
AVANCES EN LA INSTRUMENTACIÓN CON FIBRA ÓPTICA

V. Alegre – Ingeniero de Caminos
S. Villalba – Dr. Ingeniero Industrial.

COTCA S.A. info@cotca.com , web: <http://www.cotca.com>.

RESUMEN

Para gestionar el comportamiento en el tiempo de las estructuras que se diseñan para una vida útil determinada, y con un plan de mantenimiento previsto, una herramienta potencialmente útil por su versatilidad, y por el nivel de información de cuanto a micro deformaciones y variaciones del comportamiento con la temperatura de la estructura es la fibra óptica.

Cuando una estructura lleva la fibra óptica incorporada, se puede ir haciendo un chequeo de la estructura, incluso para casos especiales de forma continua. Si es un caso de mantenimiento se podrán medir micro deformaciones cada vez que lo indique el plan establecido.

La instrumentación con fibra óptica requiere un conocimiento previo de la estructura. Es importante colocar adecuadamente este “sistema nervioso” que controla la “salud” de la estructura, de forma que permita identificar donde se producen nuevas fisuras o nuevas deformaciones y cambios de temperatura. De esta forma se controla donde puede haber posibles roturas sin previo aviso o la influencia térmica, que quedarían sujetas a un plan de contingencias que limitara los valores máximos que detecta la fibra óptica, actuando en consecuencia.

ABSTRACT

To manage the behavior in time of the structures that are designed for a certain lifetime, and a maintenance schedule, a potentially useful tool for its versatility, and the level of information regarding micro deformations and changes in behavior with the temperature of the structure it is the optical fiber.

When a structure incorporates the optical fiber, you can check the structure, even for special cases continuously. For a maintenance cases you are able to measured micro strains every time you set the plan.

Optical fiber instrumentation requires prior knowledge of the structure. It is important to put in the right position the "nervous system" that works SHM “Structural Health Monitoring, so as to identify where new cracks or new strains and temperature changes occur. In this way, it control where there may be any breakages without notice or thermal influence, which would be subject to a contingency plan that would limit the maximum values that detects the optical fiber acting accordingly.

1. INTRODUCCIÓN

Para gestionar la vida útil de una estructura, es importante conocer su comportamiento en el tiempo, y como varían en el tiempo las variables relacionadas con su comportamiento mecánico y durabilidad.

Para avanzar en el comportamiento en el tiempo de estas estructuras, y poder establecer modelos que consideren su “historia de cargas”, hay que hablar con la estructura y preguntarle cómo se encuentra y que disfunciones tiene.

Una forma de hacerlo es instrumentándolo periódicamente, o en los casos que se requiera, de forma continua, y a través de estos chequeos, conocer como está de salud. Una de las herramientas más útiles y actuales en el SHM (“Structural Health Monitoring”), es la fibra óptica, que como sistema de monitorización continua es resistente al agua y a la corrosión, soslaya problemas de interferencias electromagnéticas y corrientes parasitas que se producen en otras técnicas, y permite lecturas simultáneas de hasta 5000 puntos de la estructura en estudio.

En este artículo se presenta un ejemplo de aplicación en un puente de la infraestructura de comunicaciones de Barcelona, en el cual se realizan operaciones de rehabilitación y mejora.

2. DESCRIPCIÓN DEL PUENTE. RAZONES PARA SU INSTRUMENTACIÓN.

El puente Sarajevo se encuentra situado en la Av. Meridiana a la entrada de la ciudad de Barcelona. Es un puente de dos tramos de 36 y 50 metros de luz respectivamente y está compuesto por tres vigas cajón de hormigón pretensado, como se muestra a la figura 1.



Figura 1. Puente de Sarajevo

El puente permite el cruce de vehículos y de peatones en los dos sentidos sobre la Avenida Meridiana, y para mejorar el tránsito de peatones y su estética, actualmente se encuentra en un proceso de ampliación en sus dos extremos laterales. Además de la ampliación, se realiza un ajardinamiento del puente como vía verde de entrada a Barcelona. Ello supone la creación de una pantalla verde en el lado de entrada, que junto a las modificaciones de viales y mobiliario da lugar a una variación de las cargas permanentes, y de uso del puente. Una de las características principales de este aumento de carga, es que su distribución no es uniforme en el sentido transversal del puente. La carga permanente es más grande en uno de los laterales de la sección transversal, de forma que se prevé que las deflexiones del puente aumenten, y también, que esté sujeta a un efecto de torsión, como se muestra en forma esquemática a la figura 2.

