



Monitorización de deformaciones y temperaturas en la estructura de un túnel artificial de alta velocidad mediante sensores ópticos puntuales, de longitud y distribuidos

High-speed railway tunnel monitoring using point, long gauge and distributed strain and temperature fiber optic sensors

B. Torres^(*), I. Payá-Zaforteza^(*), D. Barrera^(*), Y. A. Alvarado^(**), P. A. Calderón^(*), A. Loayssa^(***), M. Sagües^(***), A. Zornoza^(***), S. Sales^(*)

RESUMEN

La monitorización de estructuras es una rama de la ingeniería estructural que está captando mucha atención actualmente. Las deformaciones y temperaturas son, habitualmente, los parámetros monitorizados porque son los que mejor representan el comportamiento estructural. De todos los tipos de sensores existentes, los basados en fibra óptica resultan especialmente interesantes debido a sus ventajas comparativas sobre los sensores convencionales. En este artículo se presentan los trabajos de monitorización de la estructura de un túnel artificial de Alta Velocidad construido en Mogente (España) mediante tres tipos de sensores ópticos desarrollados por los autores. Los resultados de los sensores se comparan con los proporcionados por un modelo teórico de elementos finitos. Esta comparación confirma que los sensores reproducen notablemente bien la pauta general de comportamiento de la estructura, incluso con pequeños niveles de deformación ($5\mu\epsilon$). Por último, el artículo discute el comportamiento de los sensores, sus mediciones y sus campos de aplicación.

Palabras clave: Sensores de fibra óptica; sensor puntual; sensor de longitud; sensor distribuido; monitorización estructural; monitorización de túnel; deformación; temperatura.

ABSTRACT

Structural Health Monitoring (SHM) is presently having a great development. Strains and temperatures are usually the key parameters to be monitored due to their relevance when explaining structural behavior. Several types of sensors are used in SHM, but fiber optic sensors are especially interesting due to their advantages with respect to conventional sensors. In this paper, the monitoring of a high-speed train tunnel recently built in Spain using three types of fiber optic sensors developed by the authors is shown. Results given by the sensors are compared to those provided by a theoretical model built using FEM. Comparison of measurements and theoretical results confirms that the sensors reproduced remarkably well the general patterns of the tunnel structural behavior, even when strains are relatively small (around $5\mu\epsilon$). Finally, the paper discusses the behavior of the sensors, their measurements and their field of application which is useful for researchers and practitioners.

Keywords: Fiber optic sensors; point sensor; long gauge sensor; distributed sensor; Structural Health Monitoring; Tunnel monitoring; strain measurements; temperature measurements.

(*) Universitat Politècnica de València (España).

(**) Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá C.D. (Colombia).

(***) Universidad Pública de Navarra. Pamplona (España).

Persona de contacto/Corresponding author: bentorgo@upvnet.upv.es (B. Torres)

Cómo citar este artículo/Citation: Torres, B., Payá-Zaforteza, I., Barrera, D., Alvarado, Y.A., Calderón, P. A., Loayssa, A., Sagües, M., Zornoza, A., Sales, S. (2015). Monitorización de deformaciones y temperaturas en la estructura de un túnel artificial de alta velocidad mediante sensores ópticos puntuales, de longitud y distribuidos. *Informes de la Construcción*, 67(538): e071, doi: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.13.081>.

Licencia / License: Salvo indicación contraria, todos los contenidos de la edición electrónica de *Informes de la Construcción* se distribuyen bajo una licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento no Comercial 3.0. España (cc-by-nc).

1. INTRODUCCIÓN

Acontecimientos como el colapso de las dos torres del Skyline Center Project en Virginia (1973), el colapso del puente I-35W sobre el río Mississippi en Mineapolis (2007) y, más recientemente, del túnel Sasago en Tokio (2012) ponen de manifiesto la gran importancia y necesidad de monitorizar ciertas estructuras para poder evaluar su seguridad estructural en tiempo real.

Para evaluar el estado de una estructura, uno de los parámetros estructurales más importantes para ser monitorizado es la deformación que experimenta el material, así como las temperaturas, que juegan un papel fundamental. Existen muchas técnicas para su medición y actualmente, los sensores de fibra óptica están recibiendo mucha atención debido a sus ventajas sobre otros tipos de sensores (1) (2).

En este artículo se presentan los trabajos de monitorización durante la construcción de la estructura del túnel artificial de la línea de alta velocidad de Levante en Mogente (Valencia, España) con tres tipos distintos de sensores de fibra óptica (puntuales, largos y distribuidos) desarrollados por los autores (3). Los objetivos de estos trabajos son:

- Comparar los resultados de los tres tipos de sensores y establecer sus limitaciones, ventajas y campos de aplicación.
- Conocer el comportamiento y comparar las prestaciones de los sensores propuestos bajo las condiciones reales que impone el sector de la construcción.
- Mostrar la pauta general de comportamiento de la estructura ante las variaciones térmicas existentes, el peso y empuje de las tierras.

Los valores medidos han sido comparados con los resultados teóricos obtenidos a partir de un modelo numérico simplificado 2D de elementos finitos empleando el programa Lusas V.14.3-11 (4). La comparación entre los resultados medidos y numéricos ha presentado, en general, un buen ajuste.

2. SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

Existe actualmente una amplia variedad de sistemas de monitorización que son aplicables a la instrumentación y evaluación de las estructuras. Dentro de las técnicas que emplean sensores, la mayoría de ellos han basado su funcionamiento en la transmisión de señales eléctricas. Sin embargo, durante los últimos años el empleo de sensores de fibra óptica ha captado mucha atención e interés, tal y como se observa en multitud de investigaciones y aplicaciones (1) (5) (6) (7) (8) (9) (10) (11). Las principales razones de este crecimiento radican en las ventajas comparativas de la fibra óptica sobre otros sensores como una mayor competitividad económica, su flexibilidad, capacidad de ser embebidos en el material, pequeño tamaño, inmunidad frente a interferencias electromagnéticas y capacidad de multiplexación (12).

2.1. Sensores discretos

En función de la longitud del sensor, los sensores discretos se clasifican en sensores puntuales (aquellos que tienen una longitud mucho menor a la distancia entre dos discontinuidades o comparable a las dimensiones de las inclusiones de aire en el material monitorizado) o sensores largos (aquellos que

tienen una longitud varias veces mayor a la máxima distancia entre discontinuidades o diámetro máximo de las inclusiones de aire en el material monitorizado) (1). Los sensores cortos miden la deformación del material en un punto, por lo que sus valores están fuertemente influenciados por los defectos locales e irregularidades del punto estudiado (materiales compuestos, madera u hormigón que presentan fisuras, coqueas o inclusiones de aire). Para monitorizar estos materiales es necesario el empleo de sensores largos o de longitud. Sus mediciones no se ven afectadas por las irregularidades locales (1). La mayoría de los sensores ópticos discretos existentes están basados en FBG.

2.1.1. Principio de funcionamiento de las FBG

Una FBG (*Fibre Bragg Grating*) es un tipo de reflector constituido en un breve segmento de fibra óptica capaz de reflejar luz cuyo valor central es λ_B (13). Esto se logra inscribiendo en su núcleo una red de difracción de Bragg (Figura 1a).

La variación de la longitud de onda central (λ_B) en función del incremento de la temperatura y de la deformación axial en una red de difracción de Bragg se puede expresar mediante [1]:

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon \varepsilon + K_T \Delta T \quad [1]$$

Donde ε es la deformación unitaria en la región donde se encuentra la FBG, y K_ε es un coeficiente de sensibilidad en deformación de la FBG que se obtiene de forma experimental. La segunda parte de la expresión determina la deriva de λ_B debido al incremento de temperatura (3).

