

Diseño de Sensores Ópticos Avanzados

basados en FBGs

Autor: Barrera Vilar, David

Director: Sales Maicas, Salvador

Resumen:

En el campo de la ingeniería civil para poder analizar la seguridad y fiabilidad de las construcciones se hace necesaria la monitorización de las mismas mediante dispositivos sensores que permitan un control continuo de aquellos parámetros que determinen la integridad estructural. Los principales parámetros que afectan a la seguridad de las estructuras corresponden a parámetros mecánicos, como cargas, tensiones y vibraciones y parámetros ambientales, tales como la temperatura, la humedad y el pH. Los sistemas de monitorización con sensores de fibra óptica es una tecnología que gracias a sus características puede obtener mayores prestaciones en comparación con los sensores eléctricos convencionales en la medida de estos parámetros. En este documento se presentan el desarrollo de distintos tipos de sensores ópticos realizado en el Grupo de Comunicaciones Ópticas y Cuánticas así como las líneas de investigación destinadas a solventar los principales inconvenientes de este tipo de sensores.

Abstract:

In the field of civil engineering in order to analyze the security and reliability of the constructions becomes necessary monitoring the structures by means of sensorial devices that allow a continuous control of those parameters that determine structural integrity. The main parameters that affect the security of the structures correspond to mechanical parameters, like loads, environmental tensions and vibrations and parameters, such as the temperature, the humidity and pH. The monitoring systems with optical fiber sensors are a technology that thanks to its characteristics can obtain greater benefits in comparison with the conventional electrical sensors in the measurement of these parameters. In this document we show the development of different types from optical sensors made in the Optical and Quantum Communications group as well as the lines of investigation destined to resolve the main disadvantages of this type of sensors.

Autor: David Barrera Vilar , email: dabarvi@iteam.upv.es

Director: Salvador Sales Maicas, email: ssales@dcom.upv.es

Fecha de entrega: 15-09-08

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| I. INTRODUCCIÓN..... | 3 |
| II. REDES DE DIFRACCIÓN DE BRAGG | 5 |
| III. SENSORES DE DEFORMACIÓN..... | 7 |
| III.1. Ensayos a tracción..... | 8 |
| III.2. Ensayos a compresión..... | 10 |
| III.3. Ensayos a flexotracción..... | 14 |
| IV. SENSORES DE TEMPERATURA..... | 15 |
| IV.1. Sensores ópticos de temperatura en equipos eléctricos..... | 17 |
| IV.2. Compensación de temperatura..... | 19 |
| V. SENSORES DE PH..... | 23 |
| VI. FIBRAS MULTIMODO | 30 |
| VII. ESTUDIO SOBRE FIBRAS ÓPTICAS DE PLÁSTICO | 30 |
| VII.1. Fibra PMMA..... | 34 |
| VII.2. Fibra PF..... | 37 |
| | |
| AGRADECIMIENTOS | 38 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 38 |
| ANEXOS..... | 40 |

I. Introducción

El deterioro de estructuras es un campo de investigación que últimamente está recibiendo una mayor atención. Las estructuras de hormigón, como puentes, túneles, presas, o edificios están sometidas a cambios físicos y químicos que pueden afectar la seguridad de éstas. Además los costes de mantenimiento de infraestructuras son tan altos que en algunos casos se dan situaciones en las que superan a los costes de inversión en nuevas construcciones. Este panorama hace que se haya incrementado el interés por el desarrollo de métodos que ayuden a reducir las operaciones de mantenimiento en las grandes estructuras. Estas operaciones de mantenimiento suelen consistir en inspecciones periódicas por un grupo de expertos que observan la estructura, analizan algunos componentes de la misma (normalmente caracterización destructiva) y determinan si es necesario reemplazar partes de la estructura o llevar a cabo reparaciones. Este proceso de inspección, sin embargo, suele ser muy localizado, costoso, lento y, en numerosas ocasiones, incompleto o ineficaz. Es por ello que para poder analizar la seguridad y fiabilidad de estas construcciones se hace necesaria la monitorización de las mismas mediante dispositivos sensores que permitan un control continuo, remoto y simultáneo de aquellos parámetros que determinen la integridad estructural. Los principales parámetros que afectan a la seguridad de las estructuras se puede dividir en dos bloques: El primero corresponde a los parámetros mecánicos de la estructura, como cargas, tensiones y vibraciones; El segundo de los bloques corresponde a los parámetros ambientales, tales como la temperatura, la humedad y el potencial de hidrógeno (pH). Ambos bloques están presentes en las estructuras y pueden causar daños permanentes en la estructura.

Los sistemas de monitorización con sensores de fibra óptica es una tecnología emergente en el campo de los sensores. Esta tecnología puede obtener mayores prestaciones en comparación con los sensores eléctricos convencionales en la medida de tensiones, temperatura, desplazamiento, presión, entre otros. Las ventajas más importantes que presentan los sensores de fibra óptica frente a los sensores convencionales son: la inmunidad frente a interferencias electromagnéticas; una mayor precisión y fiabilidad de las medidas; mayor estabilidad temporal; mayor resistencia a condiciones ambientales adversas y la posibilidad de multiplexación de la información procedente de los sensores. [1]

Entre los distintos tipos de sensores ópticos existentes unos de los más importantes son los basados en redes de difracción de Bragg (FBGs, del inglés Fiber Bragg Gratings).

En este documento se presentan los avances realizados en el Grupo de Comunicaciones Ópticas y Cuánticas (GCOQ) del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) de la Universidad Politécnica de Valencia en el desarrollo de sensores ópticos basados en FBGs para la medida de deformaciones, temperatura y pH y las medidas experimentales obtenidas. Parte de esta tesina se ha realizado en la Haute École Arc Ingénierie en la localidad de Le Locle, Suiza, con el apoyo del programa Erasmus del máster. El objetivo principal de esta estancia de seis meses de

duración ha sido la de adquirir los conocimientos necesarios para crear sensores ópticos basados en FBGs en fibras multimodo.

El trabajo de investigación realizado durante la tesina ha dado lugar a tres publicaciones en congresos y que están incluidos en la sección de anexos de esta tesina. Éstos son:

D. Barrera, R. García-Olcina, S. Sales, I. Gasch, S. Ivorra, E. Giménez, "Aplicación de sensores ópticos basados en redes de difracción de Bragg para la caracterización de materiales", 5ª Reunión Española de Optoelectrónica, ISBN 978-84-95809-30-8, p. 507-512, 11-13 Julio 2007, Bilbao, España.

Barrera, D, Lopez-Tendero, J, Esteve, J, et al. "Development of a multi-point multi-parametric sensor for structural health monitoring" International Conference on Sensor Technologies and Applications - SensorComm 2007. October 14-20, 2007, Valencia, Spain. 46-51 p.

Barrera, D, Lopez, M, Esteve-Taboada, J, et al. "Fiber Bragg Gratings for measuring pH and strain in Concrete Structures." Proceedings of SPIE--the international society for optical engineering Proceedings of SPIE. 7004(2008):700444-.

II. Redes de Difracción de Bragg

Una red de difracción es un dispositivo óptico que se crea al alterar, de forma periódica o cuasi-periódica, el índice de refracción del núcleo de una fibra óptica. Estas perturbaciones del índice de refracción son producidas por la exposición de la fibra óptica a un patrón de interferencia óptica intenso. La luz que se propaga por el interior de la fibra óptica se encuentra con múltiples discontinuidades en el medio que provocan que parte de la luz incidente sea transmitida y otra parte sea reflejada debido a las sucesivas reflexiones. En la Fig. 1 podemos observar el esquema básico de una red de difracción de Bragg, en ella se representa el núcleo de una fibra óptica y en distinto color las perturbaciones en el índice de refracción del núcleo producidas durante el proceso de fabricación.

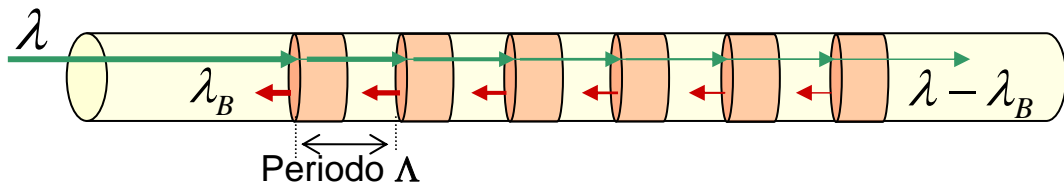


Fig.1. Esquema de una red de difracción.

Para redes de difracción de Bragg de periodo uniforme, la mayor interacción o acoplamiento entre modos, el incidente y el reflejado, se produce a la longitud de onda conocida como longitud de onda de Bragg, λ_B , que viene determinada por la ecuación (1), donde Λ es la separación física entre las perturbaciones creadas en el núcleo de la red de difracción o pitch y n_{eff} es el índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica. [2]

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

Tanto la separación espacial de las perturbaciones como el índice de refracción efectivo inducidas en el núcleo de la fibra óptica dependen a su vez de la temperatura y de la tensión mecánica en la fibra óptica. Esta dependencia con la temperatura y la tensión es la base para la aplicación de las redes de difracción como sensores de temperatura y deformación.

Derivando la expresión anterior en función de la deformación longitudinal y la temperatura se obtienen las expresiones que definen el comportamiento de las redes de difracción como sensores.

$$\Delta\lambda_B = \frac{\partial\lambda_B}{\partial\varepsilon}\varepsilon + \frac{\partial\lambda_B}{\partial T}\Delta T \quad (2)$$

$$\Delta\lambda_B = 2 \left[\left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial \varepsilon} \Lambda + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial \varepsilon} \right) \varepsilon + \left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \Lambda + n_{eff} \frac{\partial \Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \right] \quad (3)$$

Donde en la anterior ecuación, ε es la deformación unitaria aplicada sobre el sensor y ΔT es el incremento de temperatura. De la primera parte de la expresión anterior y teniendo en cuenta la relación indicada por la ecuación (4), donde los coeficientes p_{ij} son los coeficientes elasto-ópticos, que tienen en cuenta la variación del índice de refracción con la deformación, y ν que es el radio de Poisson. [3]

Y teniendo en cuenta también las ecuaciones constitutivas o ecuaciones de Lamé-Hooke, que son ecuaciones algebraicas y lineales que relacionan el valor de las componentes del tensor tensión con el valor del tensor deformación para un sólido lineal e isótropo:

$$\Delta n = \frac{n^3}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} - p_{12})] \Delta \varepsilon \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{1}{E} (\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})) & \varepsilon_{xy} &= \frac{(1+\nu)}{E} \sigma_{xy} \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{1}{E} (\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})) & \varepsilon_{yz} &= \frac{(1+\nu)}{E} \sigma_{yz} \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{1}{E} (\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{yy})) & \varepsilon_{xz} &= \frac{(1+\nu)}{E} \sigma_{xz} \end{aligned} \quad (5)$$

Se llega a la siguiente ecuación [4]

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left\{ \left[1 - \left(\frac{n^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right] \Delta \varepsilon + \left[\left(\frac{n^2}{2} \right) (p_{11} - 2p_{12}) \alpha + \frac{1}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right) \right] \Delta T \right\} \quad (6)$$

Donde α es el coeficiente de expansión térmica y $(\partial n / \partial T) / n$ representa la variación del índice de refracción efectivo debido a la variación de temperatura. Finalmente, se puede expresar la ecuación anterior mediante el uso de dos factores de sensibilidad, en principio de valores desconocidos y que posteriormente hallaremos, uno para la deformación mecánica de la FBG y otro para la deformación debida al incremento de temperatura.