Por otra parte, al estar sobre una importante vía de entrada a Barcelona no es posible hacer operaciones de apeo que restrinjan la circulación o instrumentación en las vías de circulación.

A causa de lo anterior, se propuso llevar a cabo la monitorización del proceso de ampliación y mejora con fibra óptica para poder detectar los principales cambios en el comportamiento estructural del puente, y obtener información que sirviera para evaluar su seguridad estructural, durante y al final de las obras, y a lo largo de su vida útil.

2.1 ESQUEMAS DE POSICIONAMIENTO

Todo el sistema de monitorización se ha situado en la zona estratégica susceptible a la posible dinámica y evolución de la respuesta estructural (variaciones de microdeformaciones- tensiones, movimientos, posibles incrementos y/o desarrollo de mapas de fisuración, etc.) del puente a lo largo de los trabajos de ampliación y mejora. Este sistema de instrumentación ha sido seleccionado, considerando las condiciones de trabajo a las que estará sometido (variación térmica, humedad, etc.).

A continuación se muestra el alcance de la monitorización empleada (ver figuras 3-6):

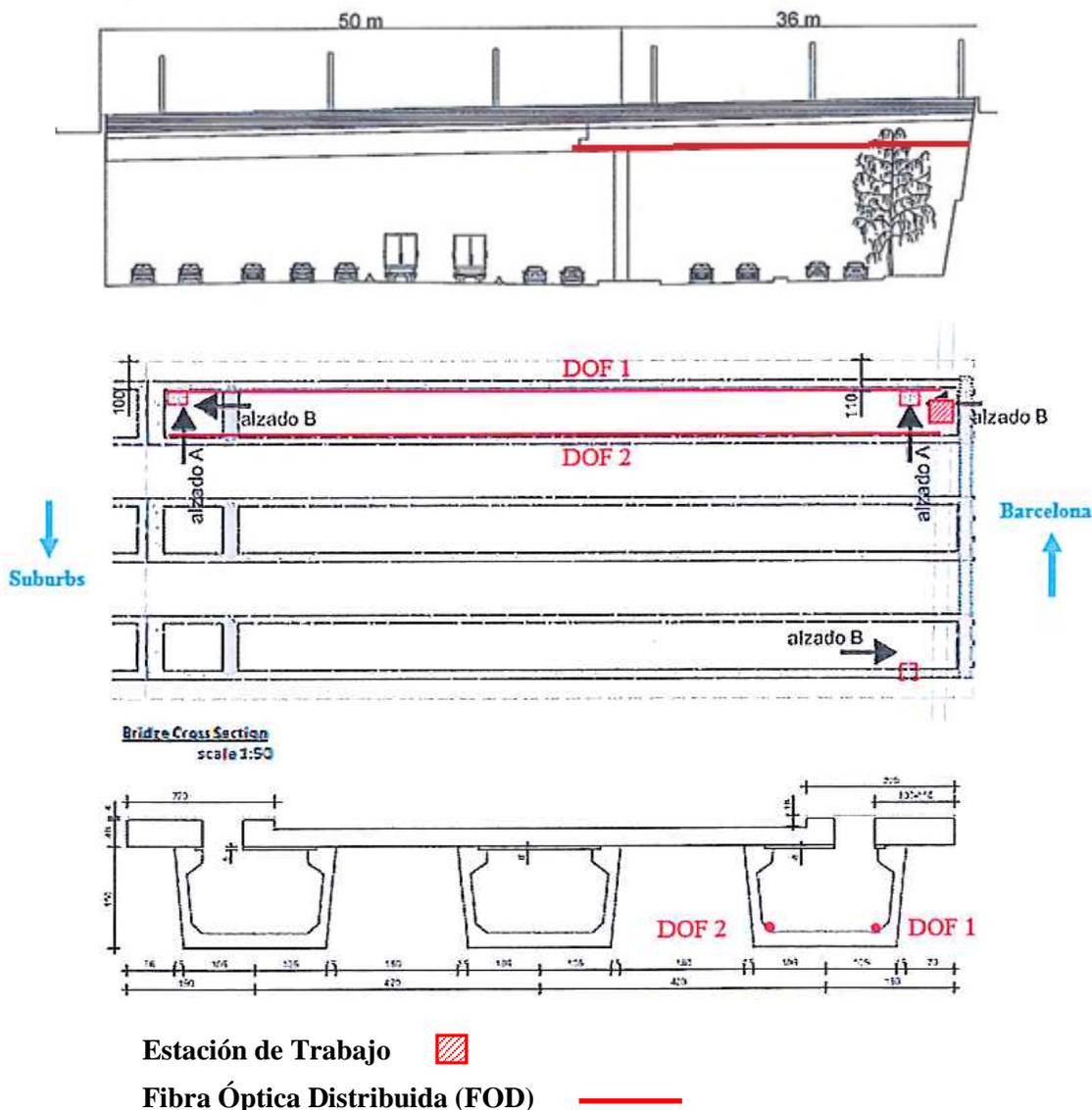


Figura 2. Esquema de la configuración de monitorización mediante FOD.



Figures 3 y 4. Procedimiento adherencia de la Fibra óptica en la base de las dos paredes laterales de la viga Artesa.