De esta forma, discriminando la afección de la temperatura sobre el sensor y midiendo la variación de longitud de onda reflejada por la red de Bragg se puede obtener el valor de la deformación que experimenta el material.

2.2. Sensores distribuidos

Existen determinadas aplicaciones, tipologías estructurales y objetivos de monitorización donde el empleo de sensores discretos no es adecuado. Un claro ejemplo de esta situación consiste en la monitorización de elementos estructurales de grandes longitudes: una tubería, el tablero de un puente de gran luz o el cable portante de un puente colgante. En estos casos, la monitorización mediante numerosos sensores discretos resultaría inabordable.

Los sensores distribuidos son sensores continuos a través de la fibra que permiten tantos puntos de medida como permita la tecnología utilizada –actualmente se han conseguido resoluciones de centímetros (14)–.

La mayoría de sensores distribuidos empleados en la actualidad están basados en el principio de funcionamiento de la dispersión estimulada de Brillouin (SBS).

2.2.1. Principio de funcionamiento del SBS (*Stimulated Brillouin Scattering*)

El SBS (*Stimulated Brillouin Scattering*) es un proceso no lineal que ocurre en la fibra cuando se inyecta en ella una potencia superior a una potencia umbral. Este hecho hace que

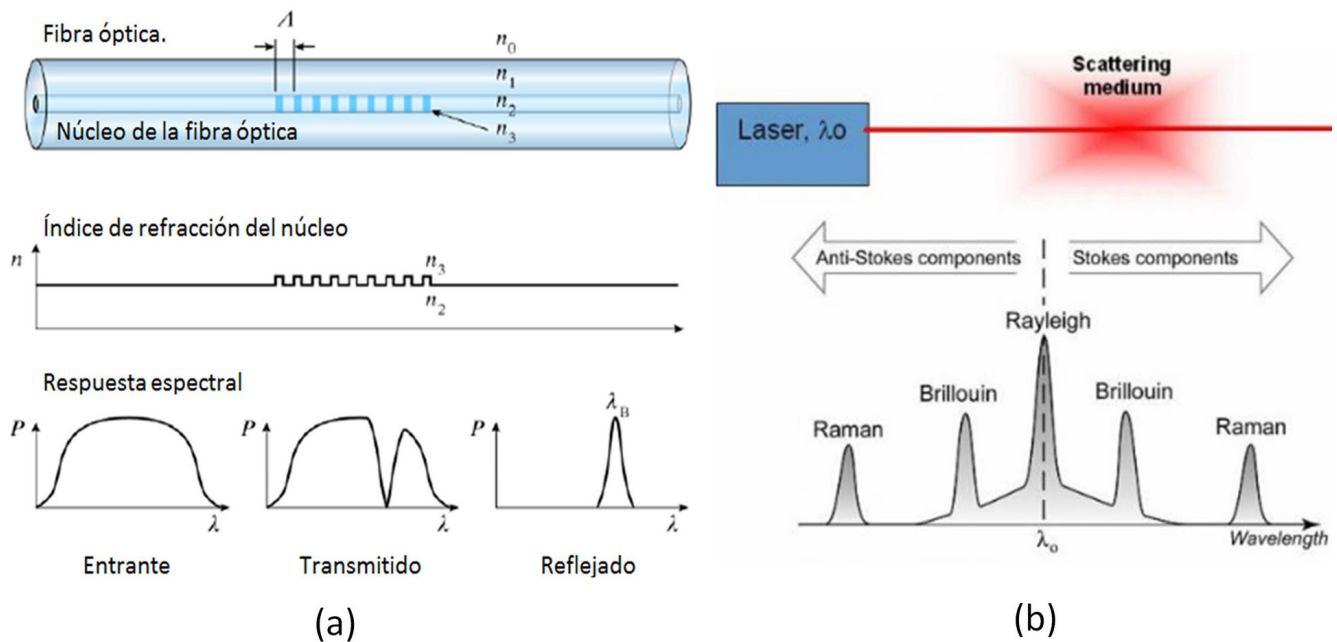


Figura 1. Principio de funcionamiento de los sensores ópticos. (a)- basados en FBG. (b)- basados en SBS.

una pequeña parte de la luz inyectada se refleje en cada punto de la fibra, lo que se conoce con el nombre de *back-scattering* y supone una difusión de la luz en sentido contra propagante de la potencia inyectada.

Debido a la poca potencia de este *back-scattering*, existen métodos que amplifican la señal reflejada. Esto se consigue a partir de la inyección desde el extremo opuesto de la fibra de otra señal que amplifique a la reflejada. Esta segunda onda debe de estar separada en frecuencia de la primera por el desplazamiento en frecuencia Brillouin (aproximadamente 10,8 GHz en fibra monomodo estándar). Por este motivo, esta técnica recibe el nombre de estimulada. Este *back-scattering* de la luz presenta tres componentes que pueden ser identificadas (Figura 1b).

Para su empleo como sensor, la variación del SBS se correlaciona con algún parámetro estructural como son la deformación y la temperatura. Esta correlación se realiza a partir de los desplazamientos de la frecuencia de Brillouin, que dependen a su vez del índice de refracción y de la velocidad de las ondas acústicas en el interior de la fibra.

La respuesta de la frecuencia Brillouin es proporcional a la deformación mecánica y a las temperaturas: frente a aumentos de temperatura la frecuencia de Brillouin también aumenta y viceversa. De una forma similar, la frecuencia de Brillouin aumenta en caso de tracciones en la fibra y viceversa.

3. SENSORES ÓPTICOS PROPUESTOS

Para llevar a cabo los trabajos de monitorización de la estructura del túnel artificial se han empleado tres tipos de sensores ópticos diseñados y estudiados por los autores:

1. Sensores ópticos puntuales de deformación y temperatura basados en FBG.
2. Sensores ópticos de longitud de deformación basados en FBG.
3. Sensores ópticos distribuidos de deformación y temperatura basados en SBS.

Los sensores puntuales están diseñados de acuerdo a (3). Se propone un diseño basado en estudios experimentales y numéricos para minimizar la probabilidad de error en la medición del sensor.

Los sensores de longitud y distribuidos están diseñados según (15), donde se propone un encapsulado para que las mediciones de la fibra óptica no se vean afectadas por las irregularidades del material. El diseño está basado en estudios experimentales y numéricos.

4. TRABAJO EXPERIMENTAL

4.1. Descripción de la estructura objeto del estudio

La estructura monitorizada consiste en una bóveda circular de 0,7 metros de canto y 5,64 metros de radio interior. Los hastiales son rectos, de canto variable entre 0,7 y 1,04 metros, con una altura de 3 metros. La cimentación está resuelta mediante una contrabóveda de 12,35 metros de radio y un canto constante de 1,2 metros

La estructura completa está ejecutada con hormigón armado. El material de relleno del túnel artificial se trata de una arcilla margosa con un peso específico de 20 kN/m³, módulo de elasticidad de 100 MPa, coeficiente de Poisson de 0,33, ángulo de rozamiento interno de 30° y coeficiente de empuje al reposo de 0,5.

4.2. Estrategia de monitorización propuesta

Se ha monitorizado la sección transversal de túnel artificial sobre la que descansa una mayor altura de relleno de tierras, correspondiente a 20,3 metros medidos desde la base de la bóveda del túnel artificial.

