

# **TECNOLOGÍA DE FIBRA ÓPTICA PARA EL MONITOREO DE PUENTES. EJEMPLO DE SEGUIMIENTO DE LAS CARGAS DINÁMICAS DEL TRÁFICO EN PUENTES MEXICANOS.**

Fernando Sánchez Domínguez.

Ignacio Poy López.

Juan Jose Orozco y Orozco

EURORVA, S.A. Comunal 74, Acacias 03240, México D.F. (México)

fsanchezd@euroconsult.es; ipoyl@euroconsult.es; jjorozco@orvaingenieria.com

Peter Tanner.

INSTITUTO DE CIENCIAS DE LA CONSTRUCCIÓN EDUARDO TORROJA

C/ Serrano Galvache, 4

28033 Madrid (España)

tannerp@ietcc.csic.es

## **RESUMEN**

En el presente documento se describe la monitorización realizada en los puentes de la carretera Guadalajara-Colima (México) con tecnología de fibra óptica. En primer lugar se describe la tipología de los sensores empleados así como la metodología de la adquisición de datos.

Se presenta cómo se está realizando en los puentes un seguimiento estático y dinámico y las pruebas de carga realizadas para la “calibración” de los sensores en función de las cargas de tráfico reales.

Se concluye que la simple toma de datos sobre la estructura no es suficiente y que los datos registrados solamente son útiles si se consigue automatizar su tratamiento y explotación. Asimismo es necesario establecer unos criterios racionales, basados en la teoría de la fiabilidad estructural, que permitan definir valores umbrales para cada parámetro monitorizado.

## 1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de realizar un mantenimiento preventivo de los puentes en servicio, por medio de un seguimiento del comportamiento estructural real de las infraestructuras, puede estar motivado por diferentes causas, por ejemplo por el envejecimiento del patrimonio con el que se cuenta, por un aumento general del tráfico o por ajustes presupuestarios o incluso por exigencias de los usuarios en materia de seguridad.

El mantenimiento de un parque o conjunto de puentes se ha realizado tradicionalmente sobre la base de inspecciones periódicas reglamentarias de tipo visual, en las que predomina la valoración subjetiva de los criterios de aspecto y físico-químicos.

La dificultad que supone integrar en los programas de mantenimiento de infraestructuras criterios sobre el comportamiento estructural lleva a que estos no se hayan tenido hasta el momento en cuenta. Ahora, sin embargo, ya existe una tecnología de monitorización, que con un bajo coste permite determinar el comportamiento de los puentes, sobre criterios totalmente objetivos.

La ventaja de realizar un seguimiento de los puentes basado en criterios relacionados con el comportamiento estructural consiste en que permite dar respuesta a las necesidades urgentes de mantenimiento que existan y optimizar las posibles intervenciones. Simplificando, este tipo de monitorización de puentes basado en el comportamiento bajo cargas reales de tráfico permite al Director de Obra disponer de un registro del comportamiento del puente y conocer el comportamiento estructural en servicio le proporciona información que es directamente aplicable para el establecimiento de prioridades de intervención, sobre aquellos puentes en los que el riesgo de incidentes o deterioro sea mayor.

El programa de seguimiento de puentes que se describe a continuación contiene 3 etapas que en líneas generales son:

- Selección de las estructuras en las que será necesario hacer un seguimiento.
- Instalación de un sistema de seguimiento estático y dinámico en cada una de las estructuras durante un periodo limitado de tiempo o a largo plazo.
- Establecimiento y registro del comportamiento de cada puente en servicio bajo las cargas del Tráfico con Pesaje Dinámico.

La instalación de un sistema de monitorización permanente con registro del comportamiento puede ser debido a distintas causas:

- Asegurar el comportamiento estructural esperado.
- Confirmar la ausencia de patologías
- Prolongar el tiempo de servicio del puente
- Optimizar los gastos en mantenimiento y reparación
- Mantener en servicio el puente de forma segura.

## 2. MONITORIZACIÓN

Los sistemas estructurales se conciben y dimensionan de manera que permitan una utilización económica durante el periodo de servicio previsto, cumpliendo con unos requisitos predefinidos, relacionados con su aptitud al servicio y la seguridad estructural

En función de las acciones e influencias a las que las estructuras estén sometidas, se pueden producir procesos de deterioro tales como corrosión, fatiga o abrasión e incluso pueden sufrir daños a causa de eventos extremos que reducen sus prestaciones por debajo de los límites aceptables.