La longitud real de monitorización del Puente se ajusta a la longitud real del tramo de viga del cajón, siendo esta una distancia de 36.00 metros de longitud. Es decir, cada fibra óptica FOD1 y FOD2 se encuentra adherida 36 metros y los primeros 14 m se mantuvieron en el carrete que contiene la fibra óptica (sin adherir), el cual se fijó a la estructura con cinta americana. Este detalle se observa a la figura 11 junto con el sistema instalado dentro de la sección cajón del puente.



Figura 5 y 6. Carrete de fibra óptica restante sujeto a la estructura y ODiSI en funcionamiento.

La viga Artesa de lado Barcelona es la parte de estructura con más incremento de carga ya que, en gran parte del tramo, se aumenta una longitud de 2,30 metros de voladizo. Este el motivo de la instrumentación de esta viga en sus dos paredes laterales “almas verticales” para ver su influencia y variación tenso-deformacional.

3. RESULTADOS OBTENIDOS MEDIANTE MONITORIZACIÓN CON FIBRA ÓPTICA.

El análisis presentado a continuación contempla un muestreo significativo y representativo de resultados. La información obtenida mediante el ODiSI corresponde a lecturas continuas obtenidas en intervalos de tiempos combinados de forma: 1 lectura por cada 5 minutos y 1 lectura por cada 10 minutos. A partir de esta extensa información de valores obtenidos, se realiza una revisión de la misma y, de forma continua, analizan las mediciones de valores críticos (máximos y mínimos). Con ello se obtienen las gráficas envolventes de respuesta, es decir, se escoge la lectura pésima la cual se adoptará como representativa del intervalo especificado. (Figuras 7 y 8)

Como ejemplo, se incorporan las envolventes de las lecturas efectuadas del inicio hasta el 9 de Octubre: 29/06/2015, 16/07/2015, 15/09/2015, y 09/10/2015.