Todos los sensores ópticos de deformación han sido instalados siguiendo el perímetro interior de la sección del túnel artificial. La instalación se dispuso de la siguiente forma:

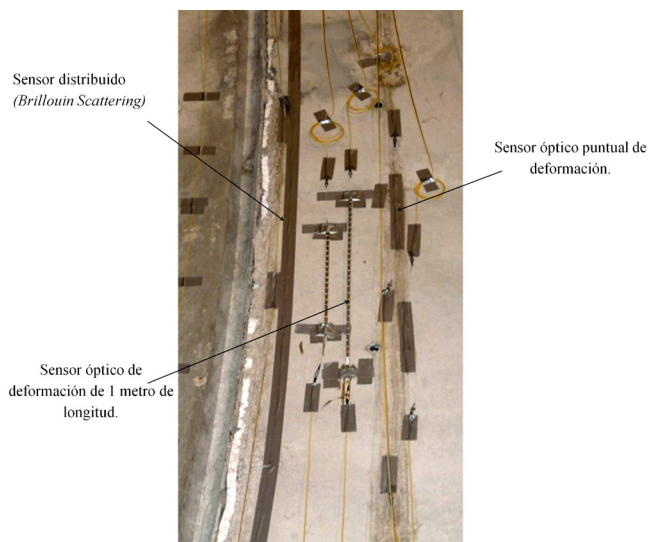


Figura 2. Disposición de los sensores ópticos en el interior de la bóveda del túnel artificial en la posición 2.

- 7 sensores ópticos de deformación de 1 metro de longitud. Cada uno de los sensores de longitud estaban separados entre sí, aproximadamente dos metros en dirección perimetral de la sección de túnel artificial. El sensor de deformación de longitud situado en la clave se encuentra anclado en un extremo y libre en otro, para poder realizar una correcta compensación térmica.
- 7 sensores ópticos puntuales de deformación, instalados próximos a los sensores de longitud (Figura 2) para comparar sus resultados.
- Además, se han instalado sensores ópticos puntuales de temperatura en el interior y en el exterior de la estructura (Figura 3a).
- El sensado distribuido de Brillouin se ha instalado siguiendo el perímetro del túnel artificial de la forma indicada en las Figuras 2 y 3b, con un color naranja.

Para mayor información sobre la estrategia de monitorización propuesta, se recomienda ver (15).

4.3. Operaciones monitorizadas y calendario de medidas

La Tabla 1 resume el calendario de medidas seguido para la toma de datos.

Tabla 1. Calendario de medidas.

Fecha	Operación monitorizada
23, 24, 25/08/2011	Instalación de los sensores de deformación y temperatura.
26/09/2011 (Duración 7h. 24 min)	Toma de datos continua. No existe relleno de tierras (Figura 4a).
27/09/2011 (Duración: 4h. 20 min.)	Toma de datos continua. No existe relleno de tierras (Figura 4a).
14/05/2012	Toma de datos instantánea. Altura de relleno 20,3 metros (Figura 4b).

4.4. Captura de datos

El sistema de interrogación empleado en la instrumentación está compuesto por un interrogador de sensores tipo FBG de la marca Micron Optics, modelo sm125-500 y por un ordenador portátil en el que se ejecutaba un software desarrollado específicamente para esta aplicación (16). Este software fue desarrollado en el lenguaje de programación LabVIEW™ versión 8.5. El interrogador de sensores ópticos sm125-500 está compuesto por una fuente láser sintonizable Fabry-Perot con un rango en longitud de onda de 1510 a 1590 nm y 4 canales ópticos de salida. La frecuencia máxima de captura de datos es de 1 Hz y la precisión de la medida es de 1 pm.

5. ESTUDIO NUMÉRICO

5.1. Introducción

Para comparar el comportamiento de los sensores ópticos se ha llevado a cabo un modelo numérico simplificado 2D de elementos finitos. En él, se ha modelado una sección transversal de túnel artificial (la sección monitorizada se encuentra situada aproximadamente a unos 200 metros de los picos de flauta del túnel artificial, por lo que el modelo de cálculo de deformación plana es adecuado) y se ha estudiado las variaciones de deformación que experimenta la estructura debido a las acciones de las variaciones térmicas, peso y empuje de tierras.

Se ha despreciado los efectos de la retracción y fluencia en la obtención de los valores teóricos con el modelo simplificado de elementos finitos 2D. Por un lado, la toma de datos continua se ha realizado en periodos relativamente cortos.

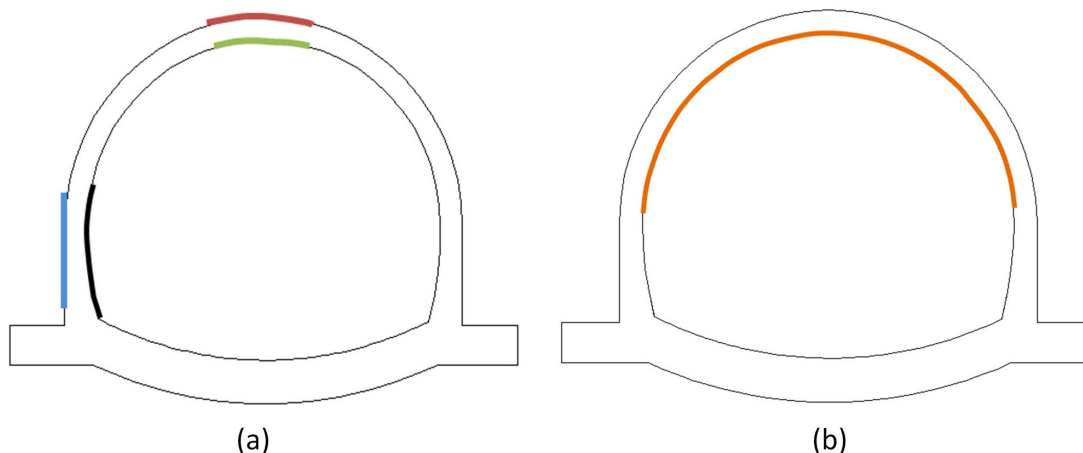


Figura 3. (a)- Identificación de los sensores de temperatura dispuestos. (b)- Sensado distribuido.

Por otro lado, para la toma de datos instantánea dado que los trabajos en la estructura se llevaron a cabo pasados más de tres meses desde su reparación, la mayor parte de la retracción ya se había producido previo a la instalación de los sensores.

5.2. Condiciones de contorno, descripción de los elementos empleados y aplicación de la carga

El modelo numérico ha sido estudiado empleando el programa de elementos finitos Lusas V.14.3-11 (4). La estructura se encuentra apoyada en el terreno y dado que los tacones y la contrabóveda están enterrados, se considera impedido el desplazamiento horizontal. Por tanto, en los nodos que definen la contrabóveda y los tacones se han impedido los desplazamientos horizontales y verticales (Figura 4).

Los elementos finitos empleados para la modelación de la estructura son elementos continuos 2D tipo QPN8 (Figura 5), los cuales están formados por 8 nodos, y dos grados de libertad por nodo (traslaciones en X, Y) (4).

5.2.1. Introducción de las temperaturas

La introducción de las variaciones térmicas en el programa se ha llevado a cabo a partir de la opción *Load Curve* implementada en Lusas V14.3-11 (4), que permite introducir cargas variables en el tiempo.

Las variaciones de temperatura a las que está sometida la estructura han sido introducidas en el programa como leyes lineales y parabólicas de segundo y tercer grado (Figura 5), ya que éstas presentan un muy buen grado de ajuste con las mediciones obtenidas (Tabla 2).

5.2.2. Introducción del empuje de tierras

La introducción del empuje de tierras en el programa se ha llevado a cabo a partir de la opción *Face Load*, implementada en Lusas V14.3-11 (4). Este tipo de carga es aplicada en los bordes de los elementos finitos 2D.