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon \cdot \varepsilon + K_T \cdot \Delta T \quad (7)$$

III. Sensores de deformación.

Como se ha visto en la sección anterior, la longitud de onda del máximo acoplamiento entre los modos incidente y reflejado en una FBG se desplaza en función de las deformaciones mecánicas y la temperatura en la FBG, esta propiedad se utiliza para implementar los distintos tipos de sensores que veremos.

Para monitorizar la variación de la longitud de onda del máximo se ha utilizado el siguiente montaje experimental.

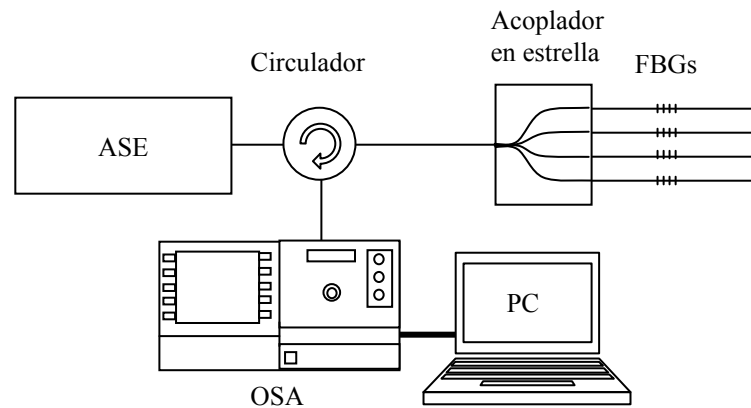


Fig.2. Montaje para la monitorización de sensores ópticos basados en FBGs.

En este montaje se utiliza una fuente de luz de banda ancha de tipo ASE (Amplified Spontaneous Emission) con espectro en las bandas C y L (1500 - 1600 nm), un analizador de espectros ópticos (OSA), un acoplador en estrella, que distribuye la señal óptica a múltiples sensores, y un circulador óptico, que separa espacialmente la luz incidente y la reflejada. Un PC es el encargado de controlar el analizador de espectros ópticos, almacenar la información procedente de los distintos sensores y representarla adecuadamente.

En primer lugar, para poder emplear las FBGs como sensores de deformación es necesario obtener el valor del factor de sensibilidad en deformación de la ecuación (7). Para ello se preparan las FBGs y se colocan con los extremos sujetos a un sistema de posicionamiento de precisión. Uno de los dos extremos de la fibra óptica se adhiere a una plataforma fija, mientras que el otro extremo se sujeta a una plataforma móvil que permite desplazamientos de precisión de 10 micrómetros. Una vez colocada la FBG se procede a aplicar deformaciones controladas en pasos de 10 μm , monitorizando las variaciones de longitud de onda. Si se representa la variación de la longitud de onda respecto a la deformación por unidad de longitud, Fig. 4, vemos como el desplazamiento de la longitud de onda del máximo de reflectividad tiene una dependencia lineal con la deformación. El valor del coeficiente de sensibilidad en deformación de la FBG se obtiene como la pendiente de esta la recta, obteniéndose un valor de 1.15 $\text{pm}/(\mu\text{m}/\text{m})$.

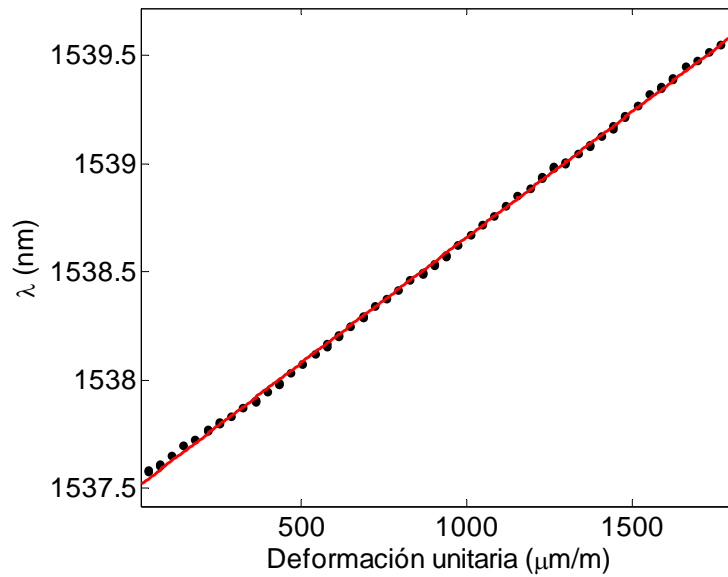


Fig.4. Obtención del valor de la constante de sensibilidad para los sensores de deformación.

Los sensores de deformación, desarrollados en colaboración con el Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH), tienen como objetivo la monitorización de las deformaciones en materiales usados en la construcción, como el hormigón o el acero, con el fin de detectar posibles problemas en estructuras, debidos al deterioro producido por el uso continuado de las mismas o por sobrecargas, que pudieran afectar a la seguridad de las mismas. Con el objetivo de comprobar la capacidad de los sensores desarrollados para este fin se han realizado una serie de pruebas a tracción, a compresión y pruebas a flexotracción sobre diversos tipos de materiales utilizados comúnmente en obra civil, como son el hormigón y el acero. Para comprobar el correcto funcionamiento de los sensores para medir las deformaciones en este tipo de materiales se han empleado, junto a los sensores de deformación, galgas extensiométricas, utilizadas comúnmente en este tipo de ensayos.

III.1. Ensayos a tracción.

Para comprobar el funcionamiento de los sensores de deformación se situaron los sensores en varias probetas de acero que fueron sometidas a ensayos de tracción. Estos ensayos se realizaron en el laboratorio del Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad Politécnica de Valencia. Para ello se utilizó una máquina tipo Universal de ensayos a tracción y compresión para todo tipo de materiales, con utillajes para ensayos de alambres. La carga máxima de ensayo es de 10 T. Para monitorizar la deformación de estas probetas se colocó un sensor óptico y una galga extensiométrica en el centro de las probetas en caras opuestas, de forma que midan la misma deformación. Las dimensiones de las probetas y la colocación de los

sensores óptico y eléctrico se pueden observar en la Fig. 5. En la Fig. 6 se muestra la colocación de las probetas en la máquina de ensayos.

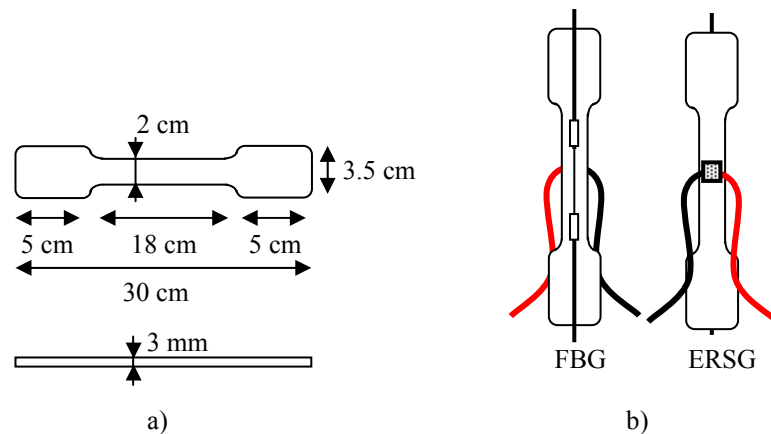


Fig.5. a) Dimensiones de las probetas de acero. b) Colocación de los sensores.

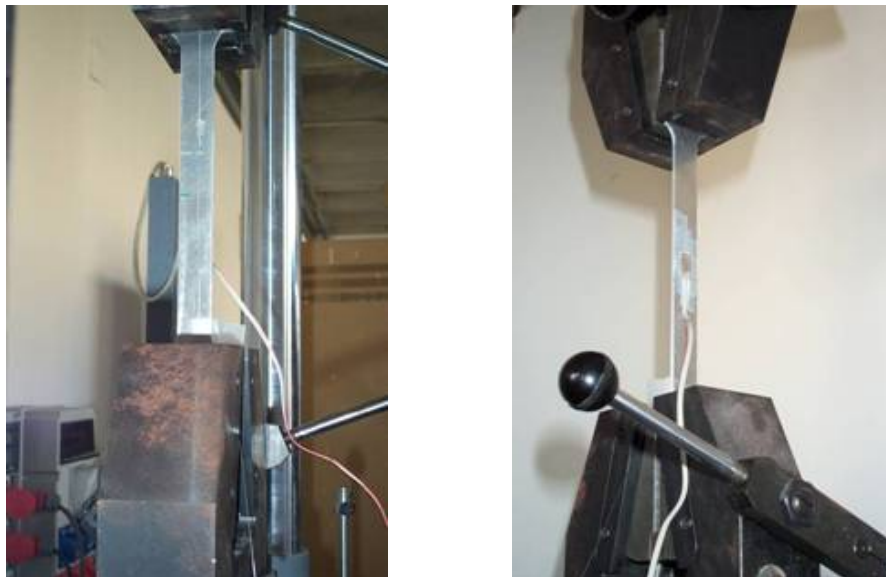


Fig.6. Fotografías de los ensayos a tracción.

En la Fig. 7 se puede ver en los resultados obtenidos en estos ensayos. En las deformaciones medidas por ambos tipos de sensores, ópticos y eléctricos, son coincidentes en los dos ensayos realizados. A partir de estos ensayos se puede obtener el módulo de elasticidad de las probetas de acero, que en el primer ensayo el módulo de elasticidad que se deriva de los datos de la galga extensométrica es de 219.400 N/mm² mientras que con el sensor óptico es de 222.100 N/mm². En el segundo ensayo la galga extensométrica proporciona un módulo de elasticidad de 217.900N/mm² y el sensor óptico de 221.300N/mm², lo que en ambos casos supone una diferencia del 1% entre ambos sensores.