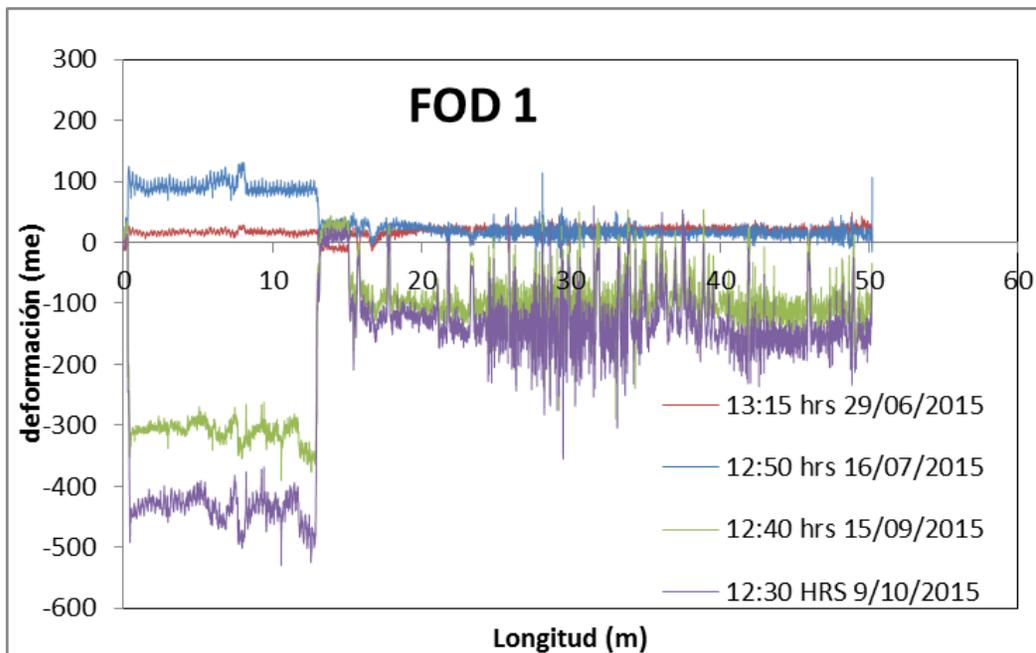


Figura 7. Evolución FOD1 durante el intervalo de tiempo de monitorización.

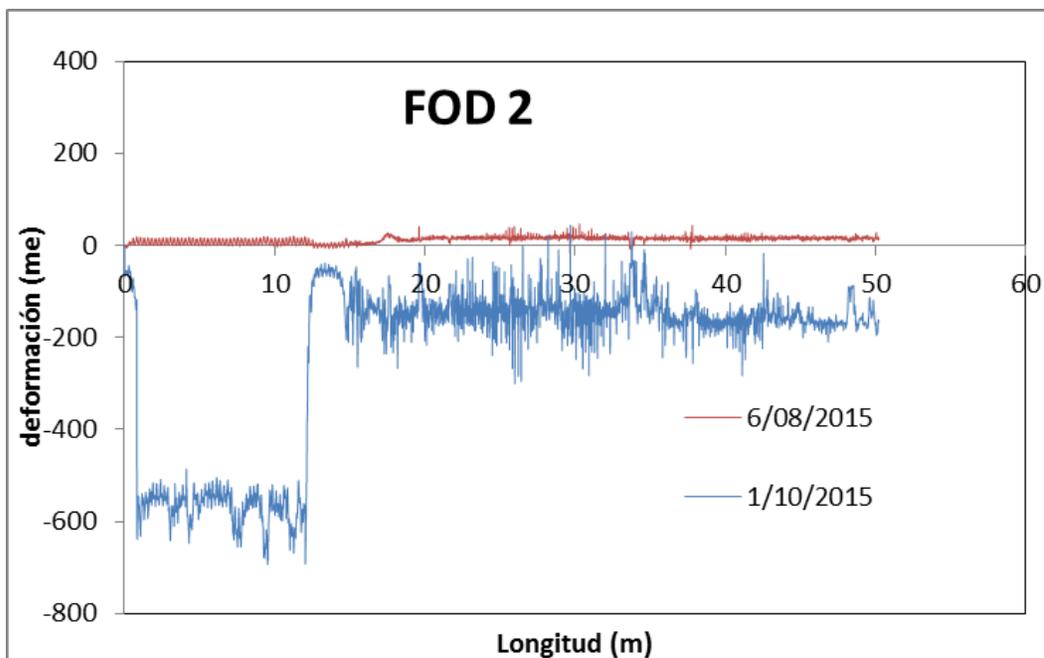


Figura 8. Evolución FOD2 durante el intervalo de tiempo de monitorización.

Se van realizando lecturas periódicamente y cada vez que se produce alguna actuación relevante (eliminación de pavimentos, puesta en carga de la pantalla verde, etc,...).

Las figuras 9 y 10 presentan la evolución de la respuesta de la viga cajón “Artesa” a lo largo de la monitorización realizada mediante la FOD 1 y FOD2 hasta la fecha del 18 de febrero del 2016. Con estas dos figuras podemos resumir el comportamiento y respuesta estructural que ha sufrido la viga a lo largo del transcurso de la obra, y con la interacción de las diversas acciones que han predominado en este periodo de tiempo.

