

Medición de microdeformaciones en losas viales usando sensores de redes de Bragg en fibras ópticas

Medição de microdeformações nos blocos viales usando redes de Bragg nas fibras ópticas

Microdeformation measurement of concrete roadway slabs using fiber Bragg gratings

Francisco Javier Vélez–Hoyos¹, Claudia Milena Serpa–Imbet² y Nelson Darío Gómez–Cardona³

Recepción: 09-sep-2009/Modificación: 22-feb-2010/Aceptación: 24-feb-2010

Se aceptan comentarios y/o discusiones al artículo

Resumen

En este trabajo se presenta un método no invasivo para la medición de microdeformaciones en estructuras de concreto usando sensores de redes de Bragg en fibras ópticas adheridos a su superficie. Se realizan mediciones en losas viales de concreto bajo una carga estática de 10 kN, encontrándose una relación aproximada de 2 : 1 entre la deformación registrada por los sensores y los valores arrojados por una simulación computacional con el método de elementos finitos. Se propone el uso de estos sensores para el monitoreo estructural de losas en una malla vial con sensores distribuidos y multiplexados por longitud

¹ Magíster en Ciencias–Física, fvelezh@eafit.edu.co, estudiante de doctorado en Ingeniería, Universidad EAFIT, Medellín–Colombia.

² Magíster en Ciencias–Física, claudiaserpa@itm.edu.co, académica Investigadora, Centro de Investigación, Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), Medellín–Colombia.

³ Ingeniero Físico, nelsongomez@itm.edu.co, docente, Centro de Investigación, ITM, Medellín–Colombia.

de onda. Este es el primer reporte en Colombia de medición de deformación de losas viales usando sensores de fibra óptica.

Palabras claves: sensores de fibra óptica, redes de Bragg en fibras ópticas, losas viales de concreto, método de elementos finitos.

Resumo

Neste trabalho se–apresenta um método não invasivo para a medição de micro–deformacoes nas estruturas de concreto usando sensores de redes de Bragg na fibra ótica colados na superfície. Realizem as mediciones nas vias de concreto a una carga estática de 10 kN, e encontrando–se uma relação aproximada de 2 : 1 com a deformação registrada pelos sensores e os valores da simulação computacional com o método de elemento finito. Propõem e uso destes sensores para monitoreo da saude estructural das vias com sensores distribuídos e multiplexados por comprimento de onda. Este e o primeiro trabalho na Colombia de medicao de deformação nas vias usando sensores de fibra ótica.

Palavras chaves: sensores na fibra ótica, redes de Bragg na fibra ótica, blocos viales de concreto, metode dos elementos finitos.

Abstract

This work shows a non–invasive method for micro–deformation measurements of concrete structures using Bragg grating sensors in optical fibers adhered to the surface. Measurements on roadway slabs under a 10 kN static load are made, finding an approximated ratio of 2 : 1 between the deformation registered by the sensors and the values from a computational simulation with the finite element method. We propose the use of these sensors for slab structural monitoring in a road network employing distributed and wavelength multiplexed sensors. This is a first report in Colombia of roadway slabs micro–deformation measurement using fiber optic sensors.

Key words: fiber optic sensors, optical fiber Bragg gratings, concrete roadway slabs, finite element method.

1 Introducción

El uso limitado de los pavimentos rígidos se debe principalmente a que los pavimentos flexibles presentan menores costos y mayores facilidades para su construcción [1], sin embargo, los primeros presentan un bajo deterioro y gran durabilidad por su gran resistencia mecánica, pero a pesar de esto, las sobrecargas por el paso de los vehículos producen microdeformaciones en las losas, que en algunos casos son suficientes para generar grietas o fracturas. Con interés en esta problemática, se implementan sistemas de control y monitoreo