El valor del empuje de tierras se ha introducido de acuerdo a [2]:

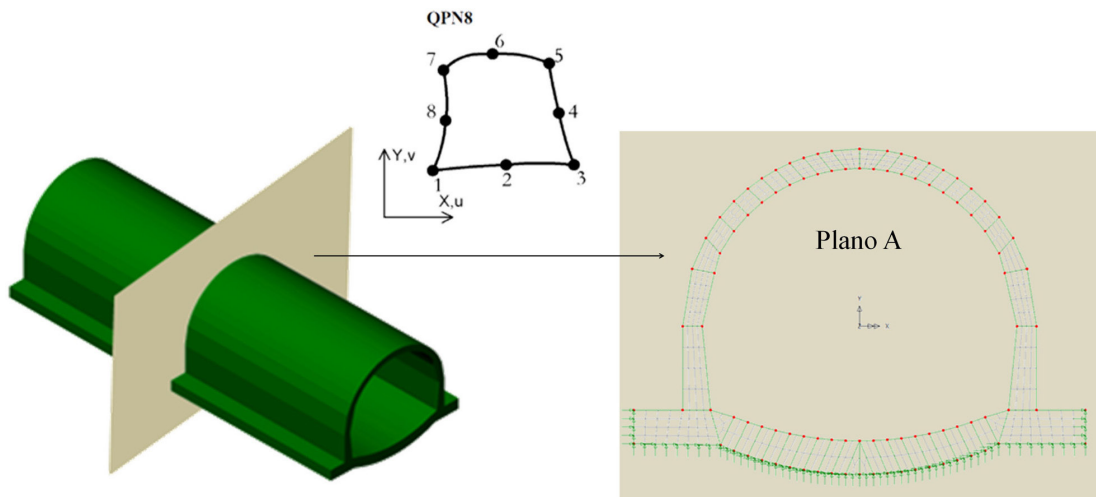


Figura 4. Modelización de la sección del túnel artificial de mayor altura de relleno de tierras con elementos QPN8. Movimientos impedidos en la base de los tacones y de la contrabóveda.

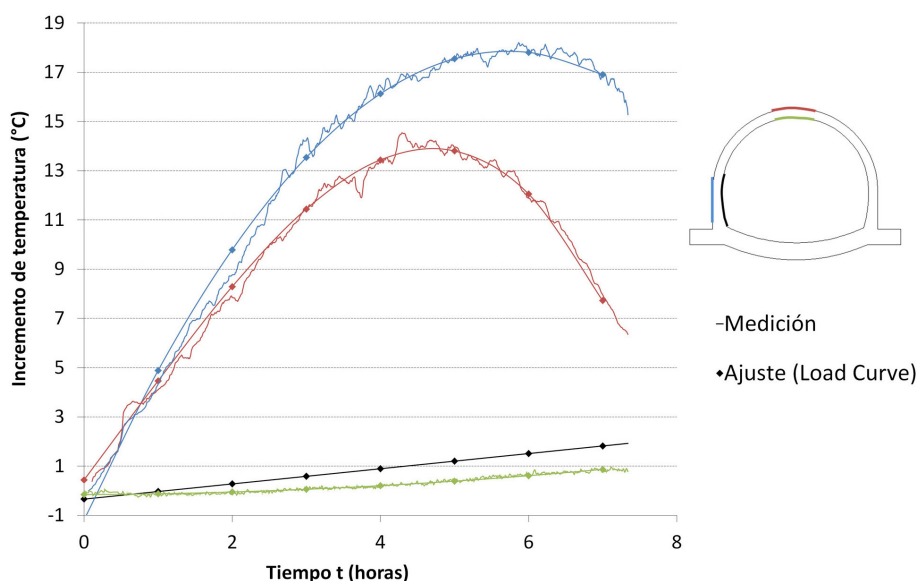


Figura 5. Ajuste realizado para las variaciones térmicas en los cuatro puntos instrumentados. Día 26/09/2011.

Tabla 2. Ajustes que representan las variaciones térmicas en los puntos instrumentados. Día 26/09/2011.

Punto instrumentado	Ecuación del ajuste	R ²
Hastial exterior	$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = -0,5809 t^2 + 6,6514 t - 1,1904$	0,9898
Clave exterior	$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = -0,0796 t^3 + 0,1391 t^2 + 3,9675 t + 0,4356$	0,9827
Hastial interior	$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = 0,3085 t - 0,3396$	0,9766
Clave interior	$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = 0,0186 t^2 + 0,0166 t - 0,1585$	0,9584

$$E = K_o \gamma_t h \quad [2]$$

Siendo E el valor del empuje en KN/m^2 , K_o el coeficiente de empuje a reposo, γ_t el peso específico de las tierras sobre la estructura, y h la altura del relleno de tierras en el punto considerado.

6. RESULTADOS

6.1. Mediciones continuas los días 26 y 27/09/2011

6.1.1. Variaciones de temperaturas medidas

La Figura 6 muestra las variaciones térmicas que se han medido a lo largo del día 26 y 27/09/2011, así como las leyes de temperatura polinómicas adoptadas (teniendo en cuenta las anteriores tendencias) para el intervalo de tiempo en que no se disponen medidas (en traza discontinua y con marcadores). Como se observa, existen importantes variaciones térmicas en los dos puntos monitorizados del exterior de la bóveda, situados en el hastial izquierdo y en la clave, con gradientes térmicos máximos de $18,17^{\circ}\text{C}$ y $14,08^{\circ}\text{C}$ respectivamente el día 26/09/2011. En los dos puntos interiores también existen variaciones térmicas pero de menor importancia, con valores máximos de $2,77^{\circ}\text{C}$ en el hastial izquierdo y $0,85^{\circ}\text{C}$ en la clave.

6.1.2. Pauta general de comportamiento del túnel artificial. Comparación de resultados numéricos con mediciones de los sensores basados en FBG

La respuesta del túnel artificial ante las variaciones térmicas expuestas anteriormente debidas a la irradiación solar sigue una ley homóloga a la que describen las variaciones térmicas dadas por la Figura 6: ante incrementos y decrementos de

temperatura, la bóveda del túnel responde traccionándose y comprimiéndose respectivamente (Figura 7).

La Figura 8 compara los resultados numéricos y las mediciones realizadas con sensores puntuales y de longitud en todos

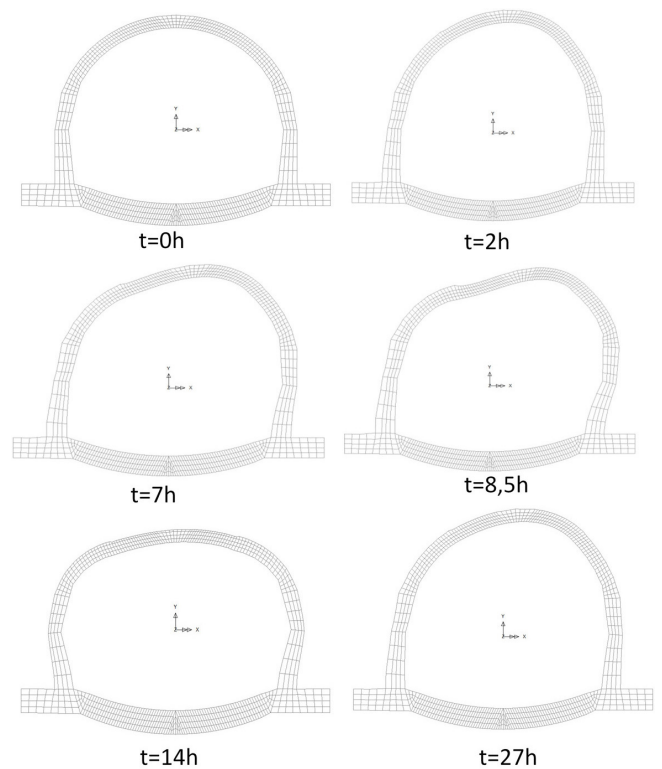


Figura 7. Evolución de la malla deformada en distintos instantes de tiempo.