El caso que se presenta es el de dos estructuras con un determinado tipo de patologías que se manifiestan por la aparición de fisuras de fatiga y que se han ido reparando de forma continuada durante su vida útil. Se trata por tanto de estructuras ya muy deterioradas por el transcurso del tiempo y por el sucesivo paso de cargas de gran tonelaje. Como medida de seguridad estructural, estas estructuras se han monitorizado en base a criterios de primer orden (medida de deformación) con el fin de hacer un seguimiento de su comportamiento mientras dura la construcción de dos nuevas estructuras que sustituirán a las dañadas.

Los dos puentes existentes se encuentran en la traza de la carretera entre Colima y Guadalajara (México), siendo dos estructuras de características similares, cuyo tablero está formado por una tridilosa metálica (Figura 1) compuesta por nodos unidos a la losa superior de hormigón mediante 4 perfiles tubulares (PTR), y de la misma manera, unidos longitudinal y transversalmente por barras de acero corrugado.



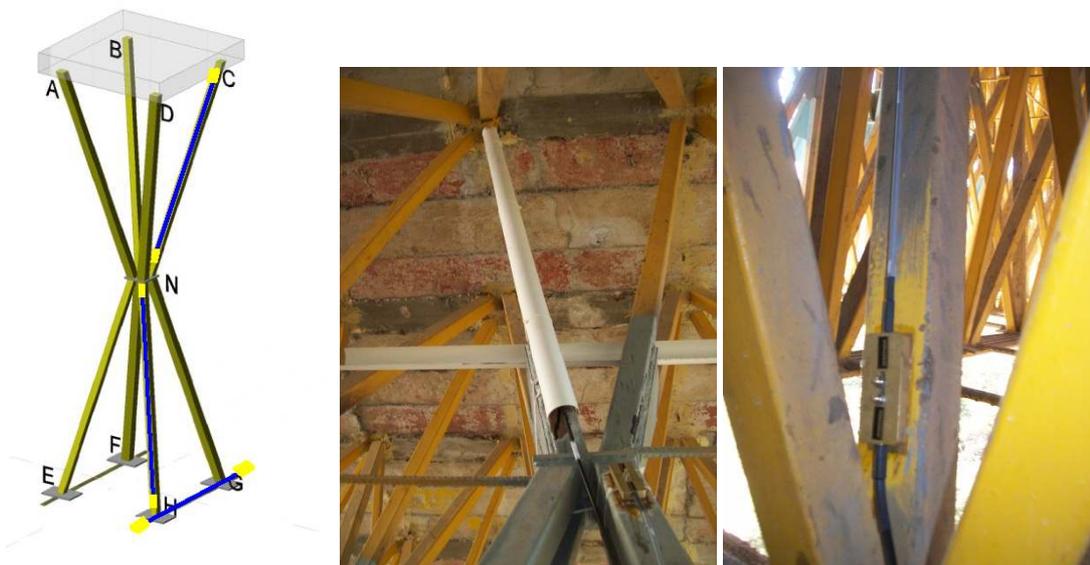
*Figura 1- Detalle de la estructura*

El primero de los puentes denominado “El Tapón” se compone de un solo vano de 65 metros de luz y el segundo, denominado “El nuevo” es de cuatro vanos con luces de

18.36, 65.26, 63.82 y 12.56 metros respectivamente. Las patologías observadas en las inspecciones periódicas realizadas son perfiles PTR dañados, juntas de transición dañadas, soldaduras fisuradas, apoyos desplazados y hormigón de tablero con pérdidas de sección.

Con estas premisas y dado que el Cliente quería disponer de un sistema de monitorización permanente y lo más precoz posible en la detección de posibles fallos se proyectó un sistema de seguimiento basado en sensores de fibra óptica.

En los puentes se distribuyeron secciones de instrumentación a lo largo del eje del tablero y en cada sección de auscultación se instrumentó un nodo (Figura 2), instalando una cuerda óptica de longitud 1,5 m para adaptarse a los perfiles tubulares tanto en el perfil superior como en el inferior, complementándose cada sección con otra cuerda óptica instalada solidariamente a las barras longitudinales inferiores.



