

MONITORIZACIÓN DE FIRMES DE CARRETERA MEDIANTE EL EMPLEO DE FIBRA ÓPTICA

ANA LIDÓN

PAVASAL Empresa Constructora, S.A.
alidon@pavasal.com

JOSÉ RAMÓN LÓPEZ

PAVASAL Empresa Constructora, S.A.
jrlopez@pavasal.com

JESÚS FELIPO

PAVASAL Empresa Constructora, S.A.
jfelipo@pavasal.com

PEDRO A. CALDERÓN

Instituto ICITECH, Universitat Politècnica de València
pcaldero@upv.es

IGNACIO PAYÁ-ZAFORTEZA

Instituto ICITECH, Universitat Politècnica de València
igpaza@upvnet.upv.es

MONITORIZACIÓN DE FIRMES DE CARRETERA MEDIANTE EL EMPLEO DE FIBRA ÓPTICA

RESUMEN

La red de carreteras de un país constituye un patrimonio de importancia estratégica que debe ser adecuadamente gestionado y mantenido. Su mal estado repercute en: la seguridad de la circulación, los costes del transporte y en la sostenibilidad.

La falta de conocimiento acerca del comportamiento real del pavimento y el hecho de que en su deterioro influyen multitud de factores son algunos de los principales inconvenientes a la hora de desarrollar esta tarea.

Poder contar con un sistema de monitorización que observe en tiempo real el estado en que se encuentra el firme permitiría obtener información relevante con la que optimizar las tareas de reparación y mantenimiento preventivo.

Con este objetivo se ha llevado a cabo un estudio sobre el uso de sensores de fibra óptica para la monitorización de firmes flexibles. Se estudia el rango de aplicabilidad de esta tecnología valiéndose para ello de distintos tipos de encapsulado de los sensores.

1. INTRODUCCIÓN

En el campo de la gestión y el mantenimiento del patrimonio viario se aprecia un creciente interés en la creación de pavimentos inteligentes, es decir, aquellos en los que la aplicación de nuevas tecnologías permite tener un conocimiento preciso y constante del estado de su condición. Se busca con ello el desarrollo de nuevos protocolos para la gestión de los activos viarios, más optimizados de acuerdo a los datos disponibles, y que permita reducir los costes de mantenimiento.

En concreto, son interesantes los sistemas que permiten la recogida continua de datos que sirven como fuente a los modelos de evolución estructural del firme. Estos, a partir de la deformación del firme, pueden predecir la aparición de los principales deterioros por fallo estructural que se dan en los firmes de carretera.

A este respecto, frente a las técnicas clásicas de monitorización y auscultación de firmes, la fibra óptica se abre paso como un firme candidato para la obtención de estos parámetros debido a las ventajas que presenta. Entre ellas: gran estabilidad a largo plazo; reducido tamaño y flexibilidad, lo que permite adaptarse a formas variadas; alta precisión y sensibilidad en las mediciones; elevada durabilidad; inmunidad frente a las interferencias electromagnéticas y de radio (EMI), y posibilidad de monitorización continua y remota.

El objetivo principal de este artículo consiste en determinar la viabilidad de la aplicación de sensores basados en la fibra óptica para la monitorización de firmes asfálticos de carretera. En concreto, se han empleado sensores FBG fabricados por el Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) y el Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la UPV.

Se pretende que la colocación de la fibra siga un procedimiento simple con el objetivo de facilitar su disposición en obra. Además, se persigue también que la aplicación final en una obra real se pueda realizar con los mismos materiales con los que se ejecuta la carretera, con el fin de abaratar costes. Se plantea el uso de materiales bituminosos y resinas, estas últimas por ser el material de referencia, cuya influencia en las mediciones del sensor es conocida.

La revisión bibliográfica llevada a cabo para la realización de este estudio muestra que son numerosas las investigaciones sobre esta aplicación. Los autores centran sus estudios principalmente en los siguientes aspectos: la viabilidad de la implementación de estos sensores en el pavimento, la determinación del grado de influencia de la protección que garantiza la supervivencia del sensor y, por último, el establecimiento del grado de precisión que tiene esta nueva tecnología.

Los investigadores proponen, y prueban en muchos casos, numerosos tipos de protecciones. Esta gran variedad de protecciones muestra la importancia de la elección de este encapsulado, del método de fijación a la carretera y de su correcta caracterización en la calidad de los datos que el sistema de monitorización permite obtener.