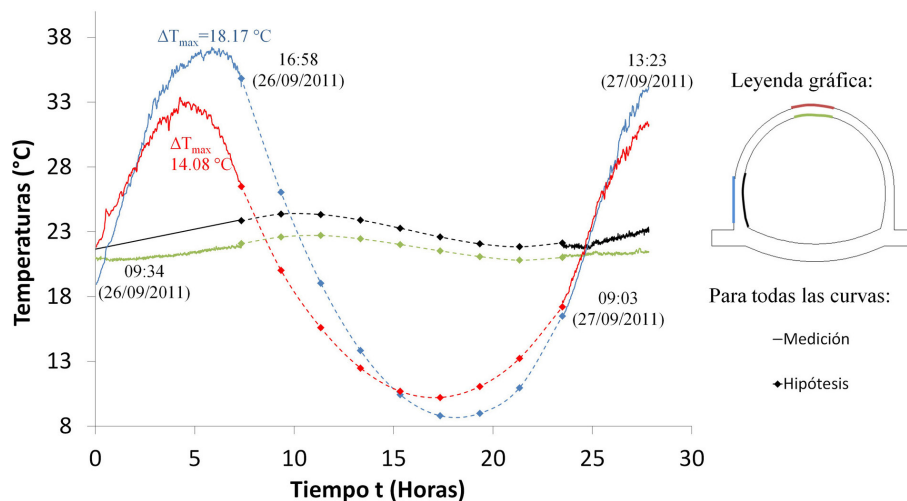


Figura 6. Variaciones de temperatura en los puntos instrumentados durante los días 26 y 27/09/2011. Valores medidos e hipotéticos adoptados.

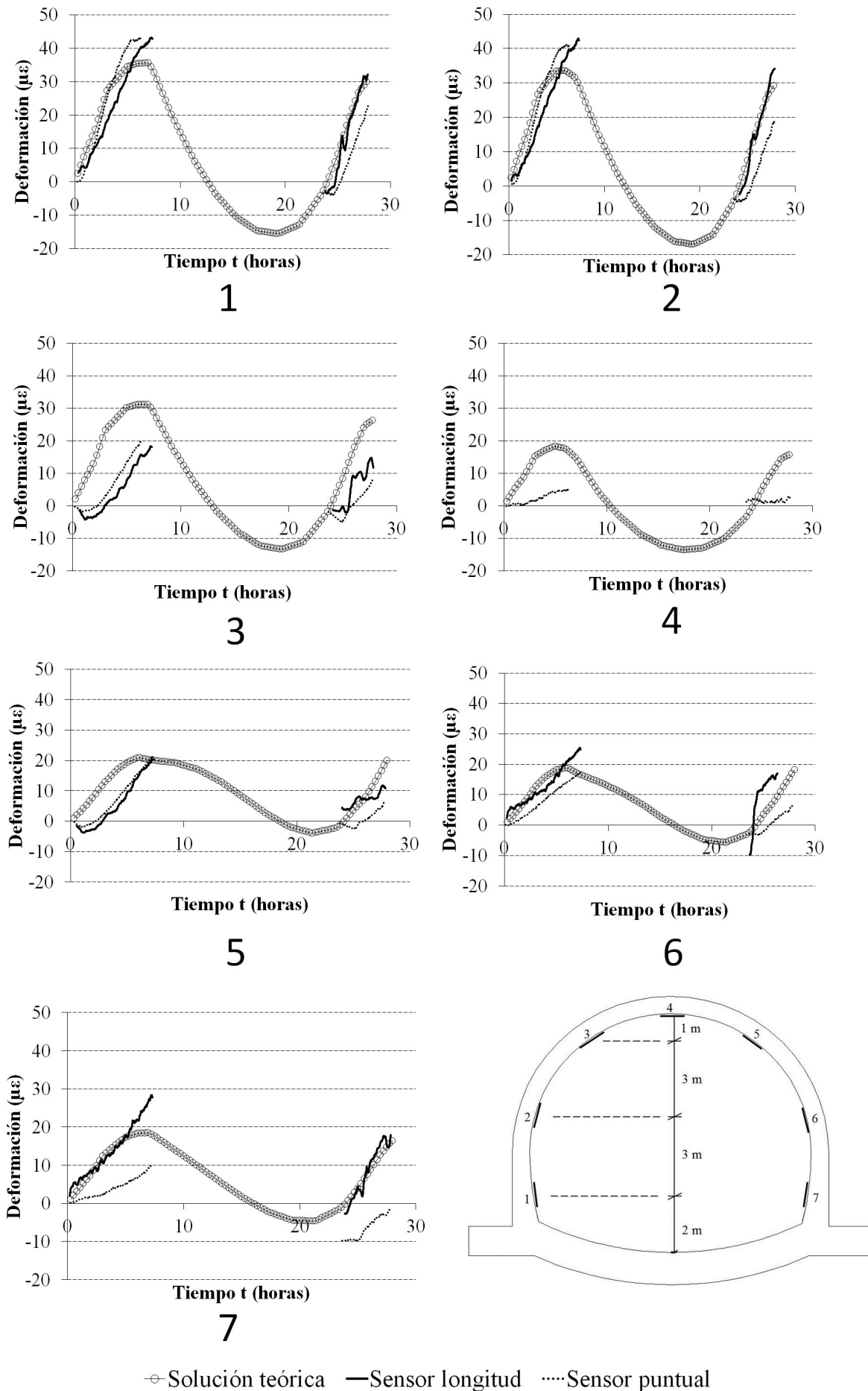


Figura 8. Evolución de las deformaciones para los puntos instrumentados. Mediciones y resultados numéricos.

los puntos monitorizados (deformaciones positivas corresponden con deformaciones de tracción). El sensor de longitud de la posición 4 no mide deformaciones puesto que está anclado en un extremo y libre en otro para llevar a cabo una correcta compensación térmica.

La solución teórica (con marcadores) responde al ciclo completo de temperaturas indicado en la Figura 6. Sin embargo, las mediciones de los sensores (en traza continua y discontinua de color negro) corresponden únicamente a los horarios de la toma de medida.

Tal y como se observa en la Figura 8, los sensores ópticos puntuales y de longitud han reproducido notablemente bien la pauta general de comportamiento que indica la solución obtenida del modelo numérico simplificado. Sin embargo, existen algunas diferencias que están provocadas por los bajos niveles de deformación donde está trabajando la estructura, las simplificaciones realizadas en el modelo numérico de elementos finitos, y la propia naturaleza de los sensores puntuales, los cuales se encuentran fuertemente influenciados por el punto en cuestión donde se instalen.

Se observa también un decalaje en las leyes de deformaciones de los sensores instalados en la clave de la estructura (sensores 3, 4 y 5, Figura 8). Este efecto puede ser debido a las condiciones de fuerte ventilación y circulación de aire que se concentra en la parte alta del túnel, y que no existe en la parte de los hastiales.

6.1.3. Pauta general de comportamiento del túnel artificial. Comparación de resultados numéricos con mediciones de los sensores basados en SBS

La Figura 9 muestra la evolución de la frecuencia de Brillouin de la fibra instalada sobre la bóveda a lo largo del tiempo, donde cada una de las trazas de color se corresponde con un instante de tiempo separado 10 minutos. Las trazas se encuentran por encima de esta línea discontinua y color negro, lo que supone un aumento de la frecuencia de Brillouin en el tiempo. Esto indica que la bóveda del túnel artificial sufre deformaciones de tracción.