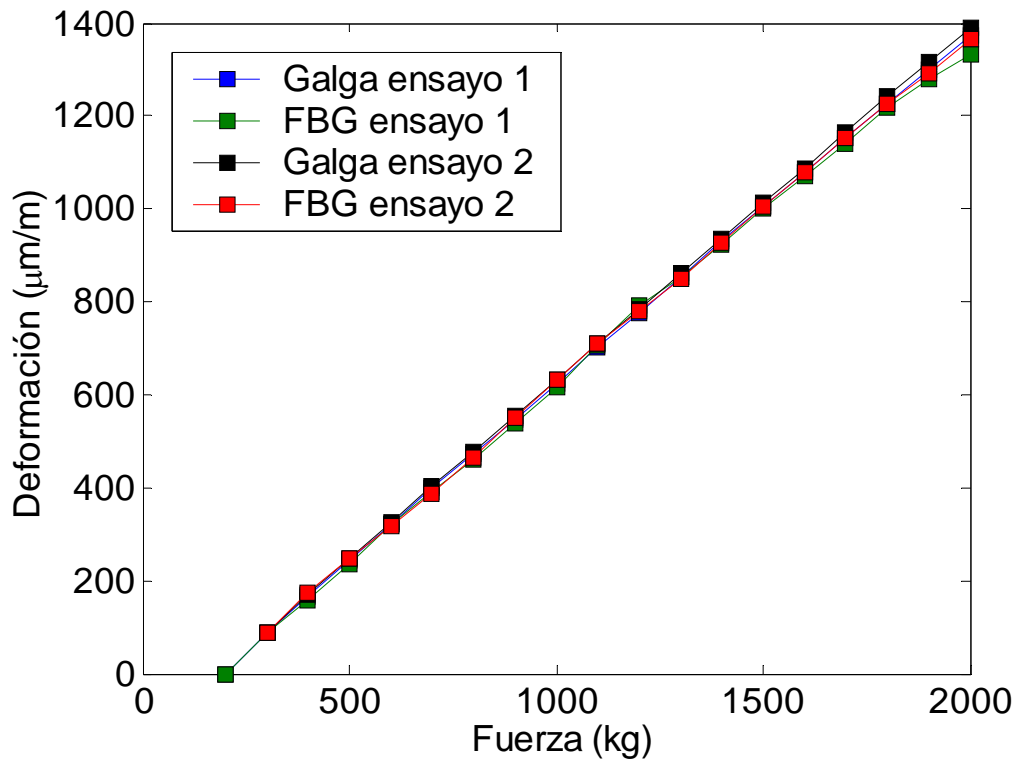


Fig.7. Resultados de los ensayos a tracción con probetas de acero.

III.2. Ensayos a compresión.

En segundo lugar mostraremos los ensayos realizados a compresión en probetas de hormigón cilíndricas. Estas pruebas tuvieron lugar en el laboratorio del Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia. Se utilizó una prensa para ensayar elementos a compresión. El sistema de control es manual y es posible alcanzar una carga máxima de 250 T. La prensa está conectada a un equipo informático que permite almacenar la carga y las medidas en cada instante. Para este tipo de probetas se colocaron 3 sensores ópticos y otras tres galgas extensiométricas para hormigón. Los sensores se colocaron longitudinalmente y distribuidos alrededor de la probeta situados por parejas de los dos tipos de sensores, de forma que se pudiera calcular el módulo elástico. Las dimensiones de las probetas así como la colocación de los distintos sensores se puede observar en la Fig. 8.

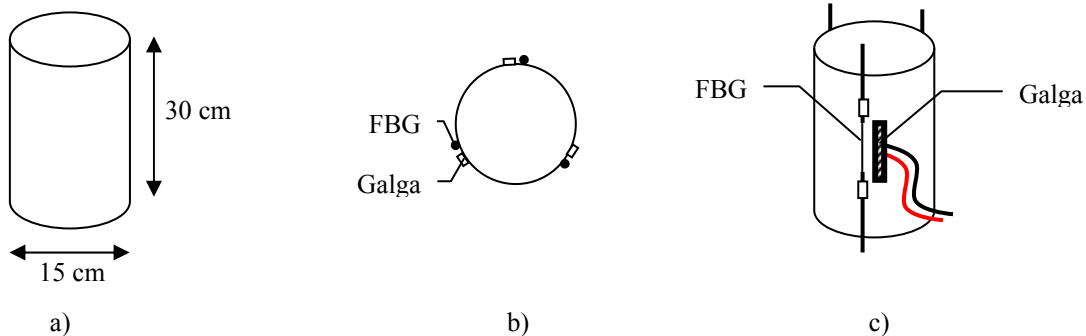


Fig.8. a) Dimensiones de las probetas cilíndricas de hormigón. b) y c) Colocación de los sensores.



En la Fig. 9 se representan los resultados obtenidos por las galgas extensiométricas para uno de los ensayos realizados.

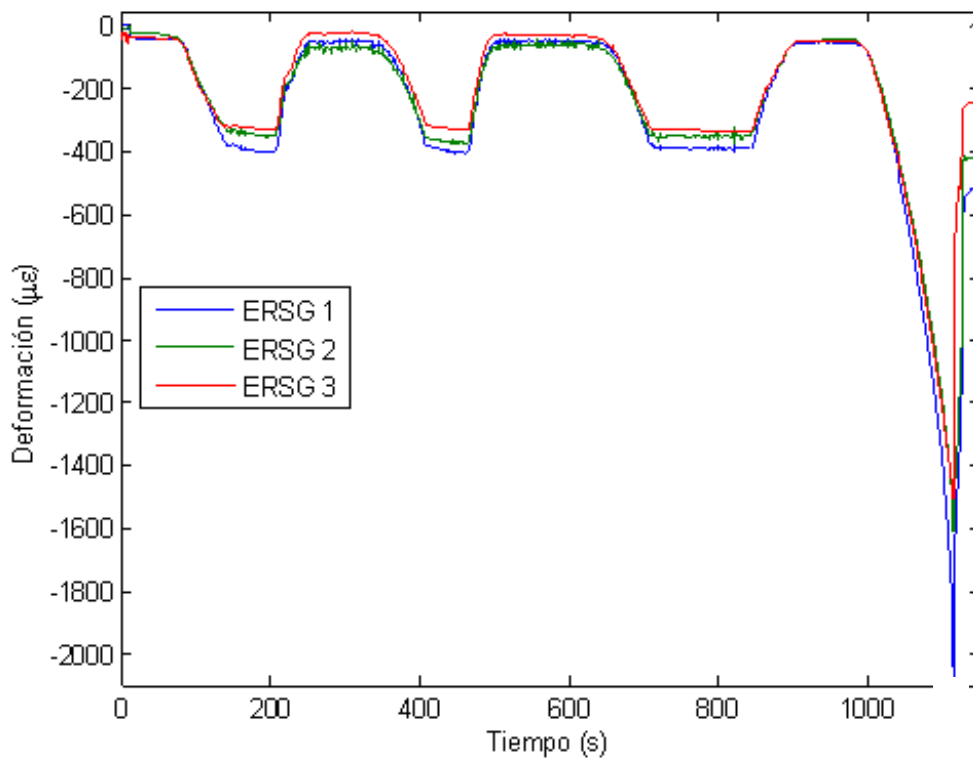


Fig.9. Resultados de las galgas extensiométricas.

En la Fig. 10 representan los resultados obtenidos por los sensores ópticos. La representación temporal muestra los ciclos de carga y descarga realizados durante este tipo de ensayos, además, también se puede observar el momento de la rotura de las probetas de hormigón tras el cuarto ciclo de carga. Finalmente en la Fig. 11 se representa una comparación entre una pareja de sensores colocados en posiciones muy próximas. Esta comparación muestra la gran coincidencia en los

resultados obtenidos por las galgas extensiométricas y los sensores ópticos. Esta misma coincidencia se da en las demás parejas de sensores, si bien no se han representado por no aportar mayor información a la que aporta una de ellas. Esto no sucede lo mismo entre sensores en distintas posiciones de la probeta, como puede observarse en la Fig. 9 y la Fig. 10, que muestran ligeras variaciones entre sensores del mismo tipo debido a las inhomogeneidades propias del hormigón y una distribución de carga no uniforme sobre la superficie de la probeta.

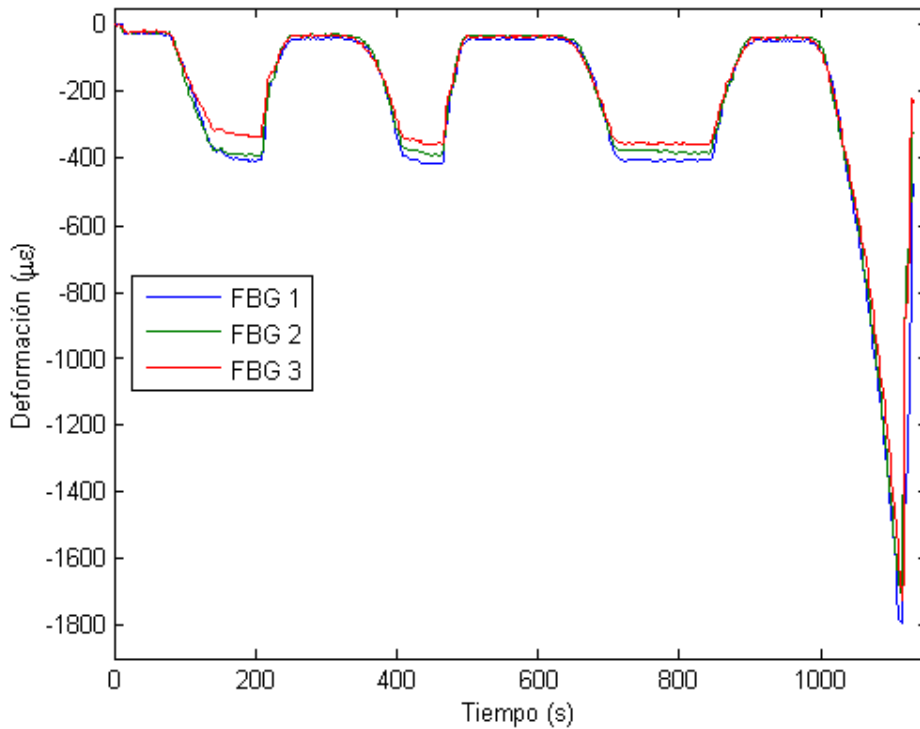


Fig.10. Resultados de los sensores ópticos.

A partir de estos ensayos se obtiene la curva de tensión-deformación, de la que obtenemos el módulo elástico y que está representada en la Fig. 12, para los datos procedentes de los sensores ópticos en los dos ensayos realizados. El módulo de elasticidad a partir de los datos de los sensores ópticos fue de 24.640 N/mm² y de 25.200 N/mm² en cada uno de los dos ensayos realizados, y de 25.300 N/mm² y 25.800 N/mm² respectivamente a partir de los datos de las galgas extensiométricas. Lo que supone una diferencia inferior al 3 %, lo que en un medio inhomogéneo como el hormigón son unos excelentes resultados.

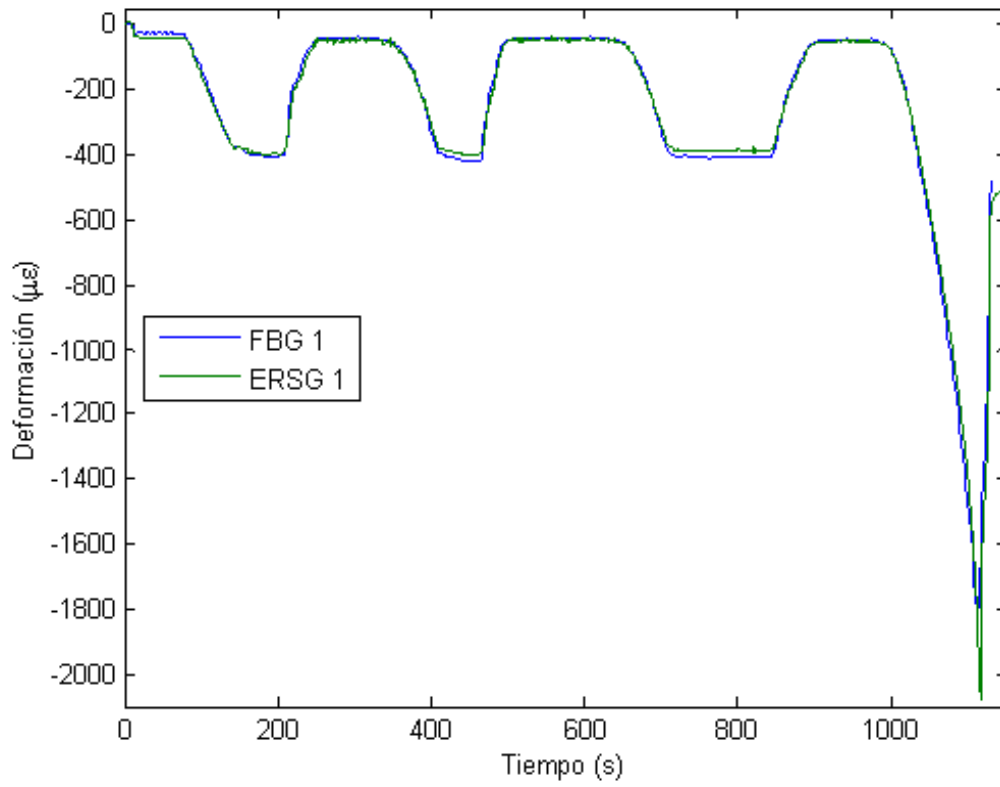


Fig.11. Comparación de entre las galgas extensiométricas y los sensores ópticos.