El presente artículo se centra en determinar la resistencia de los sensores de fibra al proceso de compactación y en definir el rango de deformaciones detectables por esta tecnología con el fin de verificar su viabilidad como sensor embebido.

2. SENSORES DE FIBRA ÓPTICA

La fibra óptica es un filamento flexible y transparente realizado en vidrio extruido o plástico, con un diámetro ligeramente más grueso que un cabello humano, que se emplea para transmitir luz entre los dos extremos de la misma. Este filamento consiste en un núcleo de forma cilíndrica rodeado de un material de recubrimiento transparente (*cladding*). Ambas partes están hechas de materiales dieléctricos y presentan diferentes índices de refracción, lo que permite que la luz quede confinada dentro del núcleo y se transmita.

En su función como sensor, las fibras se pueden emplear para medir deformación, temperatura, presión, vibración, desplazamiento y otros parámetros. Esto se consigue gracias a la relación entre los parámetros a medir y su influencia en la modulación de una o más de las propiedades de la luz dentro de la fibra. En algunos casos es necesario para ello modificar previamente la fibra.

Además de la clasificación atendiendo a la propiedad de la luz de la que se sirven para medir, los sensores de fibra óptica se pueden distinguir, en base a la topografía y a la configuración que adoptan, como sensores: puntuales, quasi-distribuidos (sensores puntuales multiplexados) o sensores distribuidos.

Un sensor puntual normalmente tiene una porción sensitiva situada en uno de los extremos del hilo. Un sensor multiplexado consiste en dos o más regiones sensitivas puntuales a lo largo de la fibra donde cada parte puede detectar el mismo o diferente parámetro. Los sistemas de sensado distribuidos emplean la longitud completa del hilo de fibra para sensar uno o más parámetros externos los cuales pueden estar en el orden de varias decenas de kilómetros.

En su forma más sencilla un sistema de sensado de fibra óptica se compone de una fuente de luz, la fibra óptica, un elemento sensitivo y un detector.

2.1. Principio de funcionamiento de los sensores FBG

Una de las tecnologías de sensado de fibra óptica más desarrolladas son las que se fundamentan en el uso de los grabados de redes de difracción de Bragg (Fiber Bragg grating o FBG por sus siglas en inglés). Este tipo de sensor puntual basa su funcionamiento en el grabado de un patrón periódico en el núcleo de la fibra. Este grabado suele ocupar una longitud total de unos 10 mm.

La creación del grabado se realiza introduciendo una estructura refractiva periódica en el núcleo de la fibra. Esta estructura funciona de manera que, cuando un rayo de luz es enviado a través de la fibra, al llegar a la zona del grabado, las reflexiones de la onda lumínica en cada uno de los segmentos del grabado con distinto índice de refracción se combinan para generar una única longitud de onda, denominada longitud de onda de Bragg.

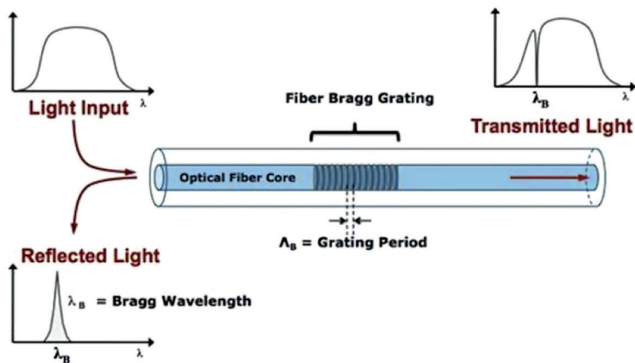


Figura 1. Modo de operación de un sensor FBG.

Esta señal lumínica reflejada corresponde a la forma de un pico estrecho centrado alrededor de la longitud de onda de Bragg. Esta cambia en función de las variaciones de temperatura y/o deformación que experimenta la fibra y que afectan también a la geometría del grabado.