*Figura 2-Detalle de la instalación de las cuerdas ópticas*

La elección de la localización de estos sensores se basó en criterios estructurales, instalándose en las secciones de máximos esfuerzos a flexión y máximos esfuerzos a cortante considerándose estos esfuerzos los esfuerzos críticos de la estructura que podrían estar provocando las patologías existentes.

La instrumentación se complementó con la instalación de varios extensómetros ópticos (Figura 3) en apoyos y en juntas.



*Figura 3-Detalle de la instalación de un extensómetro óptico en los apoyos*

Se utilizaron sensores de fibra óptica de tecnología OSMOS que están basados en el principio de medida de la variación de la intensidad de la luz (cuerdas ópticas de base larga y extensómetros).

La elección de este tipo de sensores se basó en sus características intrínsecas que se describen a continuación.

1. Se mantiene un contacto permanente del sensor con las zonas más críticas de la estructura que se hayan seleccionado.
2. Disponen de una base de medida muy amplia que abarca una parte importante de la estructura con una mejora de la información obtenida, en comparación con sensores que más cortos.
3. Permiten el seguimiento de fenómenos que se produzcan a muy largo plazo.
4. El mismo sensor permite el registro de fenómenos dinámicos incluso cuando son de frecuencia elevada.
5. Tiene la misma referencia para los registros estáticos y dinámicos.
6. Ofrece gran estabilidad en el tiempo ya que existen ejemplos de estructuras monitorizadas con este tipo de sensores desde hace años que están en servicio sin ningún mantenimiento.
7. Los sensores no están afectados por interferencias electromagnéticas.
8. El sistema es insensible a efectos parásitos al realizar la transmisión mediante una fibra óptica sin amplificación ni tratamiento de la señal.
9. Son de fácil instalación y mantenimiento.

### **3. SENSORES ÓPTICOS**

Los sensores de fibra óptica como se ha indicado anteriormente permiten controlar la evolución de una deformación, sobre una base de medida que pueda alcanzar gran

amplitud, En el caso que nos ocupa se fabricaron los sensores con longitudes especiales para la tridilosa ya que la longitud de los perfiles tubulares condicionaba a una disposición especial de los sensores determinada.(Figura 4).

En los puentes Tapón y Nuevo se han instalado dos tipos de sensores ópticos que se describen a continuación:

### 3.1. Cuerdas ópticas

Se trata de sensores para la medida de cambios de forma geométrica. Pueden tener entre 1 y 10 metros de longitud y se presentan con una gran variedad de configuraciones. Aunque cuentan con una base larga tienen precisiones en la medida de las deformaciones de 1 micra.



*Figura 4-Instalación de las cuerdas ópticas en los perfiles tubulares*

### 3.2. Extensómetro óptico

El extensómetro óptico es un transductor de desplazamiento basado en la variación de intensidad de la luz de muy alta precisión. Su diseño compacto le permite medir un amplio rango de longitud y desplazamientos hasta 5 mm.

El sensor registra cambios geométricos por medio de un palpador y los convierte internamente en señales ópticas. El sensor es capaz de registrar medidas, tanto dinámicas como estáticas sobre la misma base de medida, en periodos de tiempo que van desde unos instantes a varios años.

Estos sensores son los que además se utilizan para hacer un pesaje dinámico en la estructura de las cargas de tráfico (Figura 5).



*Figura 5- Extensómetro óptico instalado en apoyos*

#### **4. ADQUISICIÓN DE DATOS**

Mediante la conexión de los sensores a un cable de fibra óptica estándar, la señal puede ser transmitida a larga distancia sin necesidad de transformación ni amplificación hasta unas estaciones de monitorización que se han instalado en los puentes. Estas estaciones cumplen con todas las funciones de red y se encargan de adquirir los valores de las mediciones.

Cada estación de monitorización (Figura 6) está formada por una unidad de tratamiento y análisis de datos y de una unidad de adquisición de datos. El conjunto del sistema se configura remotamente mediante un servidor web o en modo offline mediante un editor. Un servidor de bases de datos establece un enlace por módem con todos los puntos de medida y configura y almacena todos los datos en bruto y de configuración.