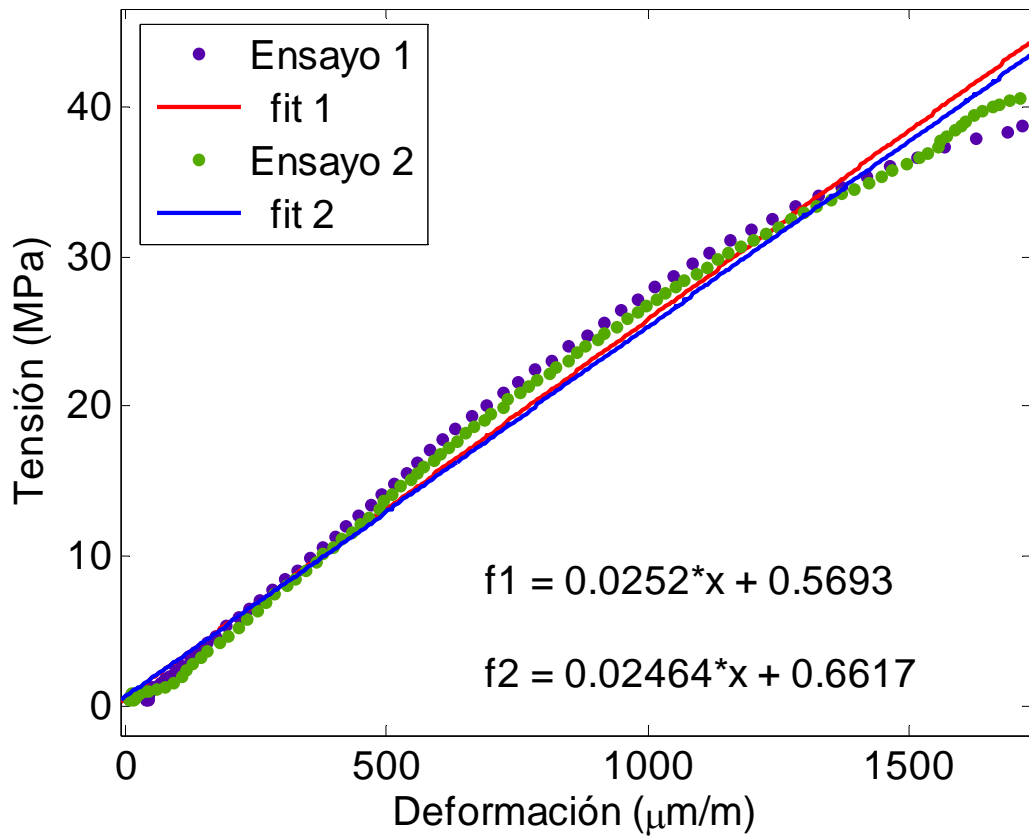


Fig.12. Obtención del módulo elástico para las probetas cilíndricas de hormigón.

III.3. Ensayos a flexotracción.

El último tipo de ensayo que mostramos para los sensores de deformación es un ensayo a flexotracción con probetas de hormigón rectangulares. Estas pruebas al igual que las anteriores se realizaron en el laboratorio del Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia. Este tipo de ensayo consiste en aplicar una fuerza lateral sobre las probetas apoyadas sobre dos puntos en los extremos de las mismas, tal como se ve en la Fig. 12. Se puede observar en este esquema como en este tipo de ensayos la parte superior de la probeta se comprime, mientras la parte inferior de la misma es sometida a tracción. En esta prueba por tanto se combina tanto los ensayos a tracción como los de compresión.

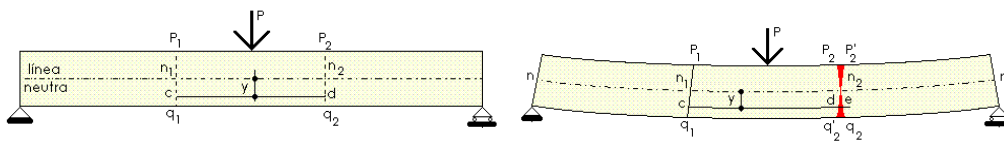


Fig.12. Descripción de los ensayos a flexotracción.

Los sensores se colocaron en las caras laterales de la probeta y próximas al borde superior e inferior para que midan mayores deformaciones y compresiones, tal como puede verse en la Fig. 13.

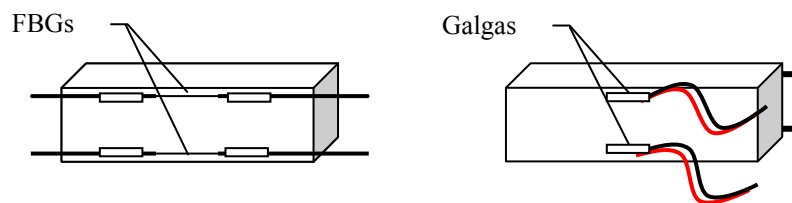


Fig.13. Colocación de las galgas extensiométricas y los sensores ópticos.



Fig.14. Imagen de los ensayos a flexotracción sobre probetas de hormigón.

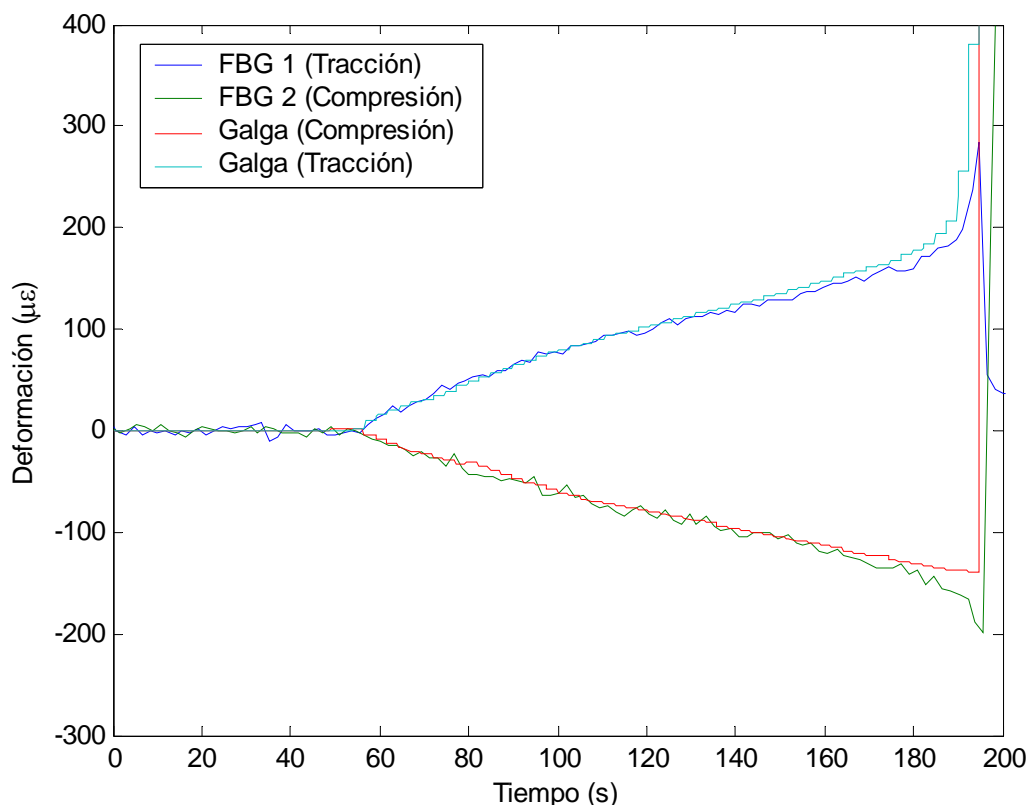


Fig.15. Resultados obtenidos en los ensayos a flexotracción.

Los resultados en estos ensayos muestran, al igual que en los anteriores ensayos, una gran coincidencia entre las galgas extensiométricas y los sensores ópticos. Además es de resaltar que en este tipo de ensayos las galgas, por su mayor superficie a deformaciones próximas a la rotura de la probeta se despegan de esta, provocando derivas en los resultados que el sensor óptico no experimenta.

IV. Sensores de temperatura

El segundo tipo de sensores que vamos a mostrar son los sensores de temperatura. Este tipo de sensores, junto a los sensores de deformación son los más habituales en la literatura, ya que al igual que en el caso de los sensores de deformación, las FBGs son sensibles a este parámetro físico.

En este apartado veremos la caracterización de las FBGs para actuar como sensores de temperatura y veremos los resultados obtenidos en la aplicación en generadores eléctricos. Asimismo, este tipo de sensores cobra también gran importancia en combinación con los sensores de deformación u otros tipos de sensores basados en FBGs y que utilicen el desplazamiento de la longitud de onda de Bragg como base para las medidas. Esto se debe a la doble sensibilidad deformación-temperatura propia de las FBGs y que en aplicaciones donde las variaciones de temperatura son importantes son imprescindibles para distinguir ambos efectos, por ello se ha comprobado la compensación de este efecto con los sensores de deformación.

Como en el caso de los sensores de deformación, los sensores de temperatura deben caracterizarse. La sensibilidad de las FBGs cambia en función de múltiples parámetros, desde el material para fabricar la fibra óptica hasta el recubrimiento de ésta, entre otros. Para ello se ha utilizado una cámara climática capaz de programar ciclos de temperatura entre -20 y 120 °C además de controlar la humedad en su interior.