[2], para conocer *in-situ* y en tiempo real el estado de la vía, y usar esta información en la elaboración de planes de mantenimiento preventivo y correctivo [3]. Estos sistemas usan sensores de deformación embebidos en el pavimento [4] y sensores de desplazamiento para medición de la separación en las juntas, los cuales requieren la inserción de los sensores en la vía durante el proceso de construcción, o en la estructura construida, alterando la misma. Adicionalmente, la mayoría de sensores tradicionales son afectados por las condiciones ambientales como la humedad o el calor, que modifican su respuesta y causan su deterioro [3]. Para superar estos inconvenientes, recientemente se han implementado sensores de fibra óptica, dadas las ventajas que ofrecen sus dimensiones tan reducidas y que al estar fabricados de vidrio pueden utilizarse en ambientes agresivos, siendo además fáciles de multiplexar, permitiendo el sensado de grandes estructuras [5]. En estructuras civiles, se usan los sensores basados en redes de Bragg en fibra óptica (FBG) que miden directamente deformación y temperatura con una sensibilidad de $1,2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ (corrimiento espectral de la respuesta de la FBG por unidad de deformación) y $13 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ respectivamente [6], así como Reflectómetros Ópticos (OTDR) para la detección temprana de grietas [7]. Actualmente, la mayoría de los esquemas de sensado con esta técnica se estudian e implementan a nivel de laboratorio, mediante pruebas en especímenes y ensayos destructivos [8], [9]. En este trabajo se muestra la medición de microdeformaciones en una losa de concreto que hace parte de una vía, sometida a una carga vehicular estática (correspondiente a un vehículo en reposo sobre la placa) usando sensores basados en FBG adheridos a la superficie. Esta medición tiene como objetivo evaluar la factibilidad del uso de sensores adheridos a la superficie de la vía, sin invasión de la estructura, para la medición de la deformación inducida en la zona de aplicación de la carga, como la fase inicial de pruebas para sensado de carga en movimiento. Como valores de referencia se tomarán los resultados de una simulación del sistema por el Método de elementos finitos (MEF) [10], [11], para determinar la distribución de deformaciones inducidas en dos zonas de la losa, bajo acción directa de la carga. Basados en los resultados obtenidos por el MEF y las deformaciones registradas por los sensores FBG, se busca una relación entre ambos para determinar experimentalmente la deformación en la zona de sensado. Se propone el uso cuasi-distribuido de estos sensores para el monitoreo estructural de losas en una malla vial.

2 Principio de funcionamiento de las redes de Bragg

Una FBG es un dispositivo elaborado en una fibra óptica a la que se le perturba el índice de refracción de su núcleo para modularlo periódica o cuasi-periódicamente, de manera que actúe como un filtro espectral. De este modo, si sobre la FBG incide luz con cierto ancho espectral, se reflejará la proporción de luz correspondiente a una longitud de onda específica, denominada longitud de onda de Bragg, definida según (1) [5]

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda. \quad (1)$$

Los parámetros n_{eff} , que es el índice de refracción efectivo, y Λ , la periodicidad de la variación del índice del núcleo perturbado, pueden ser afectados externamente por alteraciones mecánicas y térmicas, y de allí que pueda ser utilizado como dispositivo sensor. En condiciones isotérmicas el corrimiento espectral de la longitud de onda de Bragg debido a efectos mecánicos está dado por (2) [5]

$$\Delta\lambda_B = \Lambda_B(1 - p_e)\epsilon_z, \quad (2)$$

donde ϵ_z es la deformación unitaria longitudinal en la FBG y p_e el coeficiente elasto-óptico efectivo para deformaciones longitudinales. A una λ_B de 1550 nm se calcula un corrimiento espectral de 1,2 pm/ $\mu\epsilon$, lo que muestra la posibilidad de sintonización espectral a partir de perturbaciones mecánicas útiles en la construcción e implementación de sensores ópticos para medición de deformaciones longitudinales con alta resolución.

3 Simulación numérica usando el MEF

Mediante el MEF se realiza la simulación del comportamiento estructural de una losa vial, de manera que sirva de referente para las pruebas de sensado llevadas a cabo posteriormente. El modelo considera una losa de concreto de 3,5 m \times 3,6 m \times 0,25 m que descansa sobre una base de concreto de 0,50 m de espesor cuyos bordes están a 0,50 m de los bordes de la losa, de tal forma que se transmitan libremente las cargas aplicadas. La subrasante, es decir, el suelo soporte se toma como una condición de frontera elástica en la cara

inferior de la base. Las propiedades elásticas de la losa, la base y el suelo, correspondientes a la vía usada en las pruebas [12], se muestran en la tabla 1. Esta simulación tiene en cuenta la distribución de la carga, las condiciones de contorno, la interacción con la base, y el apoyo de la base sobre la subrasante. Las zonas de aplicación de carga se consideran rectangulares de 10 cm de lado por 7,0 cm de ancho, según una transformación equivalente del área de contacto de las llantas [13]. El efecto de las juntas entre losas se considera mediante el uso de fronteras elásticas, para permitir la expansión lateral.