Avances en la Instrumentación con fibra óptica

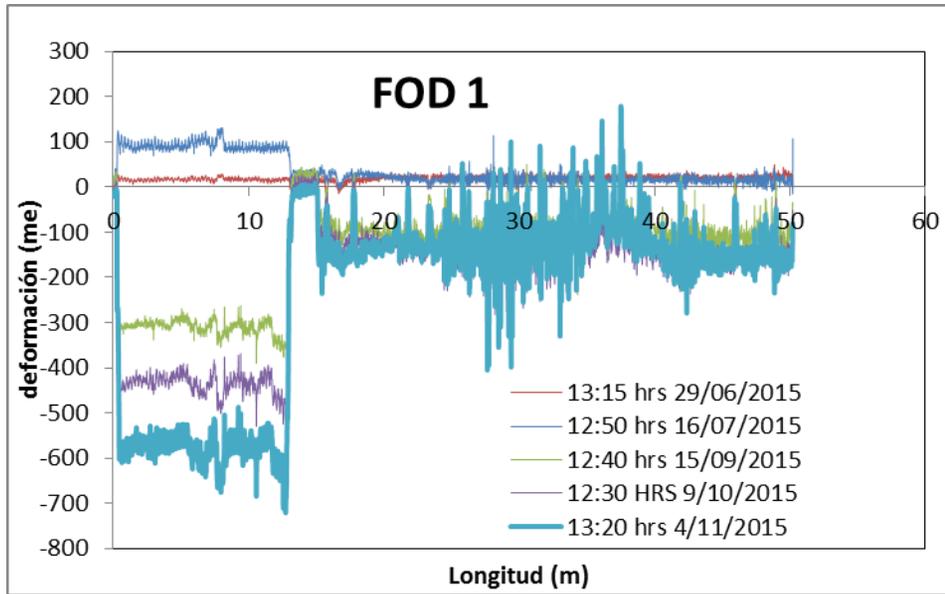


Figura 9. Evolución FOD1 durante el intervalo de tiempo de monitoreado.

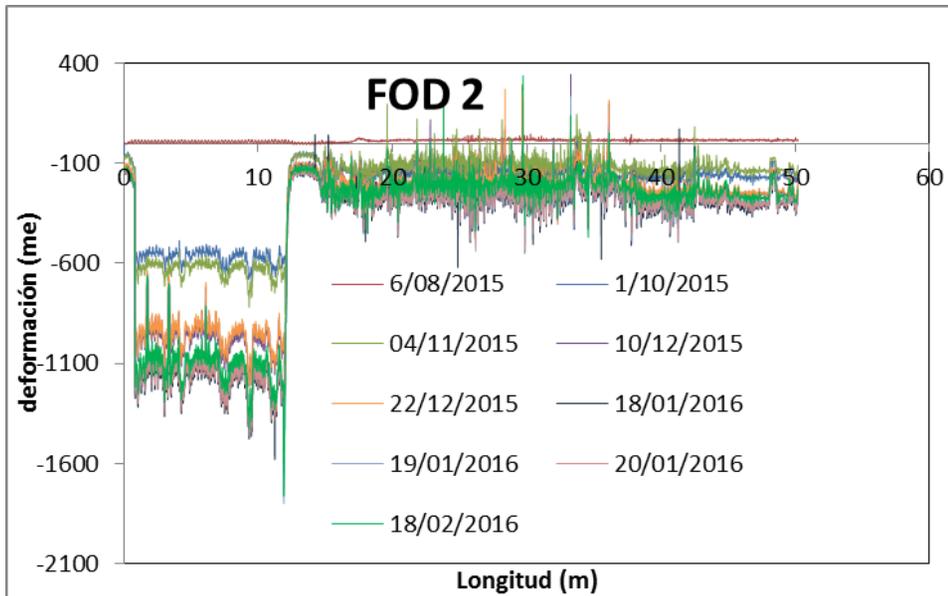


Figura 10. Evolución FOD2 durante el intervalo de tiempo de monitoreado

Con el fin de poder dar más resolución a las gráficas anteriores representadas, a continuación se incorpora la figura 11 relativa a la fibra FOD2, en diferentes tramos de la misma, para poder valorar la evolución de la monitorización.