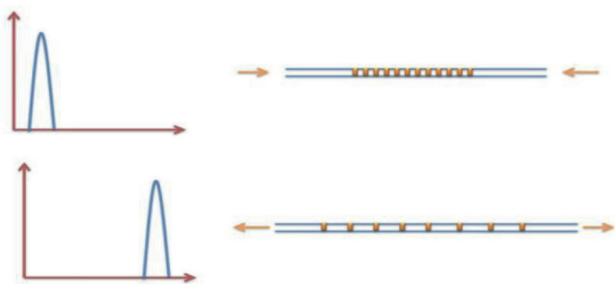


Figura 2. Variación en la longitud de onda reflejada por la Red de Bragg.

Esta tecnología tiene la ventaja de poder ser adaptada a una gran variedad de aplicaciones debido a que puede medir varios tipos de fenómenos físicos y a que varios sensores puntuales pueden ser colocados a lo largo de un mismo cable de fibra creando con ello un sensor quasi-distribuido.

Además, frente a otros tipos de sensado, los sensores puntuales FBG presentan mayor sensibilidad para captar deformaciones. La elección de los mismos se justifica con el hecho de que un objetivo de la parte experimental es evaluar el rango de deformaciones que es detectable en las pruebas en laboratorio.

2.2. Diseño del encapsulado

Los métodos de protección de los sensores basados en la tecnología de la fibra óptica son uno de los aspectos fundamentales de su diseño, puesto que estos han de cumplir una doble función.

En primer lugar, han de garantizar un buen contacto mecánico entre el sensor y la estructura o elemento a monitorizar. En segundo lugar, el encapsulado debe proporcionar una protección suficiente que garantice la supervivencia de los sensores frente a las acciones físicas a las que se puedan ver sometidos.

El diseño de la protección también viene determinado por la posición que adoptan los sensores en relación a la geometría del elemento que se desea monitorizar, adheridos a la superficie o embebidos a los mismos. En este caso se trata de sensores embebidos en el interior de probetas asfálticas.

También tiene influencia la tecnología de sensado que se esté aplicando. Para los sensores con una longitud de sensado pequeña, como es el caso de los sensores FBG, es muy difícil añadir capas de protección sin alterar la respuesta de los mismos. Estos deben ir adheridos o embebidos directamente en la estructura. Sin embargo, en otros casos es posible embeber previamente la fibra en un material de protección, siempre y cuando este sea mecánicamente compatible con el material que se desea monitorizar.

En los sensores embebidos, tanto el material de protección como el mismo material de la estructura huésped pueden ocasionar la aparición de efectos parásitos en las mediciones de deformación transversal al eje de la fibra registradas por el sensor.

En el caso de los sensores para las menciones de temperatura, la protección debe asegurar que el elemento sensor está aislado de las deformaciones externas, de tal manera de que solo pueda reaccionar frente a los cambios de temperatura.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Las pruebas propuestas se han centrado en los aspectos de desarrollo de encapsulados, la eva-

luación de la resistencia de los sensores para ser embebidos dentro de las probetas y la determinación del grado de sensibilidad a las deformaciones de los sensores. A continuación, se describen tanto los procedimientos y ensayos llevados a cabo como los materiales empleados.

3.1. Materiales

La mezcla elegida para los ensayos de laboratorio corresponde a un hormigón bituminoso tal y como expone el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes (PG-3). En concreto, la mezcla elegida es una AC22 S, que puede ser empleada en las capas de rodadura o intermedia.

Respecto a los sensores empleados, se va a trabajar con sensores FBG de fibra desnuda fabricados en el instituto iTEAM de la UPV. Se trata de un hilo de fibra desnuda, de 250 μm de diámetro, sobre el que va grabado en su parte central el sensor FBG. En esta zona donde se ubica el sensor el recubrimiento primario de acrilato es eliminado en el proceso de fabricación, quedando el núcleo de vidrio y el cladding con un diámetro total de 125 μm . Para este tipo de sensores se plantea un tipo de encapsulado total, es decir, que proteja no solo la zona del sensor sino también la zona pasiva de fibra que se encuentra dentro de la probeta.

Los materiales de encapsulado que se consideran para los ensayos son de dos tipos, uno de naturaleza resinosa y otro de naturaleza bituminosa. El empleo de los primeros se plantea debido a que ya se conocen los parámetros de calibración de los sensores embebidos en este tipo de materiales y adheridos a la superficie de la estructura huésped. Por lo tanto, pese a no ser un material adecuado para su colocación en obra, se ha decidido hacer uso de este para poder tener una referencia en cuanto a los parámetros registrados por los sensores. En concreto se va a hacer uso de una resina de poliéster.