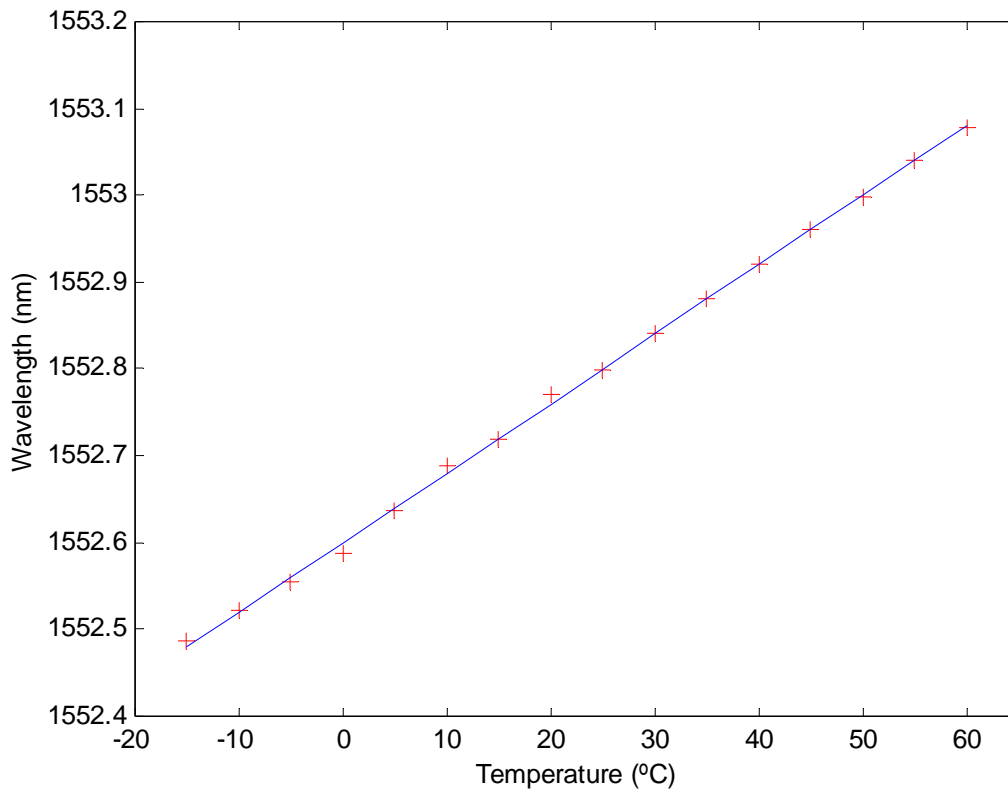


Fig.16. Variación de la longitud de onda reflejada por la FBG en función de la temperatura.

En la figura 16 se observa la variación en longitud de onda reflejada por la FBG en función de la temperatura en el interior de la cámara climática. Como se puede observar el comportamiento es lineal y se deduce que la sensibilidad de la FBG en temperatura es de 8.12 pm/°C. Por otra parte en la siguiente figura se observa la evolución temporal de la temperatura en el interior de la cámara climática programada para obtener rampas ascendentes y descendentes de temperatura entre -10 y 100 °C durante cerca de 30 horas. En la gráfica se representa la medida del termopar de la cámara climática y la temperatura medida mediante la FBG.

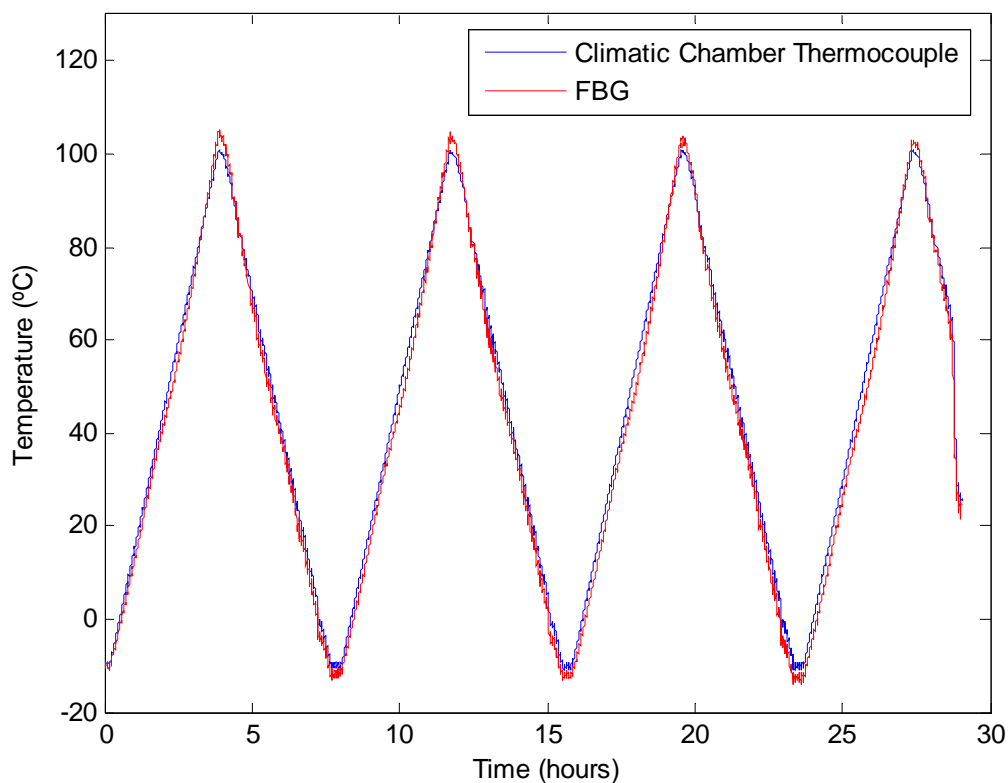


Fig.17. Evolución temporal de la temperatura en el interior de la cámara climática.

Los sensores ópticos de temperatura son particularmente adecuados para competir con termopares y termistores, que presentan el inconveniente de ser eléctricamente activos, y por ello inapropiados para determinadas aplicaciones donde el uso de energía eléctrica supone un riesgo de incendio o explosión, así como en ambientes corrosivos, donde los sensores metálicos se degradan rápidamente. Los sensores de temperatura convencionales pueden responder a perturbaciones en los campos magnéticos incidentes y conducir a puntos de calentamiento localizados allí donde existen campos eléctricos o magnéticos intensos. Los sensores ópticos son inmunes a interferencias electromagnéticas, por lo que resultan apropiados para su instalación en generadores eléctricos, turbinas y otros entornos eléctricos.

IV.1. Sensores ópticos de temperatura en equipos eléctricos.

Conocer la distribución de temperatura en equipos de alta tensión, tales como generadores o transformadores, es esencial para entender su funcionamiento. Mediante una monitorización continuada de las variaciones de temperatura en puntos críticos (hot spots) se pueden detectar equipos defectuosos o dañados, ya que esta temperatura refleja la eficiencia del sistema de refrigeración. Además, un fallo por sobrecarga tiene consecuencias económicamente muy costosas, por lo que si no se dispone de métodos rigurosos para la medida de temperatura en el interior de los generadores se opera muy por debajo de la potencia límite. Un conocimiento preciso de su

temperatura permite que se pueda operar a la potencia límite en casos de elevada demanda de energía. En la mayor parte de hot spots no se pueden utilizar sensores de temperatura convencionales, ya que durante la operación normal de un generador de potencia se pueden alcanzar tensiones del orden de 15kV. Además, debido a las ajustadas dimensiones de las ranuras, la elección de los sensores se limita al de menor tamaño posible.

Para comprobar la viabilidad de utilizar los sensores ópticos en este tipo de equipos, se ha llevado a cabo distintas medidas donde se ha utilizado un resistor de potencia. Se ha colocado sobre él tanto sensores eléctricos como sensores ópticos en distintos puntos y se le ha aplicado una tensión continua.

En la Fig. 18 se observa la colocación de los sensores sobre el resistor de potencia. Los sensores ópticos se han colocado de forma que la dilatación del metal del resistor no deforme las FBG, de este modo se evita que se puedan producir deformaciones que contribuyan al desplazamiento en longitud de onda, y que en ese caso distorsione las medidas.

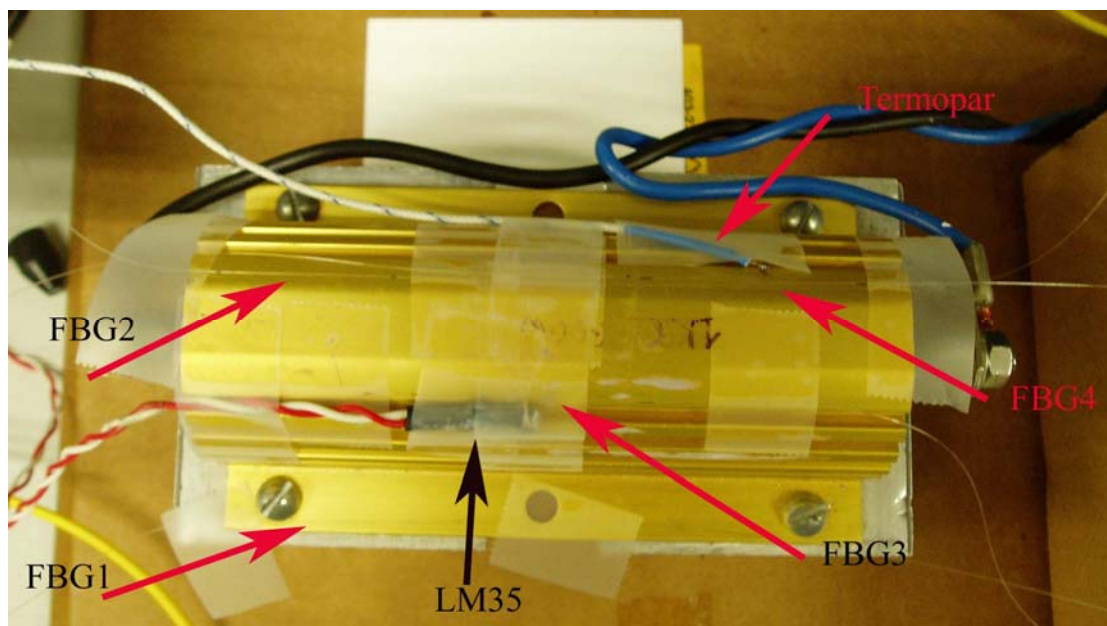


Fig.18. Ubicación de los sensores de temperatura en la resistencia de potencia.

Al aplicar una tensión continua de 350 V el resistor de potencia se calienta rápidamente. En la Fig. 19 se observa la evolución temporal de los sensores colocados en la superficie del resistor.

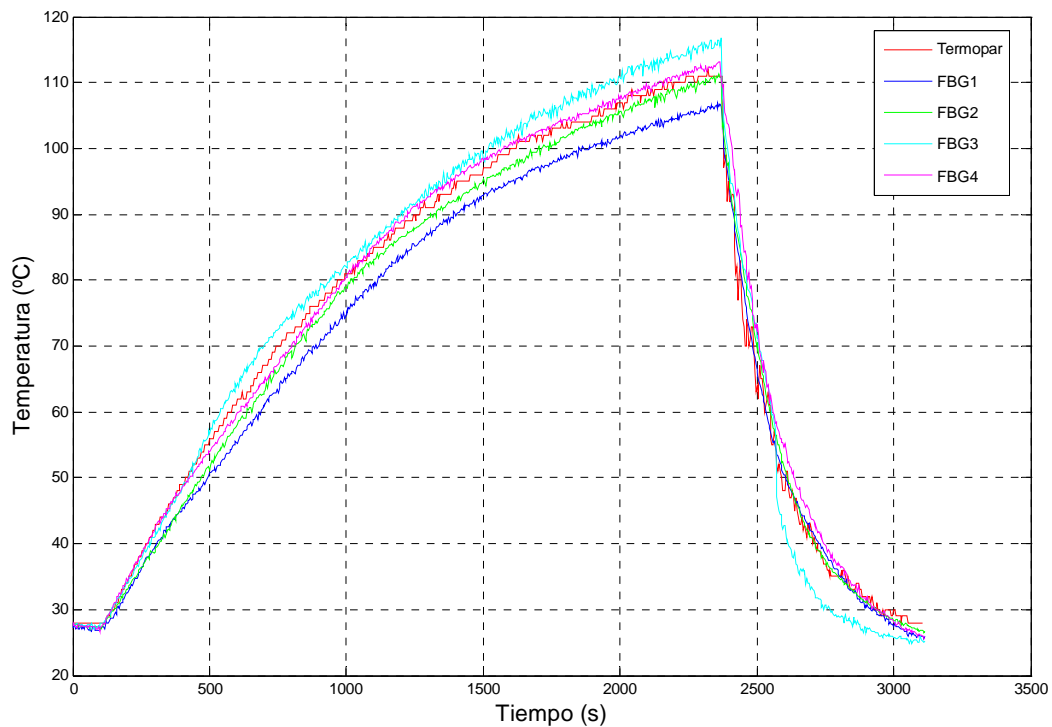


Fig.19. Evolución temporal de la temperatura en distintos puntos de la superficie del resistor.