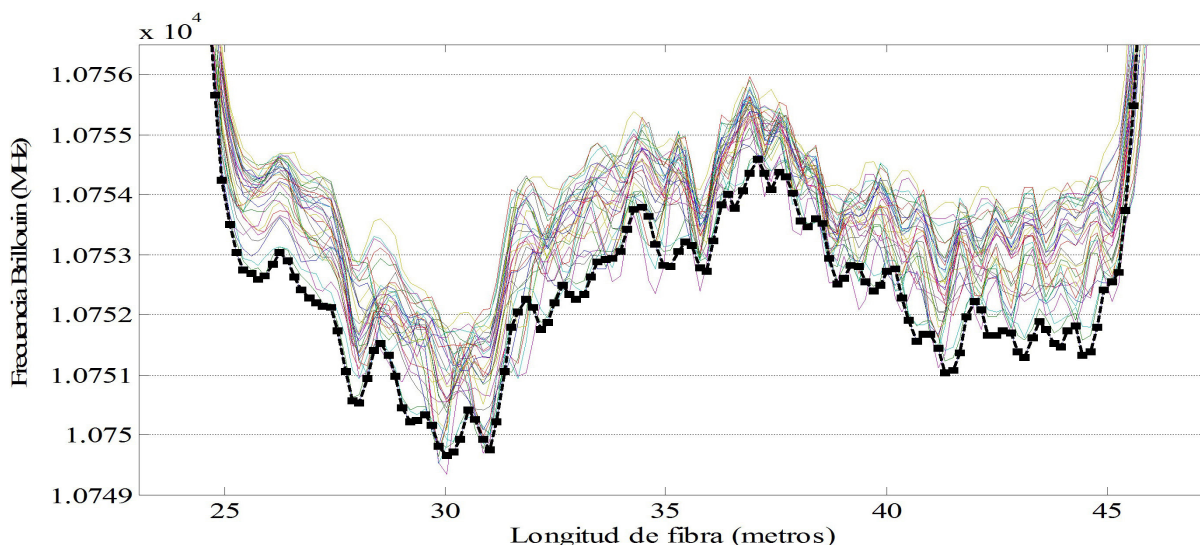


Figura 9. Evolución de la frecuencia Brillouin durante la jornada del 26/09/2011. En traza discontinua y marcadores de color se muestra la primera toma del día.

Cada uno de los sensores de la Figura 8 han sido identificados sobre la longitud de la fibra óptica, y se han comparado los resultados que fueron expuestos en el apartado anterior con los resultados obtenidos a partir de los sensores distribuidos.

La Figura 10 muestra las comparaciones de los resultados para los sensores descritos.

En todos los puntos estudiados, los sensores distribuidos proporcionan deformaciones de tracción que tienen una tendencia creciente con el paso del tiempo. Los resultados obtenidos con los sensores distribuidos presentan una mayor dispersión que los obtenidos con los sensores puntuales y de longitud. Hay que tener en cuenta que los sensores puntuales y de longitud están basados en FBG y por tanto presentan una mayor precisión –en torno a $2 \mu\epsilon$, (1)– que los distribuidos. Por el contrario, los sensores distribuidos presentan una precisión del orden $20 \mu\epsilon$ (1). La naturaleza de las distintas tecnologías empleadas está a la origen de diferencias en los resultados.

6.2. Mediciones instantáneas el día 14/05/2012

En este instante de tiempo la altura de tierras alcanzada era de 20,3 metros sobre la base de la bóveda, y de 11 sobre su clave.

En este instante de tiempo la estructura se encuentra enterrada, por lo que se ha supuesto que las variaciones de temperatura, desde el día 26/09/2011, han sido las mismas en las superficies interiores y exteriores del túnel. Ha sido necesario adoptar esta hipótesis –en principio razonable– debido a que los sensores de temperatura del exterior del túnel dejaron de funcionar durante las operaciones de movimiento de tierras y compactación sobre ellos, a pesar de encontrarse protegidos.

6.2.1. Resultados de los sensores puntuales y de longitud

Debido a la rotura de tres de los cuatro sensores de temperatura dispuestos, la variación de temperatura medida ha sido obtenida con el sensor de temperatura dispuesto en la clave interior del túnel. Esta variación de temperatura resulta ser de $-4,94 \text{ }^\circ\text{C}$ (Tabla 3).

Tabla 3. Variación de temperatura entre la puesta a cero y la fecha de medición en el sensor de la clave interior del túnel.

Sensor	λ_i (nm) (26/09/2011)	λ_i (nm) (14/05/2012)	ΔT
Clave interior	1543,141	1543,1012	-4,94

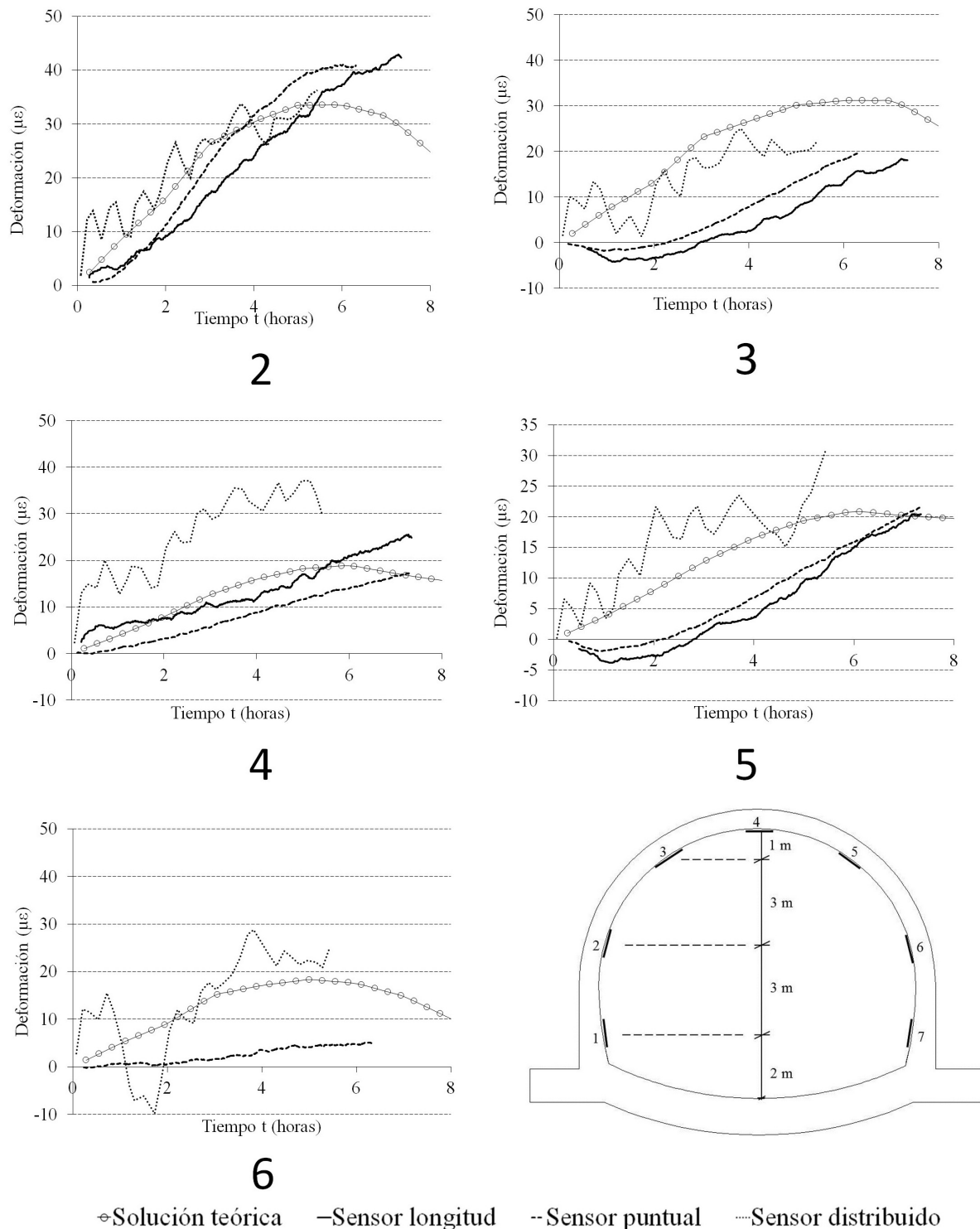


Figura 10. Evolución de las deformaciones para los puntos instrumentados. Mediciones y resultados numéricos.