*Figura 6-Instalación de las estaciones de monitorización*

En los puentes se ha instalado un sistema de alimentación autónomo, mediante paneles solares que asegura la monitorización permanente de la estructura y una conexión telefónica vía satélite.

El sistema permite una visualización de los datos en modo on-line, accesible mediante clave de una manera inmediata y permanente. También permite el proceso de datos tanto dinámicos como estáticos de un modo sencillo y rápido (Figura 7).

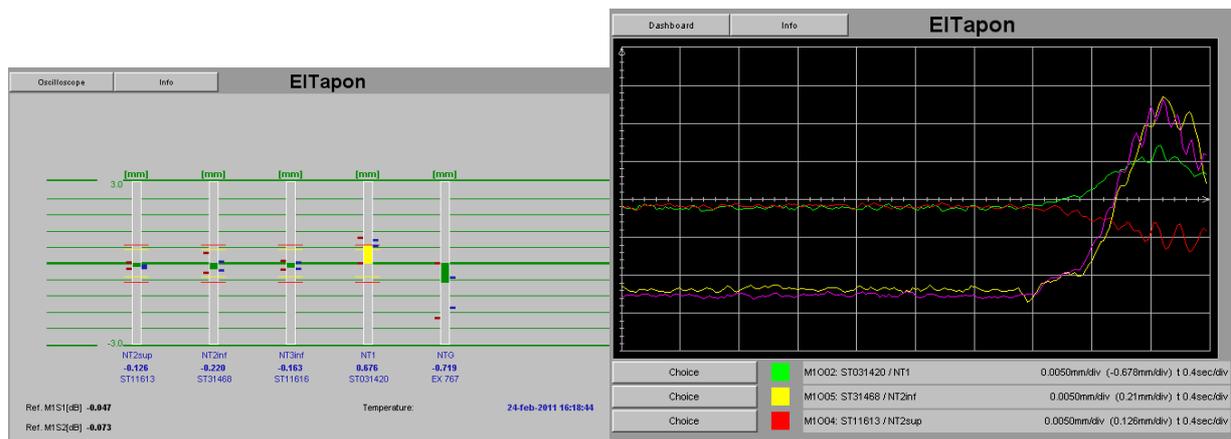


Figura 7-Pantallas de visualización de resultados de los puentes en tiempo real

El visor web de la monitorización permite realizar una primera valoración instantánea de la situación de la estructura ya que incluye el valor instantáneo de cada sensor, el valor máximo y mínimo diario y el valor máximo y mínimo histórico.

El post-proceso de datos permitirá un estudio más detallado del estado de la estructura pudiéndose realizar las gráficas y cálculos necesarios para el estudio del comportamiento dinámico y estático de la estructura.

## 5. SEGUIMIENTO DINÁMICO Y ESTÁTICO DE LAS ESTRUCTURAS

Por las dificultades y la afcción a los usuarios de la carretera ya que supondría el corte del puente para realizar una prueba de carga en condiciones estáticas y dinámicas, se decidió realizar unas pruebas de carga dinámicas simplificadas mediante el paso de camiones en diferentes posiciones y a distintas velocidades.

Debido a la ausencia de una evaluación estructural, no es posible establecer valores umbrales para los datos registrados en estas pruebas que sirvieran de indicadores para la seguridad estructural de los puentes. La idea consiste por ello en la repetición periódica de estas pruebas, comprobando los valores registrados mediante los sensores de fibra óptica con los valores correspondientes de las pruebas anteriores. En caso de observar diferencias significativas, es probable que en el tiempo transcurrido entre dos pruebas sucesivas se haya producido un daño en la estructura. Este se tendría que localizar, evaluar y en su caso reparar, para poder seguir usando el puente afectado.

El camión utilizado (Figura 8) debía alcanzar la velocidad de consigna de cada prueba, antes de entrar en el puente, y mantenerla constante hasta la salida.

Las pruebas constaron de 6 fases en cada uno de los puentes y se realizaron según el siguiente procedimiento:

- Un camión C3 (de 3 ejes) con una carga de 37,85 t circulando por el centro de la calzada a 10 y 40 km/h.

- Un camión C3 con una carga de 37,85 t circulando por el lado izquierdo de la calzada a 10 y 40 km/h.
- Un camión C3 con una carga de 37,85 t circulando por el lado derecho de la calzada a 10 y 40 km/h.