En relación a los materiales de naturaleza bituminosa, se trata de una mezcla de betún modificado con polímeros, aditivos y cargas minerales. Este producto ejerce asimismo las veces de adhesivo,

puesto que se coloca en caliente sobre la fibra colocada en la probeta.

Las protecciones no siempre garantizan la adherencia de los mismos a la superficie de la capa bituminosa, de tal manera que es necesario disponer de algún material adhesivo entre el sensor protegido y el espécimen. En concreto, esta situación la encontramos para los sensores encapsulados con resina. En este caso también se ha planteado la adopción de materiales de naturaleza resinosa y bituminosa. En el primer caso se trata de un adhesivo de resina epoxy bicomponente. El material bituminoso es riego adherente empleado para unir diferentes capas de firme durante la construcción del mismo.

3.2. Metodología

Para los experimentos con probetas con sensores embebidos se va hacer uso de una máquina de ensayo en pista. Puesto que la maquinaria empleada en la compactación y ensayo de probetas asfálticas no está adaptada para disponer sensores embebidos, los ensayos han tenido que ser modificados con este fin.

Con el objetivo de facilitar la adaptación del ensayo, se emplean los moldes y procedimientos de compactación y ensayos descritos por la antigua normativa NLT-173/00: Resistencia a la deformación plástica de las mezclas bituminosas mediante la pista de ensayo en laboratorio. La Figura 3 muestra la máquina empleada en la realización de este ensayo durante su empleo con una de las probetas con sensores.

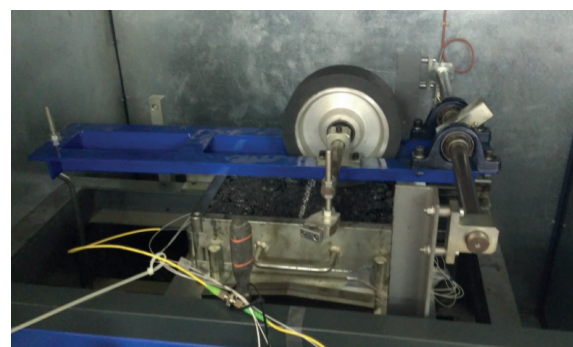


Figura 3. Máquina de ensayo para la pista de ensayo en laboratorio. Prueba con probeta con sensores.

Según esta normativa los moldes a emplear permiten la creación de probetas cuya geometría en planta es de 30x30 cm. Esta misma norma determina una presión de contacto de la rueda de 900 kN/m² y una frecuencia del movimiento de vaivén de 42 pasadas por minuto.

El molde empleado, ha sido adaptado para permitir la salida de los cables de fibra. Esta adaptación permite la colocación hasta en tres posiciones distintas dentro de la probeta. En este ensayo con sensores embebidos, la colocación del sensor viene determinada por el espesor máximo de la probeta, que en este caso es de 8 cm.

Pruebas de resistencia a la puesta en obra

Los primeros ensayos se han centrado en determinar la supervivencia de hilos de fibra óptica desnuda embebidos dentro de probetas en el proceso de compactación de las mismas. En este caso, puesto que no se emplean sensores, la profundidad a la que se embeben se ha ido variando para probar con las distintas energías de compactación que le llegan a la fibra.

En los sensores realizados por el iTEAM, se elimina la capa de recubrimiento primario (coating) de los cables de fibra en el proceso de fabricación. La eliminación de esta capa de acrilato reduce la protección. Para simular este hecho, en los ensayos con fibra desnuda sin sensor, ciertos tramos se han desprovisto de esta capa.

Un ejemplo de creación de probetas y ensayo a la compactación de las fibras se muestra en la Figura 4 y en la Figura 5. En este caso, la fibra se embebe empleando para ello la protección del producto bituminoso con ranura de la probeta.



Figura 4. Prueba con ranura y producto para sellado de grietas. Fibra colocada en la ranura (izda.) y colocación del producto bituminoso (dcha.).