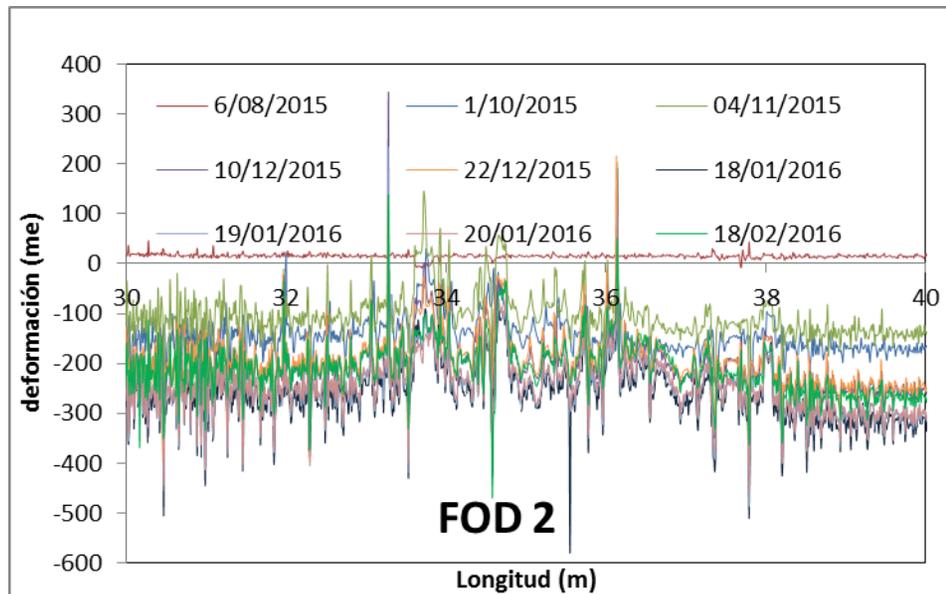


Figura 11. Lecturas de las deformaciones a lo largo de la FOD2 durante distintas etapas de monitorización temporal en el tramo de fibra FOD2 adherido de 30 a 40 m.

Se comparan las lecturas realizadas en la FOD1 y FOD 2 (figuras 9 y 10) desde el origen, las cuales comprenden una monitorización superior a los 7 meses y medio. Los cambios en las deformaciones del puente se muestran en función de la primera lectura del 29 de junio (para el caso FOD 1) y del 6 de agosto (para el caso de la FOD 2).

Se puede apreciar la influencia del aumento de temperatura en las lecturas de junio y julio, la cual produce un efecto axial de tracción a lo largo del puente; y como a partir de las lecturas realizadas en los meses de septiembre hasta enero, el descenso importante de la temperatura ambiente, genera un aumento de los valores de compresión en la parte inferior de la viga “Artesa”.

A tal efecto se le tiene que añadir el efecto de la descarga generalizada sufrida en el puente desde origen debido a la eliminación del panot, acera y fresado del aglomerado. A pesar de que en el mes de noviembre, la ejecución de una parte de la nueva capa asfáltica por el tráfico de vehículos, indujo un cambio en la tendencia de los valores de $\mu\epsilon$ obtenido (disminución de los valores de microdeformaciones a compresión), los meses de diciembre y enero, al disponer de un descenso más significativo de la temperatura ambiente que no del incremento de cargas del puente, ha supuesto que vuelva a aparecer un incremento de los valores de microdeformaciones a compresión.