*Figura 8-Camión utilizado en la prueba de carga y su paso por la estructura*

Aunque muy simplificada la realización de esta prueba de carga permitió acercarse al conocimiento del comportamiento de la estructura y realizar una “calibración” de los sensores del sistema de monitorización que permitiera la valoración del comportamiento dinámico de la estructura durante el tiempo de servicio.

Los parámetros de valoración que se utilizaron en esta prueba de carga fueron:

1. Configuración del comportamiento elástico.
2. Amplitud de registro (peso o intensidad).
3. Frecuencia periodo propio de la estructura.
4. 2º y 3º modo de vibración.
5. Detección de impactos.
6. Comportamiento viscoelástico.
7. Conteo (incidentes repetitivos).
8. Velocidad reampliación de la carga.
9. Sincronización absoluta entre puntos de medida separados.
10. Detección de frecuencias extra-bajas.

En los gráficos siguientes (Figura 9) se muestran las curvas obtenidas por los sensores de fibra óptica bajo el paso de la carga del camión de prueba y cómo se analizan en ellas el comportamiento elástico, la amplitud, el amortiguamiento y los modos de vibración. Se debe tener en cuenta que con los sensores ópticos se obtienen señales que sin

amplificación no presentan ruidos y que permiten analizar el comportamiento con mucho detalle. Además al ser la transmisión óptica se puede realizar una sincronización absoluta entre todos los sensores ópticos instalados en la estructuras y comprobar si se reproduce el comportamiento en cada uno de ellos.

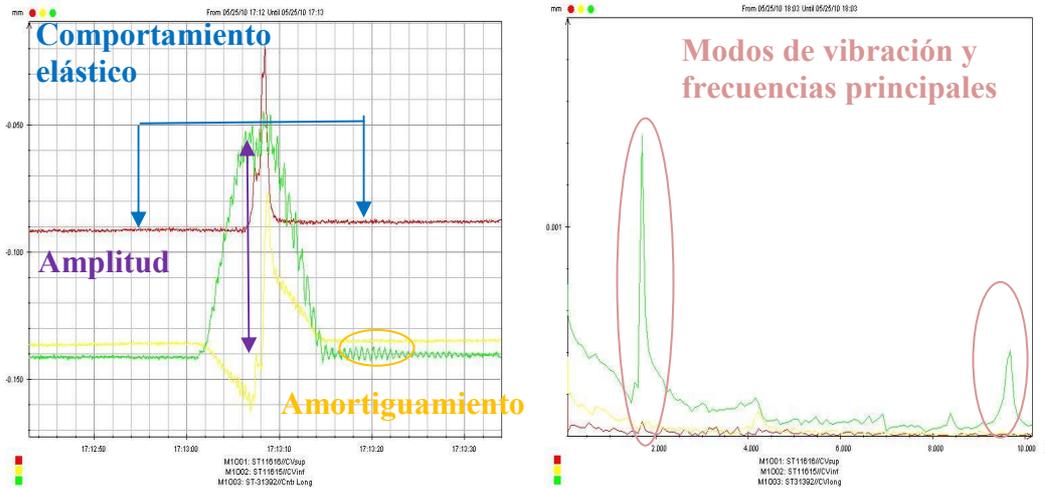


Figura 9-Gráficos del análisis dinámico de la estructura

## 6. SEGUIMIENTO ESTRUCTURAL DINÁMICO Y ESTÁTICO DE LAS ESTRUCTURAS DURANTE EL SERVICIO

Al disponer de sensores de cuerda óptica, actualmente se está realizando un seguimiento del comportamiento en servicio de las estructuras a nivel estático y dinámico sobre la base del mismo sensor.

### 6.1 Seguimiento estático a largo plazo durante el servicio

Mediante el registro de las deformaciones (Figura 10) que sufren los diferentes elementos de la estructura se está realizando un seguimiento del comportamiento a flexión y esfuerzo cortante, así como de la evolución de las juntas instrumentadas y de los apoyos.