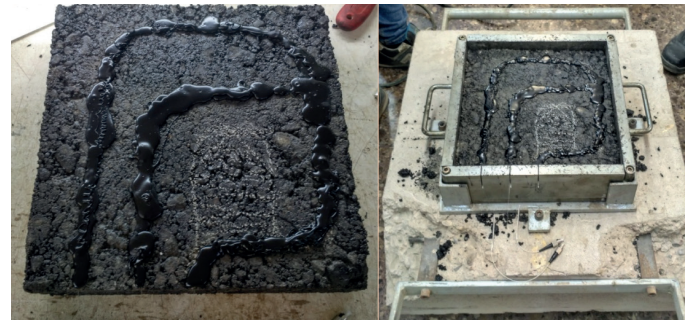


Figura 5. Prueba con ranura y producto para sellado de grietas. Probeta con producto bituminoso (izda.) y probeta preparada en el molde para compactación (dcha.)



Figura 6. Prueba con ranura y producto para sellado de grietas. Comprobación de la supervivencia de los hilos de fibra al proceso de compactación.

La comprobación de la supervivencia de los hilos de fibra se realiza mediante el uso de un láser que inyecta una luz a través de la fibra. Si esta ha sobrevivido, la luz es visible desde el otro extremo de la fibra, a través de toda la probeta asfáltica. Un ejemplo de esta comprobación para el ejemplo de la fibra protegida con el producto bituminoso se muestra en la Figura 6.

Pruebas de sensibilidad - ensayo de pista

Con esta serie de ensayos se pretende comparar el grado de sensibilidad que presentan los distintos tipos de sensores, embebidos y fijados en el interior de la probeta, bajo la sollicitación una carga en la superficie de la capa asfáltica.

En estas pruebas los sensores, haciendo uso del mismo tipo de encapsulado, se disponen en diferentes posiciones con respecto al punto de aplicación de la carga para ver cómo evoluciona la sensibilidad del sensor conforme aumenta la distancia.

La probeta a ensayar tiene unas dimensiones en planta de 30x30 cm y la zona de aplicación de la

carga comprende un área alargada de 23x5 cm en la parte central. Los sensores se van a colocar hasta en tres posiciones distintas: en el centro de la probeta debajo de la banda de aplicación de la carga y en franjas situadas a 5 y 10 cm respectivamente de la primera.

La colocación de los sensores se realiza a una profundidad de 6 cm desde la cara donde actúan las cargas. Un esquema de la probeta de proporciona en la Figura 7.

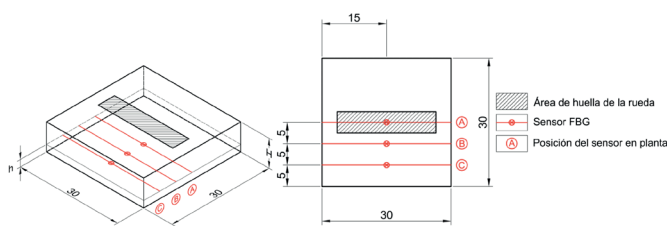


Figura 7. Esquema de colocación de los sensores dentro de la probeta con H=8 y h=2 cm.

Tabla 1. Relación de configuraciones de encapsulados y adhesivos ensayados.

Tipo de fibra (sensor)	Protección de todo el hilo	Adhesivo	Nº
Vidrio 125 µm (sin coating)	Resina	Resina epoxy	1
		Riego adherente	2
	Mástico con ranura	-	3

Se han elegido las combinaciones de material de encapsulado y material adhesivo que nos permiten tener en cuenta todas las posibles variaciones que se pueden dar en las pruebas con referencia a los encapsulados de resina. Las combinaciones probadas se muestran en la Tabla 1.

Se han preparado para ello dos probetas con las siguientes características:

- La primera probeta P1, representada en la Figura 8, consta de un total de cuatro sensores de deformación. Dos de ellos colocados según la configuración 1 y los otros según la 2 (ver Tabla 1). De cada par de sensores, uno se dispone en el centro de la probeta y otro desplazado 5 cm respecto a este, o lo que es lo mismo, en las posiciones A y B conforme se muestran en la Figura 7.

- La segunda probeta P2, representada en la Figura 9, consta de dos sensores. Uno de ellos colocado según la configuración 1 y otro según la 3 (ver Tabla 1), ambos en la posición A según se muestra en Figura 7.

Además, en cada probeta se colocará un sensor de temperatura, aislado mecánicamente del material asfáltico, mediante una protección metálica. Este se sitúa, en ambos casos, en la posición C (ver Figura 7).