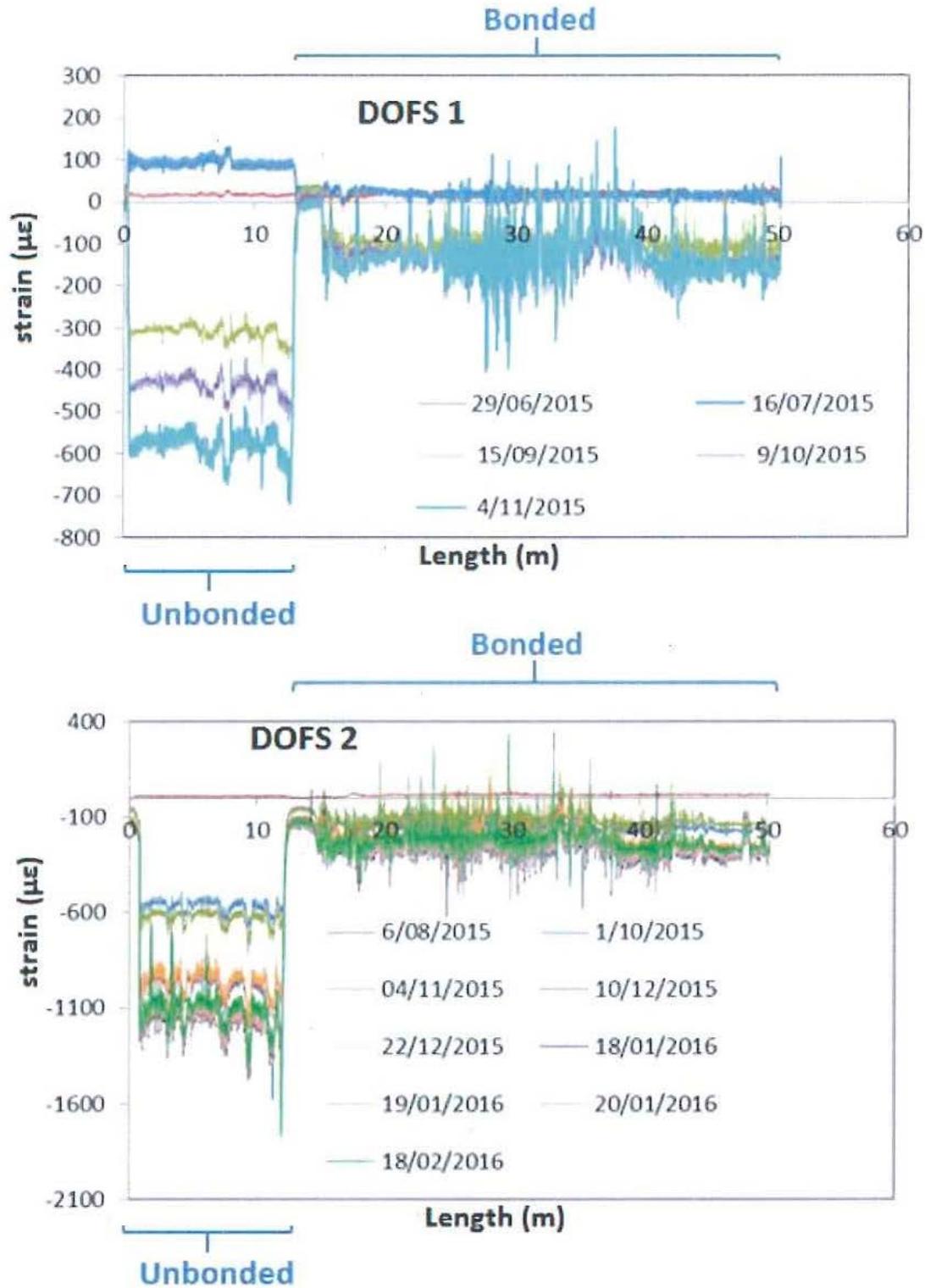


Figura 12. DOF. Evolución de las lecturas 1 y 2 para el intervalo del período de monitoreo

En dichas figuras 9 y 10 se comparan las lecturas realizadas en la FOD1 en las cuatro fechas de monitorización del puente Sarajevo en la FOD1, las cuales comprenden algo más de 3 meses. Los cambios en las deformaciones del puente se muestran en función de la primera lectura en la FOD1, el 29 de junio. En esta comparación, se puede apreciar la influencia del aumento de temperatura en las lecturas de junio y julio, y la cual produce un efecto axial de tracción a lo largo del puente. De manera contraria, las lecturas realizadas en los meses de septiembre y octubre, cuando se ha producido un descenso importante en la temperatura ambiente, reflejan en la compresión del puente.

A tal efecto se le tiene que añadir el efecto de la descarga generalizada que ha sufrido el puente debido a la eliminación del panot, acera y fresado del aglomerado. En este intervalo de tiempo únicamente se han incorporado las costillas metálicas en los dos lados del puente.

Se observa que, en las lecturas de septiembre y octubre, la fibra ha detectado mayor amplitud en las lecturas obtenidas que reflejan el registro obtenido de las tareas de eliminación del pavimento y fresado. Estas amplitudes entre puntos de interrogación de la fibra son generadas por las vibraciones generadas por el desarrollo de los trabajos.

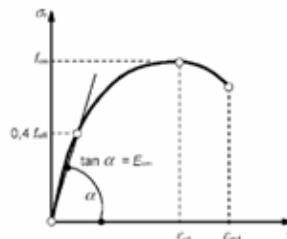
Estas consideraciones son totalmente aplicables en la monitorización realizada con la FOD2.