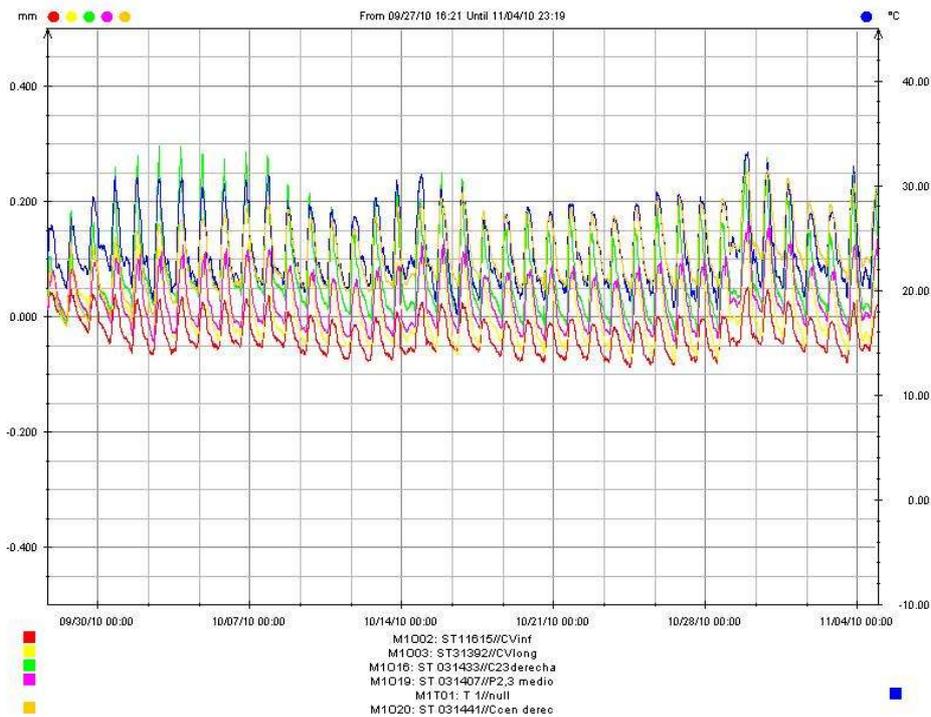


Figura 10-Grafico de deformaciones medidas en las cuerdas ópticas, instaladas en los perfiles tubulares, en relación con las variaciones térmicas que sufre la estructura.

La observación de los registros de los datos estáticos (Figura 11), obtenidos con el sistema de monitorización, detectará si se produce acumulación de tensiones en los elementos instrumentados que servirá de ayuda a la prevención de futuros daños en la estructura. Si se produjeran acumulaciones de tensiones estas serían síntoma de un comportamiento estructural anómalo que puede provocar daños o patologías en un futuro. En el caso de estos puentes se han encontrado acumulación de tensiones en algunos elementos, lo que ha llevado a realizar un seguimiento especial de estos.

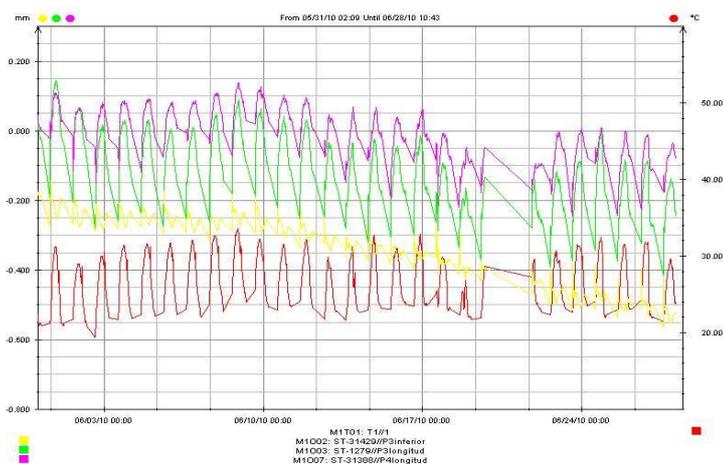


Figura 11-Grafico en el que se observa acumulación de tensiones en el tiempo en uno de los sensores

Como se ha comentado anteriormente también se han instrumentado los apoyos mediante extensómetros (Figura 12) para comprobar su comportamiento y prever si es necesaria su posible sustitución si no realizan el trabajo para el que están diseñados