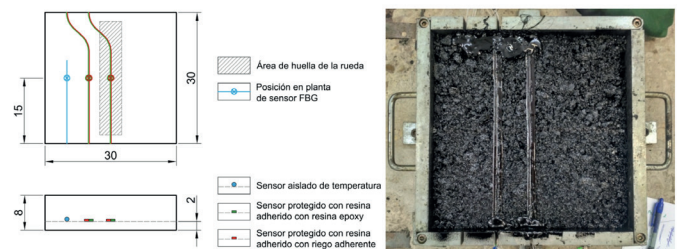


Figura 8. Esquema colocación de los sensores dentro de la probeta P1 (izda.) y sensores colocados en la probeta, a falta del sensor de temperatura (dcha.).

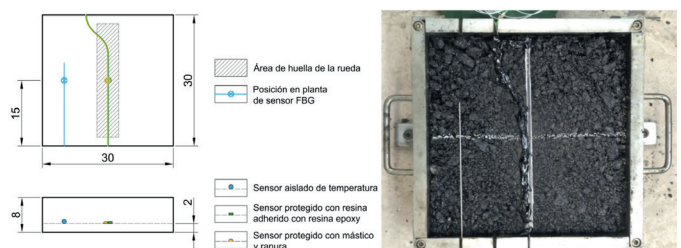


Figura 9. Esquema de colocación de los sensores dentro de la probeta P2 (izda.) y sensores colocados en la probeta (dcha.).

3.3. Resultados

Pruebas de resistencia a la puesta en obra

Respecto a las pruebas de supervivencia la Tabla 2 resume los ensayos realizados. En el recorrido experimental, algunos encapsulados se han descartado (mástico preformado) y otros se han ido mejorando. Es por ello que los primeros ensayos, a pesar de realizarse con trozos de fibra que incluían el recubrimiento primario (coating), presentan menores tasas de supervivencia.

Tabla 2. Pruebas de resistencia a la puesta en obra de la fibra óptica realizadas.

Tipo de fibra desnuda	Espesor de la capa de apoyo (cm)	Espesor de la capa superior compactada (cm)	Protección de todo el hilo	Nº de pruebas	Nº de pruebas válidas
Vidrio 250 µm (con coating)	4	4	Mástico	2	0
	4	4	Mástico preformado	2	1
	4	4	Mástico con ranura	1	1
	4	4	Resina	1	1
	2	6	Resina	1	0
	6	2	Mástico con ranura y riego adherente	1	0
			Riego adherente	1	0
Vidrio 125 µm (sin coating)	6	2	Mástico con ranura	2	2
	2,5	3,5	Resina	2	2
	6	2	Resina	2	2
	5	2	Resina	1	1

La ranura que se ejecuta junto a la protección mediante mástico se realiza con el objetivo de encauzar la fibra por el recorrido que ha de tener. Además, esta hendidura puede ser favorable de cara a la supervivencia de los sensores.

Finalmente, se concluye que las protecciones con resina y con mástico (en este caso, al ser fibra desnuda, empleando la ranura) son las que mayor supervivencia garantizan incluso para la fibra que no cuenta con la protección de la capa primaria o coating.

Pruebas de sensibilidad - ensayo de pista

En este caso, ambas probetas han sido sometidas al paso de la rueda con el objetivo de comparar el comportamiento de los distintos encapsulados. Las pruebas se han realizado empleando para ello una presión de contacto de 900 kN/m².

El equipo que interroga los sensores registra valores a una frecuencia de 25 datos por segundo. Del total del listado de datos, se seleccionan algunos tramos para observar el comportamiento de

la probeta bajo el paso de la rueda en unas 5-6 ocasiones. Para cada uno de los ensayos, se han analizado dos subconjuntos de valores del total de los datos. La Figura 10 y la Figura 11 recogen los resultados obtenidos durante los ensayos.

En la probeta P1, puesto que todos los sensores van encapsulados en resina, el código de referencia se ha creado en base a la posición que adoptan los sensores de las tres disponibles (A centro, B medio y C extremo) y al tipo de adhesivo (riego R o adhesivo epoxy E).

