control de tensión en tirantes con células de carga
- Vibración y variación de tensión bajo viento,
- Control de corrosión por auscultación acústica,
- Sistema de anemómetros (velocidad, dirección),
- 12 acelerómetros (6 en tablero, 3 en pilono, 3 en tirantes)

y además una instrumentación más tradicional como son:

- inclinómetros (2 en pilones y 2 en pila)
- 274 sondas de temperatura (en tirantes y en la estructura)
- 52 extensómetros.

El puente de Rion Antirion es un puente atirantado multi-vano uniendo la península del Peloponeso con la Grecia occidental. Sus 2252 metros de tablero continuo suspendido lo convierten en el segundo puente atirantado más largo del mundo. Está formado por una sucesión de luces de 560 metros.

El sistema de monitorización consta de:

- Control de tensión en tirantes con células de carga
- Vibración y variación de tensión bajo viento,
- Control de viento,
- Control de corrosión por auscultación acústica,
- Control de las aceleraciones en estructura y tirante,

Para ambas estructuras, el pliego de condiciones estipulaba la realización de una monitorización, una inspección y mantenimiento a largo plazo (objetivo de durabilidad de 100 años) con el fin de preservar la seguridad de los usuarios, controlar el comportamiento estructural y el envejecimiento de la estructura, y con la obligación de entregar la estructura en las mismas condiciones al final de la concesión.

Esto se materializó en:

- La disposición de los medios de acceso y los medios de ejecución material de la inspección,
- La redacción de un manual de inspección y mantenimiento: IMM,
- La elección de un sistema automatizado por ordenador para inspección y mantenimiento (scanprint®),
- la monitorización continua en tiempo real,

El objeto principal de la monitorización es proporcionar información en tiempo real a los usuarios y los gestores de la estructura, para asegurar el confort de tránsito sobre la estructura. Permite tomar las medidas de restricción del tráfico, velocidad o corte en el caso que los vientos, oscilaciones o eventos excepcionales impidan un uso seguro de la estructura.



Figura 25. Acelerómetro en el puente Rion Antirion.

Cabe mencionar, que dado la importancia de estas estructuras, el plan de inspección y de mantenimiento se ha realizado siguiendo métodos novedosos de análisis de riesgo de diseño, construcción, envejecimiento, operación, mantenimiento, etc. considerando las distintas etapas desde la gestación hasta el servicio de una estructura. A cada riesgo, según el momento en el cual se produce, se le atribuye una acción de prevención y corrección con factor de importancia. A partir de esto se realiza la planificación de la inspección y mantenimiento.

8. BIBLIOGRAFÍA

- **Recommendations for Stay cable design, testing and installation.** 5th edition PTI. Post-tensioning institute. Cap. 7 Stay cable inspection and monitoring (p. 75-85),
- **Recommendations for the Acceptance of Stay Cable Systems, using Prestressing steels.** Fib. Federation international du béton. Cap. 8 Inspection and Monitoring (p.70-73)
- **Cable stays. Recommendations of French Interministerial commission on prestressing** Junio 2002 . SETRA Cap. 13 Monitoring and maintenance of cable stays (p. 165-172),
- **NCHRP Synthesis 353. Inspection and Maintenance of Bridge Stay Cable Systems.** National Cooperative Highway Research Program Transportation Research Board , Washington DC 2005,
- **Manual de tirantes, E-12, Estructuras y Edificación ACHE, Colegio de ICCP.**