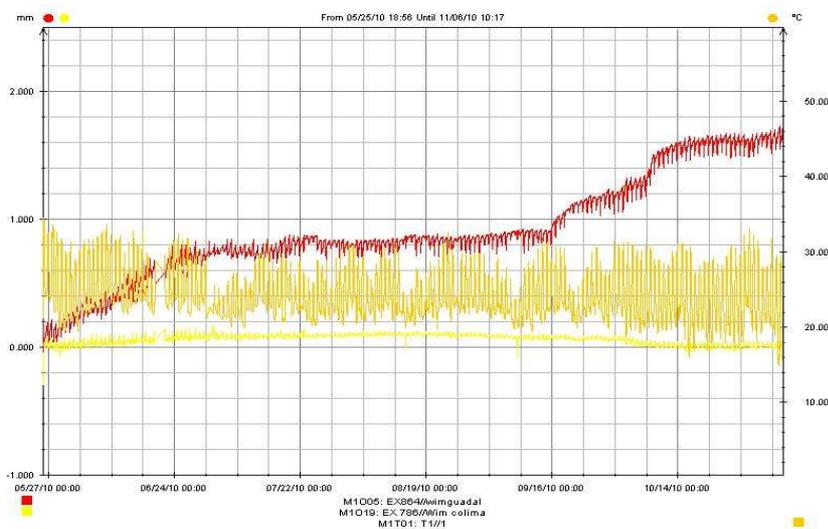


Figura 12 Registro de datos en el que se observa la deformación no elástica de los apoyos

## 6.2 Seguimiento dinámico de las cargas de tráfico de los puentes

En las estructuras en estudio, y con el fin de obtener la información más completa sobre su comportamiento en servicio, también se está realizando un seguimiento de su comportamiento dinámico bajo las cargas de tráfico que diariamente soportan.

Basándonos en los datos de las deformaciones, recogidos durante la prueba de carga que se realizó con anterioridad, se comprueban las cargas reales frente a los valores que se obtuvieron como referencia en ellas.

Además al sistema de monitorización se le implementó una cámara web (Figura 13), que permite valorar subjetivamente las cargas actuantes y relacionarlas con los registros obtenidos, de tal forma que se puede estimar las amplitudes máximas generadas, las frecuencias principales, los modos de vibración, el comportamiento elástico y el amortiguamiento.

En la siguiente figura se ve el ejemplo real de las deformaciones que se producen en los distintos elementos instrumentados bajo las cargas que aparecen en la imagen de la página web que se presenta.