Se puede observar una gran correlación en las medidas, teniendo en cuenta que los distintos sensores ópticos no están colocados en la misma posición en la superficie del resistor, y que por tanto la temperatura en la superficie varía ligeramente entre unos y otros. Un ejemplo de esto si analizamos los resultados obtenidos en función de su ubicación en el resistor. Así, la FBG 1, que es la situada sobre la superficie del resistor pero justo al lado del disipador, presenta una temperatura siempre inferior que la medida por los otros sensores. También las FBG 2 y 4, que son las situadas en la parte superior del resistor, pero en los extremos, presentan en todo momento valores de temperatura muy similares, y casi idéntica a la temperatura medida por el termopar. En el caso de la FBG 3, que es la situada en el centro del resistor de potencia, presenta la temperatura más elevada de todas.

IV.2. Compensación de temperatura.

Debido a la doble sensibilidad de las FBGs a deformación y temperatura otra de las funciones más importantes de los sensores de temperatura es la de compensar los efectos de la temperatura en otros sensores ópticos basados en FBGs. Hasta ahora las pruebas experimentales que se han mostrado se han realizado en ambientes controlados, donde las variaciones de temperatura no son importantes durante el periodo de tiempo que duran los ensayos. De esta manera no es necesaria la compensación de temperatura, pero este no es el caso para aplicaciones reales donde los sensores pueden estar expuestos a grandes ciclos de temperatura ambiente y por ello es necesario comprobar

que es posible compensar los efectos de la temperatura sobre los sensores en estas situaciones. Para comprobar la validez de los sensores en estas situaciones se han probado los sensores de deformación en un pilar de acero de un puente grúa en el laboratorio del Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad Politécnica de Valencia. Se colocaron 2 sensores de deformación y otros dos sensores de temperatura, uno de cada tipo en caras opuestas del pilar de acero, de forma que una pareja estuviese expuesta al sol por el día y la otra a la sombra y observar así las diferencias entre ellos. Junto a los sensores ópticos se coloca un termopar para obtener una referencia en la temperatura. Sobre el puente grúa no se ejerce ninguna fuerza durante el ensayo de tal forma que la deformación que deberíamos detectar sería nula y el único efecto a compensar es la temperatura. En la Fig. 20 se muestra los resultados obtenidos para la pareja situada a la sombra. La escala vertical está representada en temperatura para poder comparar la respuesta del sensor de deformación con la del sensor de temperatura. De este modo se halla una nueva sensibilidad en temperatura para el sensor de deformación. La sensibilidad en temperatura para el sensor de deformación en acero es de $19.76 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, que es mucho mayor a la obtenida para el sensor de temperatura de $8.12 \text{ pm}/^\circ\text{C}$. Esto es debido a que el sensor de deformación se deforma con la temperatura de la misma forma que la estructura a la que se adhiere, adquiriendo las propiedades de ésta. Y el hecho de que el coeficiente de dilatación lineal del acero sea mucho mayor que el de la fibra óptica hace que el factor de sensibilidad del sensor sea mucho mayor.

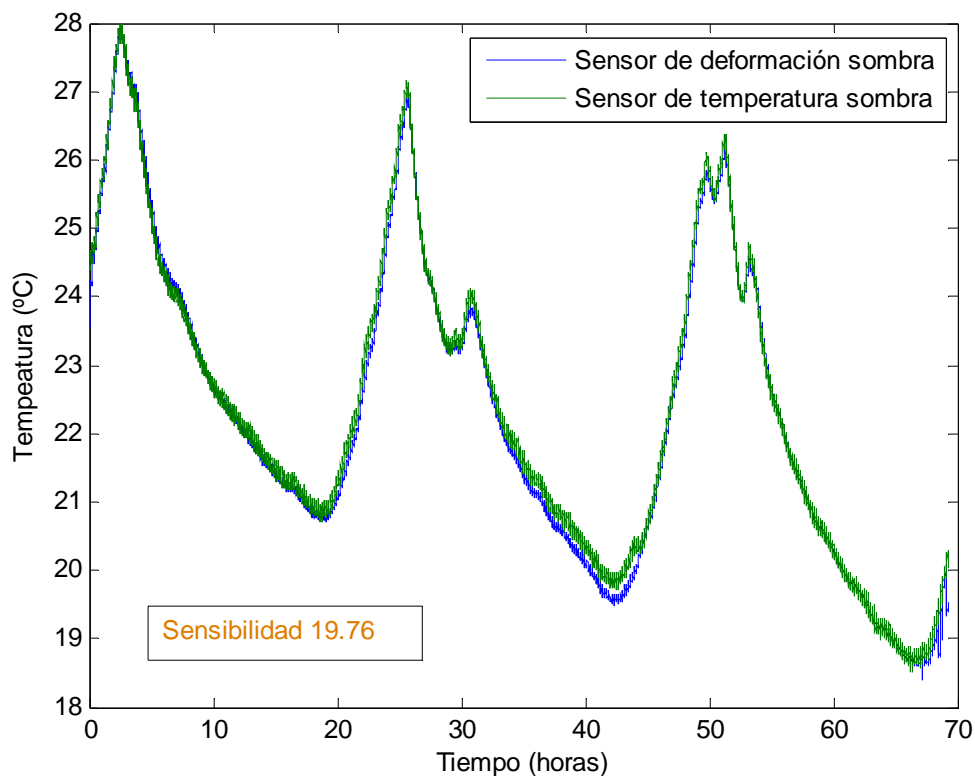


Fig.20. Evolución temporal de la temperatura para los sensores en la sombra.

En este caso, puesto que los sensores de deformación y temperatura no tienen la misma sensibilidad, para poder compensar el efecto de ésta sobre el sensor de deformación se ha de tener en cuenta las siguientes relaciones.

La variación en longitud de onda debida únicamente a la deformación en el sensor de deformación, que designaremos como $\Delta\lambda_{\text{def}}|_{\text{def}}$, el segundo subíndice representa el sensor, es la variación en longitud de onda debida conjuntamente a la temperatura y a la deformación, $\Delta\lambda_{\text{def+temp}}|_{\text{def}}$, menos la variación en longitud de onda debida únicamente al incremento de la temperatura $\Delta\lambda_{\text{temp}}|_{\text{def}}$, por tanto

$$\Delta\lambda_{\text{def}}|_{\text{def}} = \Delta\lambda_{\text{def+temp}}|_{\text{def}} - \Delta\lambda_{\text{temp}}|_{\text{def}} \quad (8)$$

Teniendo en cuenta que la variación de la longitud de onda del sensor de deformación con la temperatura es igual al aumento de temperatura por la sensibilidad del sensor de deformación a la temperatura tenemos que

$$\Delta\lambda_{\text{temp}}|_{\text{def}} = T(^{\circ}\text{C}) \cdot K_T|_{\text{def}} (pm/^{\circ}\text{C}) \quad (9)$$

Y teniendo en cuenta que la temperatura en el sensor de deformación la hayamos mediante el sensor de temperatura dividido el factor de sensibilidad de temperatura de éste, $K_T|_{\text{Temp}}$, podemos expresar la variación de longitud de onda debida a temperatura en el sensor de deformación como

$$\Delta\lambda_{\text{temp}}|_{\text{def}} = \left[\frac{\Delta\lambda_{\text{temp}}|_{\text{Temp}} (pm)}{K_T|_{\text{Temp}} (pm/^{\circ}\text{C})} \right] \cdot K_T|_{\text{def}} (pm/^{\circ}\text{C}) \quad (10)$$

Finalmente podemos poner la expresión total para la compensación en longitud de onda del sensor de deformación como

$$\Delta\lambda_{\text{def}}|_{\text{def}} = \frac{\Delta\lambda_{\text{temp}}|_{\text{Temp}} (pm)}{K_T|_{\text{Temp}} (pm/^{\circ}\text{C})} \cdot K_T|_{\text{def}} (pm/^{\circ}\text{C}) - \Delta\lambda_{\text{temp}}|_{\text{def}} \quad (11)$$

Realizando estas operaciones la variación en longitud de onda en el sensor de deformación a la sombra, una vez compensada el efecto de la temperatura está representada en la Fig. 21. Como podemos observar la compensación sitúa la variación de la longitud de onda debida a deformación alrededor del cero. No obstante en la Fig. 21 se observa que en la compensación existe un error que tiene un comportamiento cíclico que coincide con los ciclos de subida y bajada de temperatura. Esto es debido a que aunque ambos sensores están próximos entre sí, para poder compensar los efectos de temperatura totalmente, es necesario que ambos sensores se encuentren exactamente en

las mismas condiciones. A pesar de esto, el error es inferior a $\pm 5 \mu\epsilon$ lo que en términos de deformación es prácticamente despreciable.

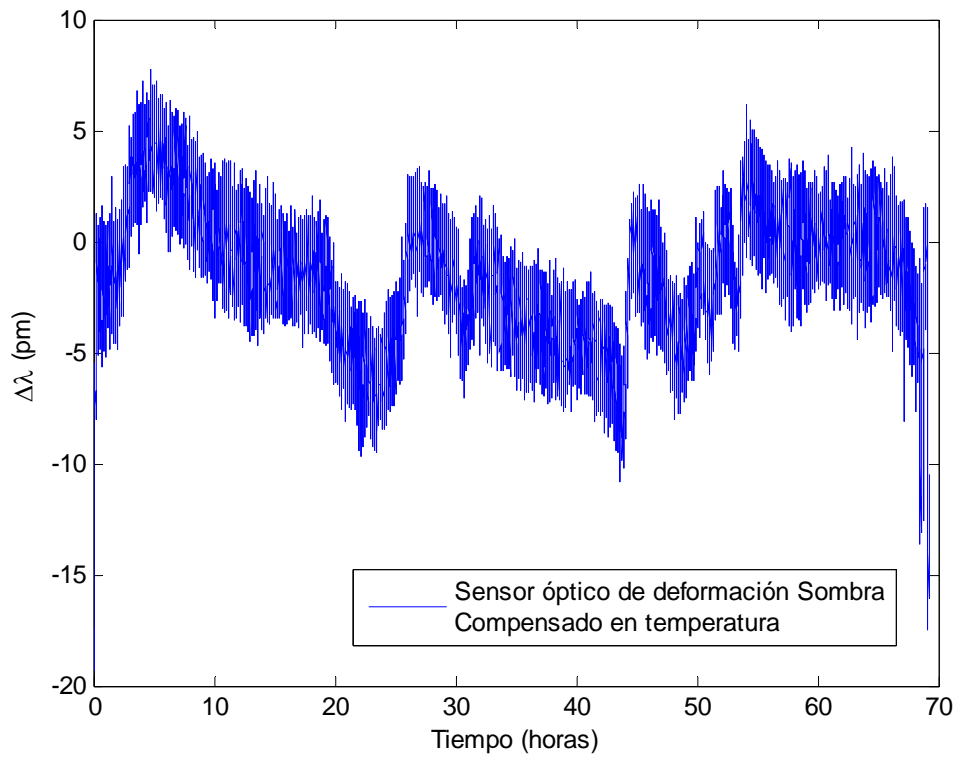


Fig.21. Compensación del efecto de la temperatura para el sensor de deformación en la sombra.