Tabla 1: parámetros empleados en la simulación numérica por MEF

| Medio | Módulo elástico (MPa) | Razón de Poisson | Densidad (kg/m ³) |
|------------|-----------------------|------------------|-------------------------------|
| Losa | 27000 | 0,18 | 2300 |
| Base | 22000 | 0,20 | 2100 |
| Subrasante | 180 | 0,35 | 1500 |

La carga estática, vehículo en reposo, aplicada por las llantas, corresponde a uno con un peso aproximado de 10 kN. La presión media es de alrededor de 250 kPa para cada llanta, si se considera una distribución de carga uniforme del vehículo. En la figura 1 se observa un esquema del sistema analizado.

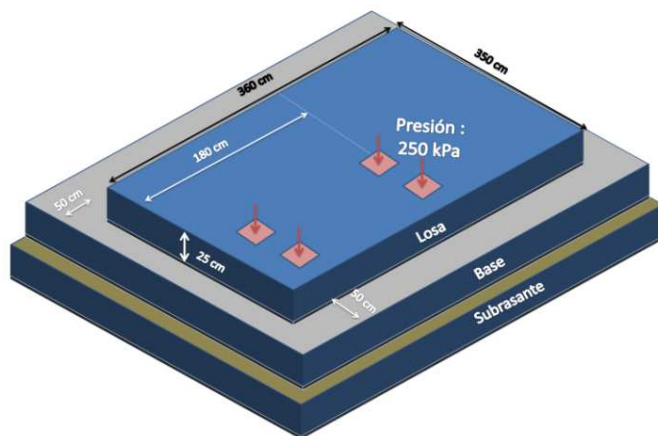


Figura 1: modelo de una losa vial de concreto sometida una carga de 10 kN

En el modelo se emplearon 8779 elementos, entre los de tipo hexaédrico (Solid186) para la base y tetraédrico (Solid187) para la losa, ambos con capacidad de respuesta no lineal; así como elementos de contacto (Targe170, Conta174) para la interacción no lineal entre la losa y la base. No obstante la capacidad de respuesta no lineal del modelo, se consideró un análisis estático estructural bajo un modelo elástico lineal dado que la carga considerada es baja. En la figura 2, se muestran los resultados de la solución numérica del sistema, donde se observa una distribución de contornos que representan los desplazamientos sobre el eje vertical, medidos en micras. Estos corresponden aproximadamente a $3,7 \mu\text{m}$ para la zona sobre el borde transversal y $2,8 \mu\text{m}$ para la otra zona.

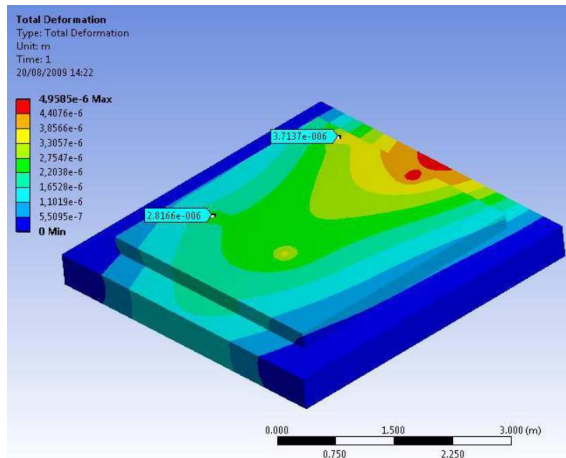


Figura 2: distribución de desplazamientos (a compresión) de la losa para una carga de 10 kN. Las zonas de sensado se muestran con etiquetas que dan los valores arrojados por el MEF