Como se observa en la Tabla 3, la variación de temperatura obtenida ha sido negativa, lo que indica que la temperatura ha sido inferior en la fecha de toma de datos (14/05/2012) que en el día 26/09/2011. Este hecho es evidente debido a los decrementos de la temperatura ambiente ligados a los meses en que se tomaron los datos.

En general, la estructura muestra un comportamiento bastante simétrico (Tabla 4):

- Los sensores de longitud 1 y 7, instalados en los hastiales de la estructura, indican pequeñas deformaciones. El punto 7 indica una deformación de compresión de valor $-32,7 \mu\epsilon$,

mientras que el punto 1 de valor $-24,1 \mu\epsilon$. Ambas deformaciones son pequeñas en comparación con el resto de valores.

- Los puntos 2 y 6 son los que mayor deformación de compresión alcanzan, con valores de $-245,3$ y $-305,3 \mu\epsilon$, en el sentido de longitud. El sensor puntual de deformación del punto 2 indica un valor de compresión de $-198,9$.
- En los puntos 3 y 5 se han obtenido deformaciones de compresión inferiores a las obtenidas en los puntos 2 y 6, y superiores a la considerada en los puntos 1 y 7 que coinciden con los hastiales.
- Finalmente, en el punto instrumentado 4 se ha obtenido una deformación de compresión de valor $-78,3 \mu\epsilon$ con el sensor puntual.

No ha sido posible la medición de los sensores puntuales 1, 6 y 7 debido a roturas de los mismos. En cuanto a los valores, en un mismo punto considerado aparecen diferencias entre ambos tipos de sensores. Sin embargo, en la mayoría de puntos instrumentados existe una clara pauta general de comportamiento marcada por ambos tipos de sensores.

6.2.2. Comparación de las mediciones con los resultados numéricos

La Tabla 4 y Figura 11 muestra los resultados medidos con los sensores ópticos y los resultados teóricos.

Las deformaciones teóricas obtenidas en los puntos 1 y 7 son de $-28 \mu\epsilon$. Se trata de un valor pequeño de compresión en

comparación con el resto de valores en los otros puntos instrumentados. Esto mismo sucedía con las mediciones obtenidas con sensores ópticos.

Las mayores deformaciones de compresión se han obtenido en los puntos 2 y 6, con valores de $-189,6 \mu\epsilon$. Las mediciones obtenidas con los sensores ópticos indicaron que los puntos 2 y 6 eran los que mayores deformaciones de compresión alcanzaban, coincidiendo con la pauta general de comportamiento en este punto instrumentado.

Las deformaciones obtenidas en los puntos 3 y 5 también marcan la pauta general de comportamiento del túnel artificial. A partir del modelo numérico, su valor de $-96,2 \mu\epsilon$ indica una deformación de compresión inferior a la de los puntos 2 y 6, pero mayor a la obtenida en los hastiales de la estructura (puntos 1 y 7), tal y como indicaron las mediciones realizadas con los sensores ópticos.

Finalmente se ha obtenido una deformación de $17 \mu\epsilon$ en la clave de la estructura. Comparando con el valor medido por el sensor puntual, este valor es el que presenta una mayor dispersión en relación con la pauta general de comportamiento.

Tal y como se indicó anteriormente, los sensores puntuales presentan el inconveniente que se encuentran fuertemente influenciados por el punto en cuestión donde se instalen. A pesar de que los niveles de deformación medidos son inferiores a la deformación última de fisuración del hormigón, las irregularidades puntuales derivadas de la propia naturaleza

Tabla 4. Valores de deformación medidos y teóricos entre la puesta a cero y la fecha de medición.

	Ubicación de los sensores						
	1	2	3	4	5	6	7
Sensor de longitud ($\mu\epsilon$) (a)	-24,1	-245,3	-165,0	-	-118,1	-305,3	-32,7
Sensor puntual ($\mu\epsilon$) (b)	-	-198,9	-106,6	-78,3	-146,6	-	-
Teórico ($\mu\epsilon$) (c)	-28,0	-189,6	-96,2	17,0	-96,2	-189,6	-28,0
(a)/(b)	-	1,23	1,54	-	0,80	-	-
(a)/(c)	0,86	1,29	1,70	-	1,22	1,61	1,16
(b)/(c)	-	1,04	1,10	-	1,52	-	-

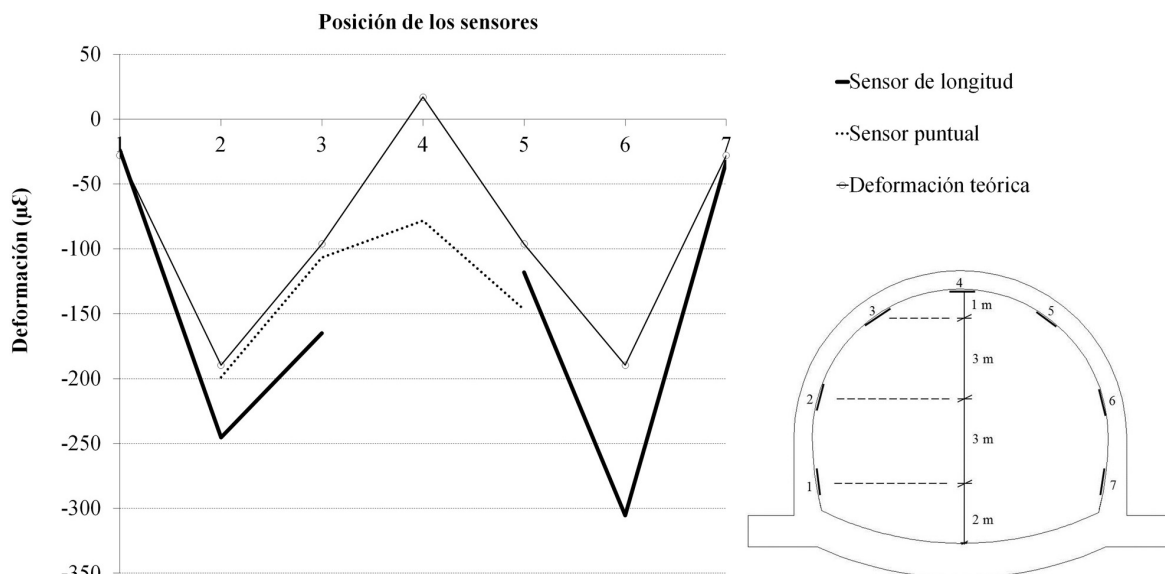


Figura 11. Resultado gráfico de las deformaciones de cada sensor y resultados teóricos.

del hormigón pueden ser motivo de algunas diferencias entre las mediciones con sensores puntuales.

7. CONCLUSIONES

En este capítulo se han presentado los trabajos de monitorización mediante sensores de fibra óptica de una sección transversal de la estructura del túnel artificial de la Línea de Alta Velocidad de Levante a su paso por Mogente (Valencia, España).

Los sensores han sido instalados siguiendo el perímetro de una sección transversal del túnel artificial, y son sensores puntuales de deformación y temperatura, sensores de longitud y sensores distribuidos. El objetivo de este trabajo consiste en la aplicación de los sensores propuestos para su monitorización en una estructura real sometidos a las condiciones que en ella existen, validar su funcionamiento, establecer limitaciones y obtener conclusiones acerca de su empleo y campo de aplicación. Para ello se ha realizado un modelo numérico simplificado 2D de elementos finitos, y se ha obtenido la pauta general de comportamiento de la sección instrumentada.