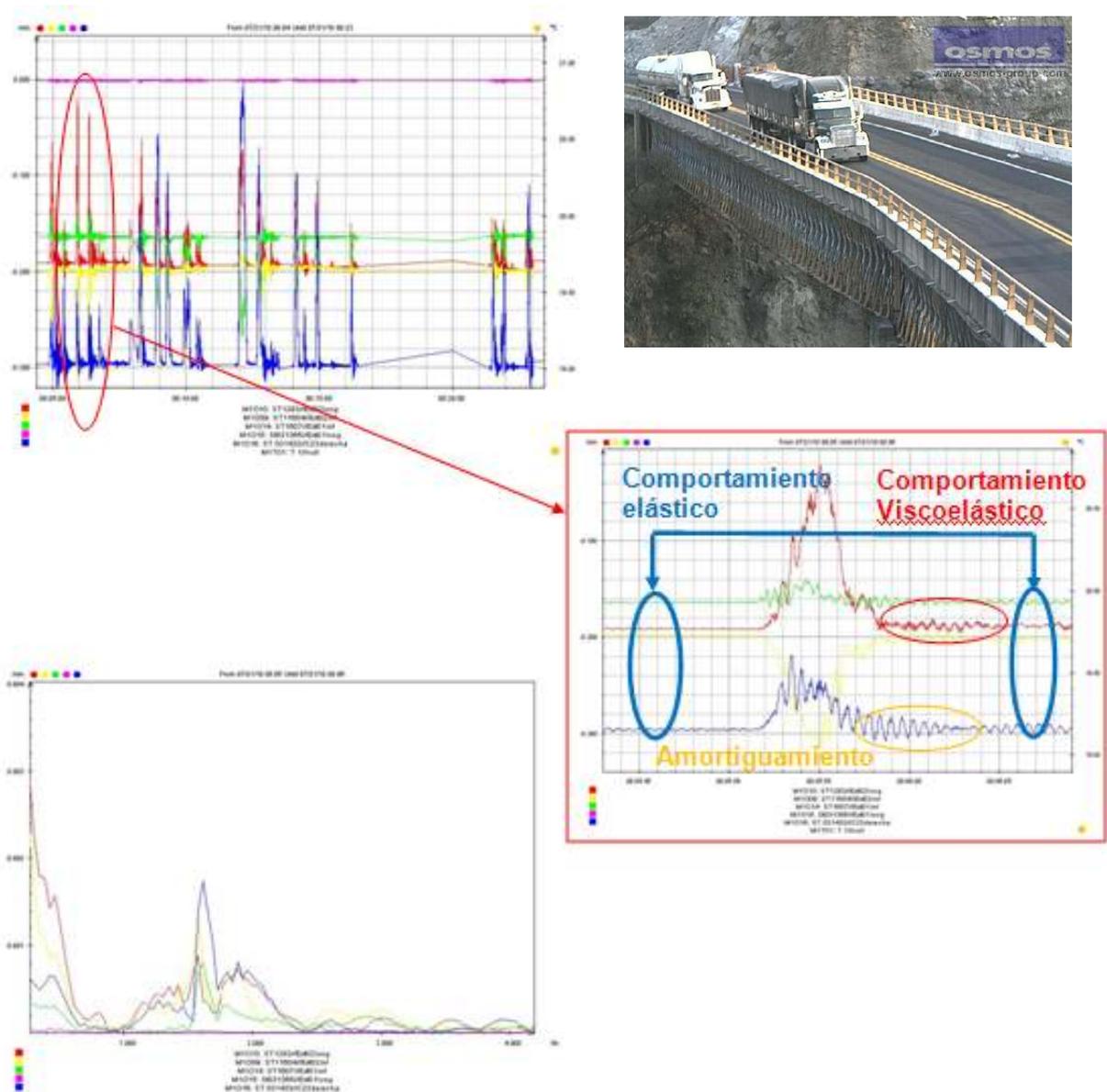


Figura 13 Registro de datos y cámara web para el seguimiento de cargas

## 7. CONCLUSIONES

Actualmente es posible disponer de sistemas de seguimiento y monitorización de estructuras basados en el análisis del comportamiento estructural bajo las cargas de servicio.

La instrumentación con cuerdas ópticas es muy rápida y sencilla, pero sin embargo, proporciona datos precisos sobre los efectos de primer orden (tensiones y deformaciones) que son los que nos permiten realizar un seguimiento preventivo de las estructuras.

Además actualmente ya se puede disponer de sistemas autónomos de comunicación y de alimentación lo que asegura que permanentemente se disponga de la información en tiempo real. La ingeniería estructural ahora dispone de herramientas, como la

monitorización con fibra óptica que se ha descrito de los puentes Tapón y Nuevo, que sobre la base de cálculos y ajustes de los modelos teóricos puede contribuir a estimar mejor el nivel de seguridad de las estructuras, en el momento actual en que los recortes en los presupuestos de inversión tanto en construcción como en mantenimiento tanto condicionan.

En este contexto conviene destacar que la mera adquisición de datos sobre una estructura no es suficiente. Estos datos sólo pueden ser útiles si se consigue automatizar su tratamiento y explotación. Es necesario establecer unos criterios racionales, basados en la teoría de la fiabilidad estructural, que permitan definir valores umbrales para cada parámetro monitorizado mediante sensores de fibra óptica. En caso de que alguno de los valores medidos supere el correspondiente valor umbral, el sistema activaría una alarma, automáticamente y en tiempo real. De esta manera, los responsables del mantenimiento de la obra podrían adoptar inmediatamente las medidas necesarias de mitigación de los riesgos.

## REFERENCIAS

1. TANNER, P., BENATOV, B., SÁNCHEZ, F., BENATOV, L. "Inspección y mantenimiento de los puentes. Preparados para el salto desde los congresos a la práctica". IV Congreso ACHE, Asociación Científico-técnica de Hormigón Estructural (Ed.), Madrid, 2008. ISBN 978-84-89670-62-4.
2. SANCHEZ, F., HODAC, B., ARRONIZ, S. "Auscultación y gestión de estructuras con tecnología de Fibra Óptica". IV Congreso ACHE, Asociación Científico-técnica de Hormigón Estructural (Ed.), Madrid, 2008. ISBN 978-84-89670-62-4.