4 Montaje experimental

En la figura 3 se muestra el montaje de la prueba experimental que consiste en un arreglo de sensores de deformación y temperatura instalados en la losa de concreto. Se usaron sensores de deformación basados en FBG, ubicados en las zonas de aplicación de la carga sobre la losa. Uno de ellos, el Sensor

de deformación 1 (SD1), se ubicó a 10 cm del borde transversal y a 50 cm del borde longitudinal, y el otro, el sensor de deformación 2 (SD2), a 50 cm del borde longitudinal y a 180 cm del borde transversal. Los sensores de deformación están protegidos por una placa delgada de material compuesto especial para montaje superficial y fueron adheridos a la losa usando una capa fina de resina epóxica luego de realizar una limpieza de la superficie. Los sensores FBG empleados responden a deformaciones entre $1,0$ y $4000 \mu\varepsilon$, y la unidad de medición BraggMeter FS4200 ofrece una resolución aproximada de $1,0 \mu\varepsilon$. El sensor de temperatura basado en FBG fue ubicado en el borde transversal de la losa a 180 cm de la esquina inferior, que servirá de referencia para las medidas de los sensores de deformación. La losa fue sometida a una carga vehicular de un automóvil con un peso aproximado de 10 kN. El avance del automóvil fue lento, y se detuvo sobre los sensores de deformación. Los sensores se conectaron secuencialmente a uno de los canales de un interrogador BraggMeter FiberSensing FS4200, trabajando a una razón de muestreo de 200 Hz y usando adaptadores tipo FC-FC en los extremos de las conectorizaciones FC-APC propias de cada sensor.

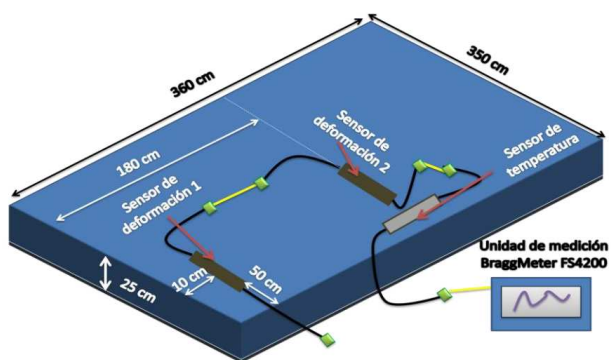


Figura 3: ubicación de los sensores de fibra óptica en una losa de concreto

5 Resultados experimentales

La figura 4 presenta la respuesta de los sensores de deformación cuando la losa es sometida a una carga vehicular de 10 kN, así como el registro que hace