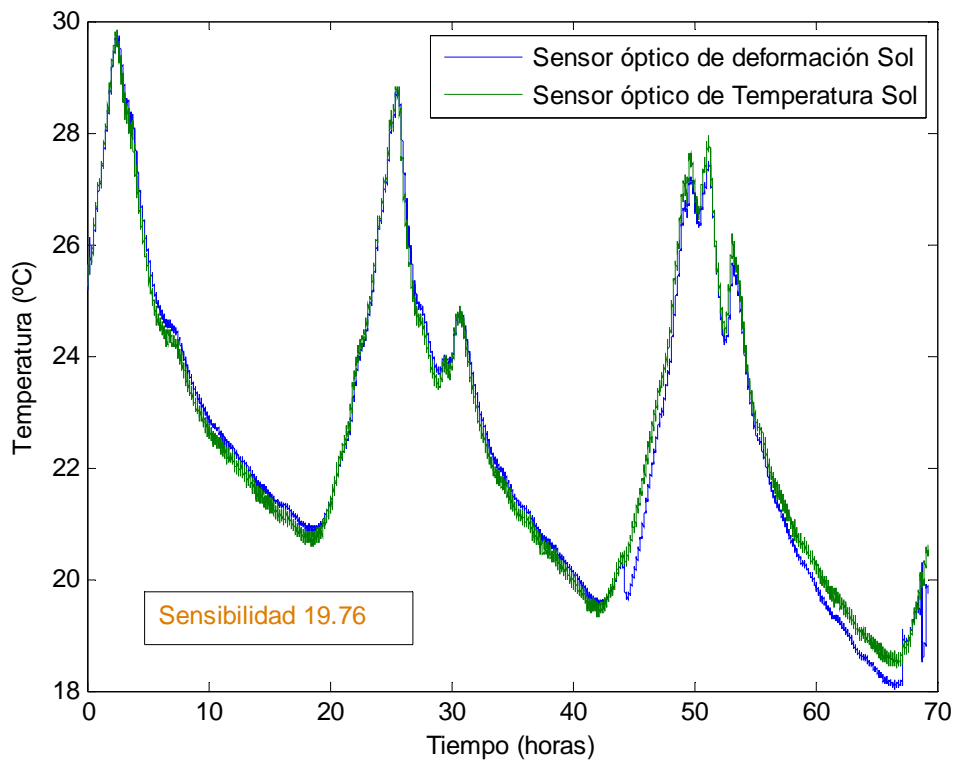


Fig.22. Evolución temporal de la temperatura para los sensores expuestos al sol.

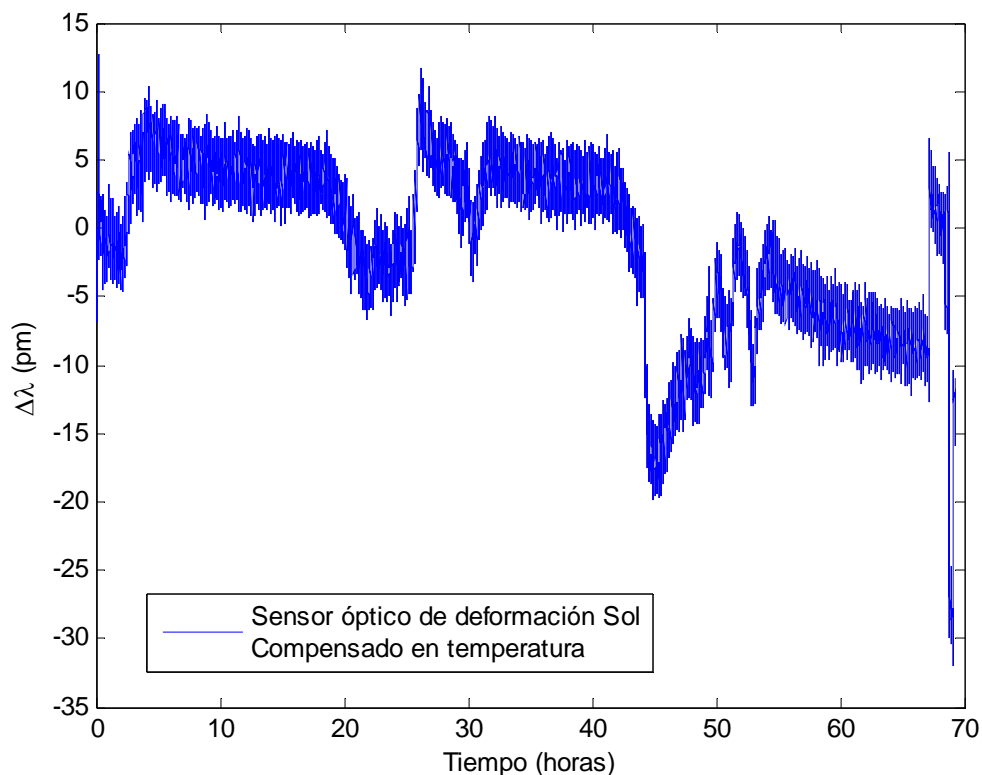


Fig.23. Compensación del efecto de la temperatura para el sensor de deformación expuesto al sol.

Para los sensores situados al sol, el comportamiento es muy similar a los que se situaron en la sombra, únicamente un error en el sensor de deformación alrededor de las 45 h de ensayo, debido a una deficiencia en el pegado del sensor al acero provoca que la compensación sea algo peor en este caso.

V. Sensores de pH

Hasta ahora se ha mostrado el desarrollo de sensores ópticos basados en FBGs para la medida de deformaciones y temperatura. En estos dos casos las FBGs son directamente sensibles a los parámetros físicos que se deseaban medir y no era necesario ningún elemento suplementario. En esta sección, sin embargo, veremos los avances realizados en el desarrollo de un sensor químico capaz de medir el potencial de hidrógeno (pH).

Las FBGs no son capaces de detectar cambios químicos por sí mismas. Por tanto este tipo de sensores es un claro ejemplo de las posibilidades de los sensores ópticos para la medida de otros parámetros, tanto físicos como químicos. En la literatura existen principalmente dos tipos de sensores ópticos para la medida del pH: los sensores ópticos de onda evanescente [5][6] y los basados en hidrogeles [7][8]. Los sensores ópticos de onda evanescente están formados por secciones de fibra óptica a la cual se le retira parte del cladding y que posteriormente se rodea de un material sensible a cambios en el pH. Al cambiar el pH se modifica el índice de refracción de

estos materiales que rodean el núcleo de la fibra óptica provocando una variación de la potencia óptica recibida. El otro tipo de sensores ópticos para la medida del pH es el uso de hidrogeles. Los hidrogeles son un conjunto de polímeros macromoleculares capaces de absorber agua y expandirse en medios acuosos sin disolverse. Tienen una gran capacidad de expansión, que puede llegar a ser del 30% en algunos tipos de hidrogeles. En la Fig. 24 se observa un hidrogel de Agarosa deshidratado, a la izquierda, y el mismo hidrogel hidratado, a la derecha. Se observa claramente el cambio de volumen.



Fig.24. Cambio de volumen en el hidrogel.

Las propiedades de los hidrogeles dependen en gran medida de su formulación, existiendo hidrogeles sensibles a un gran número de factores, como humedad, salinidad, entre otros [9][10]. La capacidad de los hidrogeles para dilatarse o contraerse puede utilizarse para el desarrollo de sensores ópticos para la monitorización de múltiples parámetros, integrando de forma adecuada la FBG con el hidrogel.

Dentro de los sensores de pH basados en el uso de los hidrogeles existen dos posibilidades: Que el cambio de volumen desplace la longitud de onda de Bragg de la FBG; O que el cambio de volumen cambie la potencia óptica reflejada por la FBG. Ambas soluciones tienen ventajas e inconvenientes. Actuar sobre la longitud de onda de la FBG tiene como principales ventajas que la longitud de onda es una magnitud absoluta y que no depende de la configuración de la red de sensores. Uno de los principales inconvenientes es la dependencia del desplazamiento de la longitud de onda con la temperatura, lo que en condiciones donde las variaciones de temperatura sean importantes hace necesario el uso de métodos para distinguir y compensar este efecto, por ejemplo usando un sensor de temperatura adicional. El otro inconveniente que presenta el uso de la longitud de onda es que la FBG necesita encontrarse físicamente en el propio sensor, lo que supone

una mayor exposición de la FBG a impactos mecánicos y a agentes externos que puedan dañarla, por lo que hace necesario el uso de mejores sistemas de protección. Por otro lado, actuar sobre la potencia óptica reflejada por la FBG tiene como principales inconvenientes la dependencia de la configuración de la red de sensores y la medida relativa que es la potencia óptica reflejada. Las principales ventajas de la medida de la potencia óptica reflejada es la mayor sencillez a la hora de monitorizar los cambios en el sensor y la mayor protección de la FBG, ya que en este caso la FBG actúa como un reflector selectivo en longitud de onda y no es necesario que se encuentre ubicado físicamente en el lugar de la medida.

El desarrollo del sensor de pH que se presenta se realiza en colaboración con el Instituto de Óptica, Color e Imagen (AIDO) y el Instituto de Tecnología de la Construcción (AIDICO) dentro de un proyecto para el desarrollo de un sensor multiparamétrico capaz de medir deformaciones, temperaturas, pH y humedad en el interior de estructuras de hormigón.

El desarrollo del sensor multiparamétrico agrupa distintos tipos de sensores basados en redes de difracción y los combina de forma óptima. Los sensores de deformación y temperatura son iguales a los mostrados en las anteriores secciones. De esta forma, mientras los sensores de deformación y temperatura basan las medidas en el desplazamiento de la longitud de onda de Bragg en las FBGs, para la medida del pH y de la humedad se utilizan los cambios de volumen del hidrogel para variar la potencia óptica reflejada por la FBG. De esta forma, se protegen las FBGs de agentes químicos que pudieran dañarlas. Con esta distribución solo es necesario el uso de dos FBGs para la medida de los cuatro parámetros antes mencionados.

El hormigón en condiciones normales es un medio con un valor de pH alrededor de 13. La mayoría de ataques químicos en el hormigón provocan un descenso del valor del pH por debajo de 12, y por tanto este parámetro químico es un buen indicador de la presencia de reacciones químicas en el interior del hormigón que puede derivar en el deterioro del mismo y afectar a la seguridad de las estructuras. Con el objetivo de detectar estos cambios el Instituto de Tecnología de la Construcción (AIDICO) ha desarrollado distintos tipos de hidrogeles sensibles a descensos en el pH.