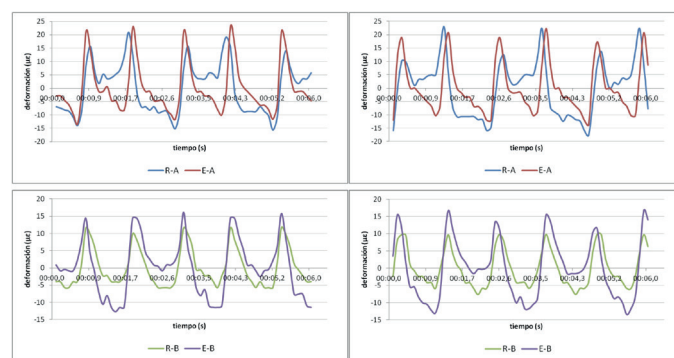


Figura 10. Resultados del ensayo de la probeta P1 para los cuatro sensores de deformación. Leyenda de las gráficas: R: Adhesivo Riego, E: Adhesivo Resina y A, B: Posiciones de los sensores respecto al eje de la rueda. Datos entre 04':26,7" y 04':32,7" (izda.) y datos entre 06':45,8" y 06':51,8" (dcha.).

En la probeta P2, se distingue entre el sensor encapsulado con resina y adherido mediante resina epoxy E y el sensor encapsulado y adherido mediante el producto bituminoso M. Ambos colocados en la posición A.

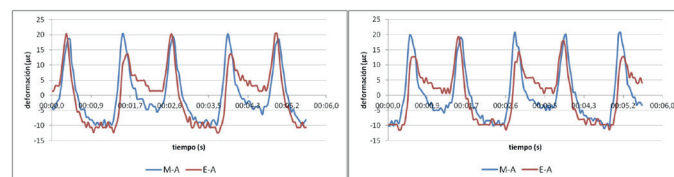


Figura 11. Resultados del ensayo de la probeta P2 para los dos sensores de deformación. Leyenda de las gráficas: M: Encapsulado Mástico, E: Adhesivo Resina y A: Posición de los sensores respecto al eje de la rueda. Datos entre 02':01,3" y 02':06,9" (izda.) y datos entre 03':39,4" y 03':45,0" (dcha.).

El paso de la rueda genera una flexión en la muestra asfáltica. Por la posición que ocupan los sen-

sores dentro de la probeta, está flexión se traduce en deformaciones de tracción en esa zona, que se recuperan una vez la carga se retira. Según el criterio de signos empleado, las deformaciones de tracción corresponden a valores de signo positivo, por lo tanto, el paso de la rueda sobre los sensores corresponde con los picos registrados mientras que las zonas de valle corresponden a los momentos en los que la rueda se encuentra más alejada.

Tanto en los ensayos de la probeta P1 como en los de la P2 se aprecia una alta repetitividad entre los patrones registrados por los diferentes encapsulados. En ambas probetas, para la posición central A, los sensores registran deformaciones positivas máximas de $20 \mu\epsilon$ y valores negativos de $-15 \mu\epsilon$.

En la probeta P1, además se tiene registro de lo que ocurre a 5 cm del centro, esto es en la posición B. En esta zona, pese a que la rueda no ejerce presión sobre la superficie situada en la vertical de la posición de los sensores, los valores de deformación registrados siguen siendo altos, encontrándose valores máximos de tracción de $15 \mu\epsilon$ y valores máximos negativos de $-13 \mu\epsilon$.

Las diferencias observadas en la forma que adoptan las gráficas de deformaciones, algunos sensores presentan valles intermedios de menor valor que otros, puede ser explicado por la irregularidad característica de la microestructura de la mezcla. Esta genera que la transmisión de los esfuerzos pueda ser diferente según la dirección de la que provenga la rueda en su movimiento de vaivén. Este fenómeno explicaría la periodicidad observable en la irregularidad de las gráficas.

La realización de los ensayos se llevó a cabo en un periodo de tiempo relativamente corto y en laboratorio, es decir, bajo condiciones de temperatura constante. Las mediciones de los sensores de temperatura instalados en ambas probetas así lo constatan, registrándose variaciones máximas del orden de $0,25^\circ$ (ver Figura 12). Es por esta razón que no se considera necesario realizar corrección de los valores de deformación por afecto de la temperatura.