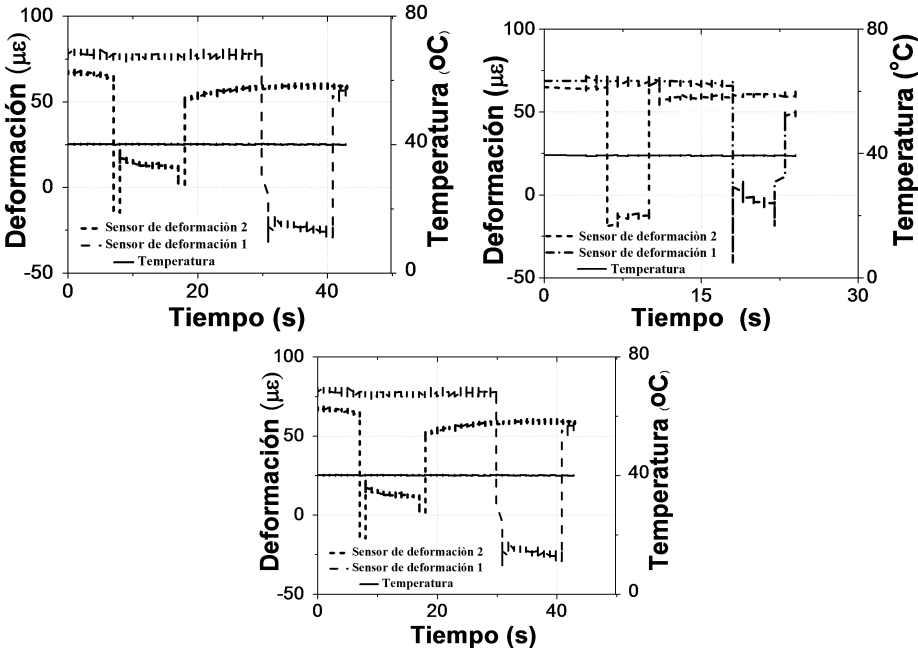


Figura 4: respuesta de los sensores para un vehículo de 10 kN

el sensor de temperatura, para tres medidas consecutivas. El valor inicial para ambos sensores es $70 \mu\epsilon$, y el comportamiento de cada sensor en función del tiempo se observa detalladamente durante el paso de una llanta del eje delantero sobre el sensor. Nótese que el sensor térmico de referencia no presenta variaciones significativas en torno de los 40°C . Las variaciones entre mediciones se deben al contacto irregular de la llanta con el sensor, y a variaciones de la carga durante el desplazamiento de la llanta produciendo en instantes muy pequeños valores de presión muy altos, al tener la carga aplicada en una pequeña zona. Por estas razones se consideran los valores promedio de las deformaciones registradas durante el intervalo de aplicación de la carga. De acuerdo a esto, se encuentran deformaciones de $64,3 \mu\epsilon$ para el SD1 y de $47,6 \mu\epsilon$ para el SD2. La longitud del sensor es de 10 cm, luego los desplazamientos promedio son aproximadamente de $6,4 \mu\text{m}$ para el SD1 y de $4,8 \mu\text{m}$ para el SD2.

6 Discusión

Los sensores FBG transducen deformaciones a compresión y a extensión, por lo que la disposición entre la carga y el sensor usada en este experimento no transduce directamente las deformaciones verticales inducidas en la superficie. Los valores obtenidos experimentalmente se relacionan con la deformación vertical en el esquema que se propone en la figura 5.

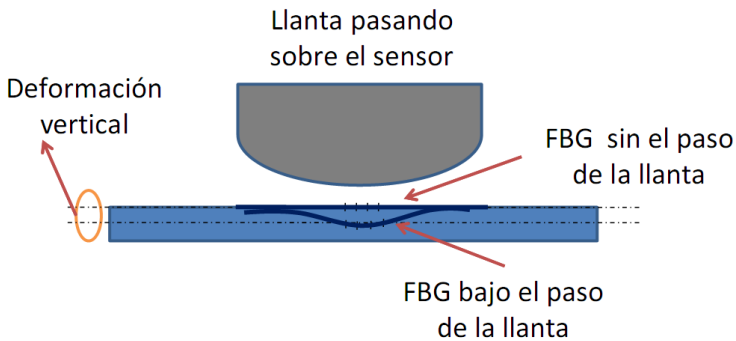


Figura 5: representación gráfica del paso de la llanta sobre el sensor FBG. La figura inserta muestra una ampliación en 6000x de la deformación en la superficie según la simulación con el MEF

Dada la curvatura inducida sobre el sensor por la aplicación de la presión, que se puede visualizar como un desplazamiento simétrico en los extremos de aplicación de la presión, en buena aproximación, la deformación medida por el sensor corresponde al doble de la deformación vertical generada por la llanta sobre la superficie. Bajo este criterio, los desplazamientos verticales en las zonas de sensado serán la mitad de las registradas por los sensores, es decir, $3,2 \mu\text{m}$ y $2,4 \mu\text{m}$, para la zona donde se ubica el SD1 el SD2 respectivamente. Comparando estos con los valores de la simulación numérica, que son un referente ideal (ver figura inserta en la 5), correspondientes a $3,7 \mu\text{m}$ y $2,8 \mu\text{m}$, se encuentra un error relativo inferior al 15%. Esos valores de deformación no están lejos de los encontrados en trabajos relacionados reportados en [9, 14].