Respecto a los análisis de tensiones, y a partir de la definición del módulo de deformación longitudinal secante E_c de hormigón y por un estado de tensiones en condiciones de servicio del 0,40 fcm (o del 0,5 fck); es decir, para un estado o estadio elástico donde las tensiones de las fibras del hormigón de la sección son proporcionales a las deformaciones, se desprenden que a pesar de observar una variación de $\mu\epsilon$, estas no inducen unas tensiones excesivas en la misma. Se tiene que añadir que estas tensiones corresponden en un estado de compresión del hormigón. A partir de las ecuaciones constitutivas del material y de los diagramas tensión-deformación de cálculo del material se obtiene que, el incremento de microdeformaciones traducidas al campo de tensiones implica las siguientes variaciones (aumentos) de tensiones:

FOD 1 $\Delta\sigma$ 3.64 MPa \rightarrow per 97 $\mu\epsilon$

FOD 1 $\Delta\sigma$ 5.40 MPa \rightarrow per 144 $\mu\epsilon$

FOD 2 $\Delta\sigma$ 6.04 MPa \rightarrow per 161 $\mu\epsilon$



Representación esquemática de la relación tenso-deformacional del hormigón

Estos valores de variación de tensiones no inducen ninguna alteración en la respuesta de la estructura, además de tener presente, que de esta variación de tensión, es un incremento de compresión en la parte inferior de la viga "Artesa", y que un porcentaje importante es debido a las variaciones térmicas de la estructura. De forma que las actuaciones que se están realizando, no suponen ninguna repercusión en una respuesta deficiente de la estructura monitorizada.

4. INFORMACIÓN EN EL TIEMPO.

La lectura continuada establecida ha permitido una vez hecha la calibración y la lectura inicial que mostraba posibles incidencias de defectos locales:

- Conocer la repercusión de la temperatura en el comportamiento del puente. Se midieron valores de tensión por temas térmicos del valor 3,7 MPa

Avances en la Instrumentación con fibra óptica

- Valorar la repercusión de las operaciones que afectaban a las variaciones de concargas a que daban lugar la remodelación, que dejaban a la viga siempre en compresión. Se midieron valores máximos globales de hasta 8,5 MPa.
- Observar que la torsión adicional que se preveía no ha sido significativa.
- Estudiar las variaciones de microdeformación en algunos puntos, por ejemplo en las juntas frías de hormigonado de las vigas prefabricadas.
- Dejar la fibra óptica protegida para futuras mediciones.

5. CONCLUSIONES

- Se ha realizado la monitorización de un tramo de viga del puente, que ha supuesto un control de la estructura en servicio durante los ocho meses (Jun. 2015 – Feb. 2016) que abarcan las obras de rehabilitación y creación del “puente jardín” de entrada a Barcelona.
- La monitorización ha servido para identificar y caracterizar técnicamente los incrementos de tensiones de tracción y compresión, como consecuencia de las distintas fases de la obra, desde antes de comenzar, con las lecturas de calibración previas hasta la fase de desmontaje de pavimentos y aceras, montaje de las pantallas verdes, así como situaciones de circulación de vehículos, y puesta en servicio final.
- Durante este periodo, las variaciones de microdeformaciones de la fibra FOD 1 han sido de 153 $\mu\epsilon$ que traducidas a tensiones suponen una variación de tensión máxima de 5,75 MPa. Respecto a la fibra FOD 2, el valor máximo obtenido ha sido 252 $\mu\epsilon$ es decir 8,51 MPa.
- Estos valores son aceptables para este tipo de estructuras, por tratarse de valores de compresión en el hormigón. Por otra parte, en estos valores están incluidos los efectos térmicos por lo que la repercusión de los trabajos realizados en el puente durante las obras, darán valores inferiores a los aquí reflejados.
- A partir de las variaciones obtenidas en la monitorización de la fibra FOD 2 a lo largo de este medio ciclo térmico, se puede considerar que la repercusión de la acción térmica en el puente ha sido de unos 3,7 MPa, lo que da idea de su importancia en el comportamiento del puente $\mu\epsilon$.
- Una vez confirmado que el puente se encuentra en unas condiciones de seguridad adecuada, se ha dispuesto un registro permanente para acceder a la viga “Artesa”, y poder realizar lecturas intermitentes a lo largo de su vida útil para conocer el comportamiento diferido. Esto se ha planteado dentro del preceptivo plan de mantenimiento del puente.

AGRADECIMIENTOS.

Se agradece a los técnicos de BIMSA (Barcelona d’Infraestructures Municipals, S.A.) las facilidades dadas para las toma de datos y obtención de información.