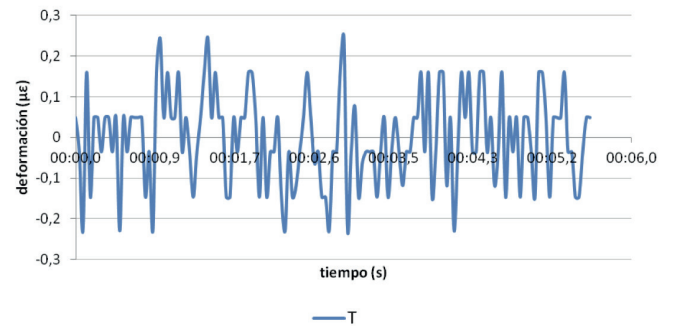


Figura 12. Variación de temperatura registrada por el sensor de temperatura de la probeta P2 durante el ensayo.

4. CONCLUSIONES

Los resultados mostrados corroboran la viabilidad del empleo de sensores de fibra óptica para la medición de deformaciones y temperatura en pavimentos asfálticos. Se prueba que los métodos escogidos para la colocación de los sensores garantizan su resistencia al proceso de compactación y permiten la obtención de valores de deformación con una alta repetitividad. Para ello se han probado distintos tipos de encapsulados, protecciones y adhesivos, buscando validar el uso de materiales ya presentes en las obras de carreteras, como los riegos de adherencia o másticos bituminosos, con los que se han obtenido resultados similares a los alcanzados con otros métodos más complejos que han sido usados como referencia.

La posibilidad de tener medidas continuas de deformación del pavimento por acción de la temperatura o de la sollicitación de las cargas de tráfico abre la puerta al desarrollo de sistemas de monitorización continua que permitan optimizar las actividades de gestión del mantenimiento de las redes viarias.

Además, mediante un correcto procedimiento de análisis de los datos, también permitirían crear herramientas de control de tráfico para el conteo de ejes, el pesaje dinámico de vehículos, etc.

Es necesario recalcar, sin embargo, que estos son todavía los primeros pasos en el desarrollo de sistemas de monitorización de firmes asfálticos basados en esta tecnología y que se ha de llevar a cabo

una mayor investigación experimental para definir bien todos los aspectos de la misma.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Chapeleau, X., Blanc, J. et al.** "Use of Distributed Fiber Optic Sensors to Detect Damage in a Pavement". EWSHM - 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, Le Cam, Vincent and Mevel, Laurent and Schoefs, Franck, Nantes, France (2014).
- **Cosentino, P. J., von Eckroth, W. et al.** "Analysis of fiber optic traffic sensors in flexible pavements". Journal of Transportation Engineering, Vol. 129, Issue 5 (2003).
- **Dong, Z., Ma, X. et al.** "Theoretical evaluation of the measurement accuracy of fiber Bragg grating strain sensors within randomly filled asphalt mixtures based on finite element simulation". Structural Control and Health Monitoring, 25(1), John Wiley & Sons, Ltd. (2017).
- **Dong, Z., Tan, Y. et al.** "Combining Strain Measurement and FEM Simulation to Obtain Dynamic Response of Asphalt Pavement". International Journal of Pavement Research and Technology, Chinese Society of Pavement Engineering (2009).
- **Eric U., Marley K. et al.** "Fiber grating systems for traffic monitoring". Proc. SPIE 4337, Health Monitoring and Management of Civil Infrastructure Systems, (2001).
- **Glišić, B. y Inaudi, D.** "Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring". Chichester: John Wiley & Sons. Chichester, Reino Unido. (2007).
- **Hu, Y., Yu, J. H. et al.** "Research on the application of fiber Bragg grating sensor in pavement monitoring". Applied Mechanics and Materials, Vols. 505-506, Trans Tech Publications, Suiza (2014).
- **Torres, B.** "Definición de las pautas y condiciones de monitorización, encapsulado y fijación de sensores de fibra óptica para la medida de deformación y temperatura en estructuras". Editorial Universitat Politècnica de València, Valencia, España (2014).
- **Wang, H., Liu, W. et al.** "Functionality enhancement of industrialized optical fiber sensors and system developed for full-scale pavement monitoring". Sensors (Switzerland), 14(5), Suiza (2014).
- **Xie, J., Li, H. et al.** "Laboratory investigation of rutting performance for multilayer pavement with fiber Bragg gratings". Construction and Building Materials, 154, (2017).