7 Conclusiones

Se muestran la medición de desplazamientos verticales en una losa de concreto empleando sensores de fibra óptica de 10 cm adheridos a la superficie, y la relación de estas medidas con los resultados obtenidos por el método de elementos finitos. Se determina que, para el caso de esta prueba, existe una relación 1 : 2 entre las deformaciones verticales obtenidas por el MEF y deformaciones registradas por los sensores de FBG. Para trabajos futuros se propone determinar la relación de transducción para sensores superficiales de otros tamaños, como una posible alternativa para aumentar la sensibilidad, además verificar si se conserva la relación de transducción obtenida en este trabajo para cargas mayores de 10 kN. Se propone el uso de estos sensores como una alternativa para realizar monitoreo estructural en losas viales de concreto sin invasión de la estructura, para la identificación experimental de sobrecargas que causan un deterioro progresivo, identificación de daños superficiales y grietas, y la determinación temprana de zonas de fracturas mediante pruebas y ensayos usando sensores de fibra óptica.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado con fondos del Centro de Investigación del Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), Medellín-Colombia, proyecto Código P008207.

Referencias

- [1] F. A. Reyes. *Diseño racional de pavimento*, ISBN 978-9-5868-3622-7, Escuela Colombiana de Ingeniería y Pontificia Universidad Javeriana 2003. Referenciado en 36
- [2] E. Pinet, C. Hamel, B. Glišić, D. Inaudi and N. Miron. *Health monitoring with optical fiber sensors: from human body to civil structures*. Proceedings of SPIE, the International Society for optical Engineering, ISSN 0277-786X, San Diego, USA, **6532**, 549-561 (2007). Referenciado en 37
- [3] C. U. Grosse, C. Gehlen and S. D. Glaser. *Sensing methods in civil engineering for an efficient construction management*. Advances in Construction Materials, ISBN 978-3-5407-2448-3, Springer Berlin Heidelberg, 2007. Referenciado en 37

- [4] R. Liu, X. Chen, J. Li, L. Guo and A. J. Yu. *Evaluating innovative sensors and techniques for measuring traffic loads: final report*, Technical Report, Houston, USA, 2006. Referenciado en 37
- [5] P. Chaube, B. G. Colpitts, D. Jagannathan and A. W. Brown. *Distributed Fiber-Optic Sensor for Dynamic Strain Measurement*. IEEE Sensors Journal, ISSN 1530-437X, **8**(7), 1067-1072 (2008). Referenciado en 37, 38
- [6] S. Yin, P. B. Ruffin and F. T. S. Yu. *Fiber Optic Sensors*, second edition, ISBN 978-1-4200-5365-4, CRC Press, 2008. Referenciado en 37
- [7] P. Childs, A. C. L. Wong, W. Terry and G. D. Peng. *Measurement of crack formation in concrete using embedded optical fibre sensors and differential strain analysis*. Measurement science and technology, ISSN 0957-0233, **19**(6), pp. 065301 (2008). Referenciado en 37
- [8] Q. Li, G. Li, G. Wang and L. Yuanb. *CTOD measurement for cracks in concrete by fiber optic sensors*. Optics and Lasers in Engineering, ISSN 0143-8166, **42**(4), 377-388 (2004). Referenciado en 37
- [9] L. Yuan, Q. Li, Y. Liang, J. Yang and Z. Liu. *Fiber optic 2-d sensor for measuring the strain inside the concrete specimen*, Sensors and Actuators A: Physical, ISSN 0924-4247, **94**(1-2), 25-31 (2001). Referenciado en 37, 43
- [10] C. Spyarakos. *Finite Element Modeling In Engineering Practice*, ISBN 978-0-9641-9391-8, West Virginia University Press, 1994. Referenciado en 37
- [11] R. Chandwani, M. Wiehahn and C. Trimbell. *3D Fracture mechanics in ANSYS*, UK ANSYS conference, Warwickshire, UK, 2004. Referenciado en 37
- [12] Metroplús S. A., Web-Site: http://www.metroplus.gov.co/metroplus/index.php?sub_cat=0, 2009. Referenciado en 39
- [13] R. M. Mulungye, P. M. O. Owende and K. Mellon. *Finite element modelling of flexible pavements on soft soil subgrades*, Materials & Design, ISSN 0264-1275, **28**(3), 739-756 (2007). Referenciado en 39
- [14] M. Y. Darestani, D. P. Thambiratnam, A. Nataatmadja and D. Baweja. *Experimental study on structural response of rigid pavements under moving truck load*, Journal of transportation Engineering, ISSN 0733-947X, **133**(12), 670-676 (2007). Referenciado en 43