En cuanto al funcionamiento de los sensores, los puntuales y de longitud han reproducido notablemente bien el comportamiento general de la estructura incluso para pequeños niveles de deformación, del orden de $5 \mu\epsilon$. A pesar de la distinta naturaleza de los sensores puntuales y de longitud, ambos han mostrado comportamientos y resultados similares. Esto es debido a que los valores de deformación de tracción a los que ha estado sometida la estructura han sido inferiores a la deformación última de fisuración del hormigón –estimada en torno a $50-100 \mu\epsilon$ (1)–.

A pesar de que no es recomendable el empleo de los sensores puntuales para la monitorización de materiales heterogéneos, cuando estos elementos trabajan a compresión sí sería posible su empleo (incluso si trabajan a tracción, pero con valores de deformación inferiores a la deformación última de fisuración del material). Sin embargo, es muy importante evitar su instalación en zonas de coqueas, reparaciones y otras irregularidades puesto que sus mediciones podrían verse fuertemente alteradas.

Los sensores distribuidos también han reproducido la pauta general de comportamiento de la estructura. Sin embargo, este tipo de sensado basado en SBS tiene una precisión inferior –en torno a $20 \mu\epsilon$, (1)– a los anteriores basados en FBG, lo que ha supuesto una limitación en este trabajo. Por este motivo, los resultados de los sensores distribuidos presentan una mayor dispersión frente a los resultados numéricos y a los obtenidos por los sensores basados en FBG. No es recomendable el empleo esta tecnología en aquellos trabajos de cortas distancias de monitorización ni donde las deformaciones esperadas sean relativamente pequeñas, como en el caso que ocupa este trabajo.

REFERENCIAS

- (1) Glišić, B., Inaudi, D. (2007). *Fibre Optics Methods for Structural Health Monitoring*. Chichester: John Wiley & Sons Ltd.
- (2) Rodrigues, C., Inaudi, D. (2010). Laboratory and field comparison of long-gauge strain sensing technologies. En *5th European Workshop on Structural Health Monitoring*. Sorrento, Italy.

En cuanto a la medición de temperaturas, es muy importante su monitorización ya que ésta ha mostrado una gran afección no sólo sobre la estructura, sino sobre los sistemas de medida. La bóveda de la estructura se ha visto sometida a importantes gradientes térmicos y estos fueron registrados por la red de sensores, con un incremento máximo de $18,17 \text{ }^\circ\text{C}$. La medición de las temperaturas con los sensores propuestos ha permitido:

1. Entender el comportamiento de la estructura. La respuesta de la estructura ha sido proporcional a la ley de temperaturas, traccionándose y comprimiéndose respectivamente, con valores máximos de $40 \mu\epsilon$ en tracción y mínimos de $-15 \mu\epsilon$ en compresión.
2. Reproducir el comportamiento de la estructura mediante un modelo de elementos finitos cuyos resultados numéricos han mostrado un buen grado de ajuste con las mediciones experimentales.

Una vez finalizada la operación de relleno, la estructura ha mostrado un comportamiento bastante simétrico estando la bóveda comprimida con respecto a la toma de datos inicial.

En relación a esta última medición, se ha observado la necesidad de disponer un mayor número de sensores de temperatura (para aumentar la precisión de la compensación térmica) así como la realización de un mayor número de mediciones periódicas.

Por último, hay que destacar que en algunos puntos monitorizados existen diferencias importantes en sus resultados. Fundamentalmente, estas diferencias han sido debidas a:

1. Simplicidad del modelo numérico.
2. Reparaciones e irregularidades en la bóveda de la estructura.
3. Diferentes naturalezas de los sistemas de medición empleados.
4. Necesidad de medir en un mayor número de puntos las variaciones térmicas, tal y como se explicó anteriormente.

Tras los trabajos realizados, la supervivencia de los sensores ha sido de un 78% aproximadamente. Esto indica la importancia de una mayor protección de la red de sensores en los trabajos de monitorización de obra.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a la Universitat Politècnica de València, al Ministerio de Educación por la financiación recibida a través del proyecto BIA2011-27104 y al Ministerio de Fomento por el apoyo recibido a través del Proyecto SOPROMAC (P41/08). Este trabajo forma parte de la Tesis Doctoral (15) (Primer Premio en el Concurso de Tesis Doctorales de la Cátedra CSA de la UPV).

- (3) Torres, B., Payá-Zaforteza, I., Calderón, P. A., Adam, J. M. (2011). Analysis of the strain transfer in a new FBG sensor for Structural Health Monitoring. *Engineering Structures*, 33(2): 539-548, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.11.012>.
- (4) Lusas. (2010). Lusas Reference Manual. Surrey (UK). http://www.2.lusas.com/protected/documentation/V14_3/Element%20Reference%20Manual.pdf.
- (5) Hong-Nan, L., Dong-Sheng, L. Gang-Bing, S. (2004). Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering. *Engineering Structures*, 26(11): 1647-1657, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.05.018>.
- (6) Fernández-Ordoñez, J.A., Navarro-Vera, J.R. (1999). *Eduardo Torroja, ingeniero/engineer* (Bilingual edition Spanish-English). Madrid: Ediciones Pronaos.
- (7) Desideri, P., Nervi Jr, P.L., Positano, G. (1982). *Pier Luigi Nervi*. Zurich: Patmos Verlag.
- (8) Orcesi, A. D., Frangopol, D. M., Kim, S. (2010). Optimization of bridge maintenance strategies based on multiple limit states and monitoring. *Engineering Structures*, 32(3): 627-640, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.11.009>.
- (9) Shoukry, S.N., Riad, M. Y., William, G. W. (2009). Longterm sensor-based monitoring of an LRFD designed steel girder bridge. *Engineering Structures*, 31(12): 2954-2965, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.07.023>.
- (10) Ko, J.M., Ni, Y.Q. (2005). Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges. *Engineering Structures*, 27(12): 1715-1725, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2005.02.021>.
- (11) Majumder, M., Gangopadhyay, T. M., Chakraborty, A.K. (2008). Fibre Bragg gratings in structural health monitoring-Present status and applications. *Sensors and Actuators A*. 147(1): 150-164, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sna.2008.04.008>.
- (12) Udd, E. (1995). *Fiber optic smart structures*. New York: John Wiley & Sons Inc.
- (13) Alan, D. K., Michael, A. D., Heather, J. P., Michel, L. B., Koo, K.P., Askins, C.G., Putnam, M.A., Friebele, E. J. (1997). Fiber Grating Sensors. *Journal of Lightwave Technology*, 15(8): 1442-1463, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/50.618377>.
- (14) Thévenaz, L., Foaleng-Mafang, S., Kwang-Yong S., Sanghoon, C., Beugnot, J-C., Primerov, N., Tur, M. (2010). Recent Progress Towards Centimetric Spatial Resolution in Distributed Fibre Sensing. *Proc. of SPIE Fourth European Workshop on Optical Fibre Sensors*. nº 765309, doi: <http://dx.doi.org/10.1117/12.868432>.
- (15) Torres-Górriz, B. (2012). Definición de las pautas y condiciones de monitorización, encapsulado y fijación de sensores de fibra óptica para la medida de deformación y temperaturas en estructuras (Tesis Doctoral). Valencia: Universitat Politècnica de València.
- (16) Bueno-Martínez, A. (2008). Diseño y caracterización de un sensor óptico autocompensado en temperatura para la medida de deformaciones en estructuras de ingeniería civil y desarrollo de un sistema de interrogación (Tesis Final de Máster). Valencia: ETSIT - Universidad Politécnica de Valencia.

* * *