El esquema utilizado para la monitorización de los cambios de pH es idéntico a las medidas realizadas con sensores de deformación y temperatura. La diferencia entre los sensores de pH y humedad con los sensores anteriores radica en la ubicación de la FBG y la utilización de un transductor, que es el encargado de contener al hidrogel dentro de una membrana permeable, al mismo tiempo que transforma los cambios de volumen del hidrogel en variaciones en la potencia óptica recibida. El transductor es un elemento clave en el comportamiento del sensor, y al igual que la composición del hidrogel, puede tener efectos importantes sobre la sensibilidad del sensor y el tiempo de respuesta, entre otros, como veremos más adelante.

Existen claras diferencias con otros sensores ópticos de pH que se pueden hallar en la bibliografía. Hasta la fecha el uso de los hidrogeles se limitaba principalmente a rangos de pH muy

reducidos, por lo general 2 o 3 unidades de pH, y principalmente aplicado a medios ácidos, con valores menores de 7. En este caso, y por las características del hormigón, el hidrogel debe ser capaz de trabajar en medios básicos, valores de pH mayores de 7, y además de hacerlo en un amplio rango. Pero esta no es la única diferencia respecto a otros sensores, en contra de lo que suele ser habitual en este caso se ha optado por un tipo de hidrogel que se caracteriza por que aumenta su volumen en medios más ácidos que el hormigón, es decir, con valores de pH menores, cuando lo más habitual es que los hidrogeles se expandan en medios más básicos y se contraigan en medios más ácidos. Además se ha optado por una solución donde la expansión del hidrogel provoca atenuación en la potencia óptica por medio de curvaturas en la fibra óptica.

Para evaluar las propiedades de los hidrogeles desarrollados así como del transductor, se han realizado una serie de ensayos experimentales. Estos ensayos se basan en introducir el transductor con el hidrogel en su interior en disoluciones con valores de pH por encima de 13 y en disoluciones con valores de pH por debajo de 12 y observar la evolución de la longitud de onda y de la potencia recibida. En la Fig. 25 se puede observar el esquema utilizado para la monitorización de los sensores, la disposición de la FBG y del transductor, así como una ilustración de los ensayos.

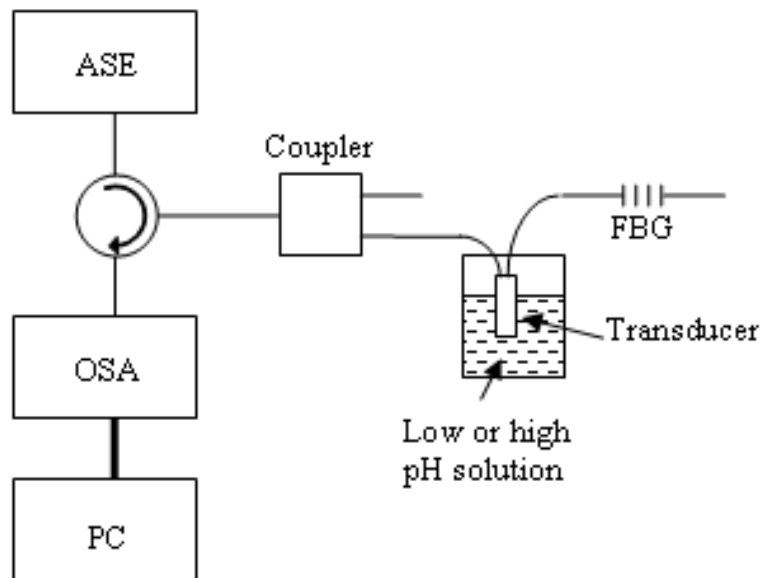


Fig.25. Esquema de los ensayos realizados con los sensores de pH.

A continuación se muestran una serie de resultados obtenidos de estos ensayos y que muestran el progreso en el desarrollo del sensor de pH. Los primeros ensayos corresponden a la comprobación del funcionamiento del sensor de pH y tratan de evaluar la capacidad de expansión del hidrogel ante una disolución de pH menor a 12. En concreto se ha sumergido el transductor en agua destilada, cuyo pH es ligeramente inferior a 7.

La gráfica de la Fig. 26, muestra el comportamiento básico del sensor. Después de unas horas durante las cuales se comprueba que el sensor permanece estable ante la ausencia de cambios de

pH, se sumerge el transductor en el agua destilada. Después de un tiempo necesario para que la disolución traspase la membrana permeable, el descenso del pH en el hidrogel provoca que este se expanda, provocando pérdidas ópticas por curvatura en la fibra óptica. En la Fig. 27 se observa la evolución de la temperatura durante el ensayo medidas a partir de la monitorización de la variación de la longitud de la FBG. El lugar donde se realizaron los ensayos tiene climatización constante y por tanto no es de extrañar que las variaciones de temperatura que muestra el sensor sean inferiores a 2 °C a lo largo de todo el ensayo.

En este caso las pérdidas ópticas llegan hasta los 3.5 dB. Es de destacar que la reflectividad de las redes de difracción utilizadas es muy alta y que el nivel de potencia del máximo de reflectividad respecto al nivel de ruido se encuentra alrededor de 13 dB. En desarrollos posteriores se ha tratado de ajustar el margen dinámico disponible y aumentar la velocidad de respuesta modificando ligeramente la composición del hidrogel así como el diseño del transductor.

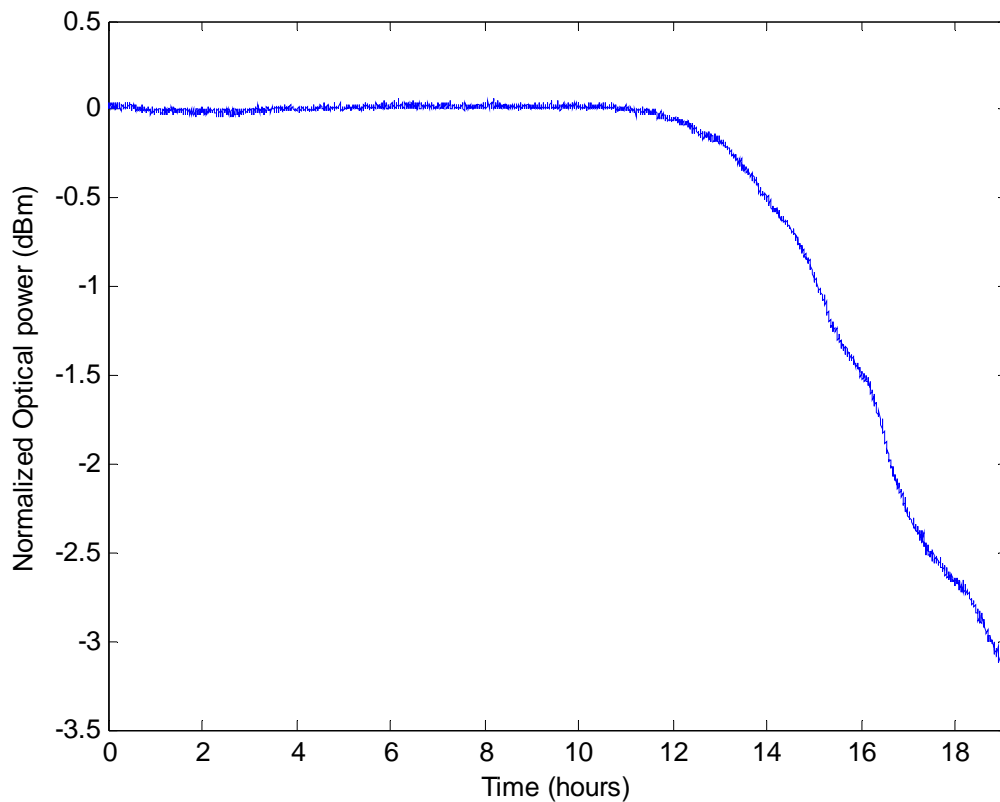


Fig.26. Respuesta del sensor de pH

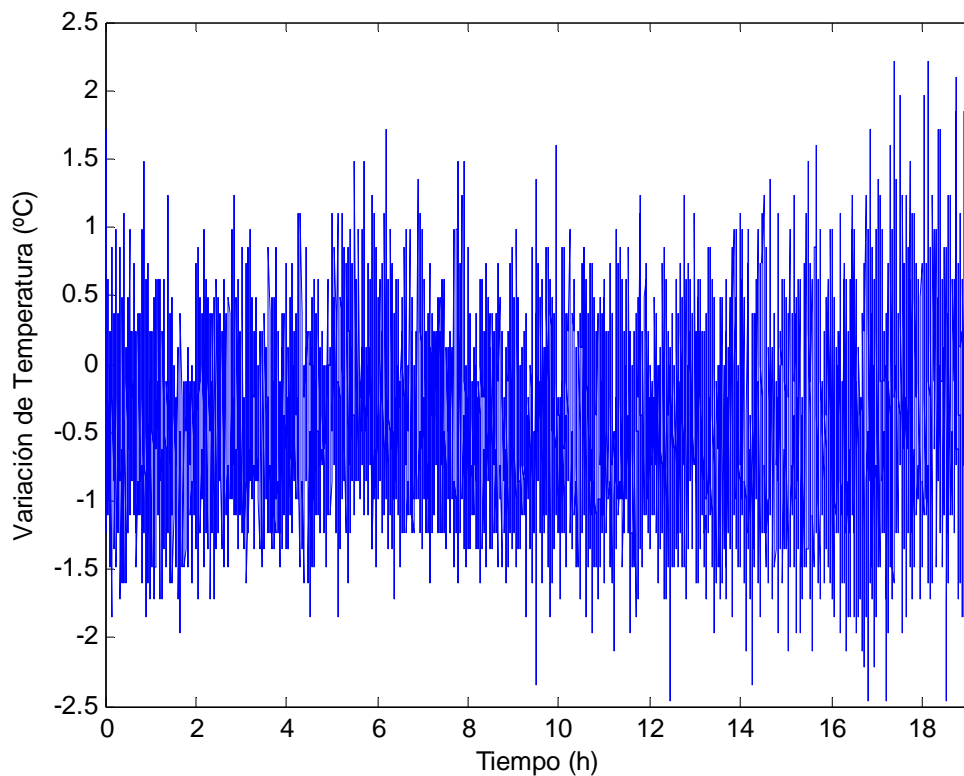


Fig.27. Variación de la temperatura durante el ensayo.

Así en los siguientes resultados se muestra un ensayo donde se han utilizado simultáneamente dos sensores de pH con diferente composición, con un transductor modificado, para aumentar el margen dinámico del sensor, pero idéntico en ambos sensores. Los resultados de ambos sensores pueden observarse en la Fig. 28. Ambas gráficas muestran comportamientos como el descrito en los anteriores ensayos. Primero se deja un tiempo para estabilizar la medida en potencia y a continuación se sumergen al mismo tiempo ambos sensores en agua destilada. Se puede observar claramente que en ambos casos el nuevo transductor es más eficaz que el anterior provocando pérdidas por curvatura, agotando el margen dinámico disponible para los sensores. También se observa el efecto que tienen las distintas composiciones del hidrogel sobre el tiempo de respuesta del sensor.

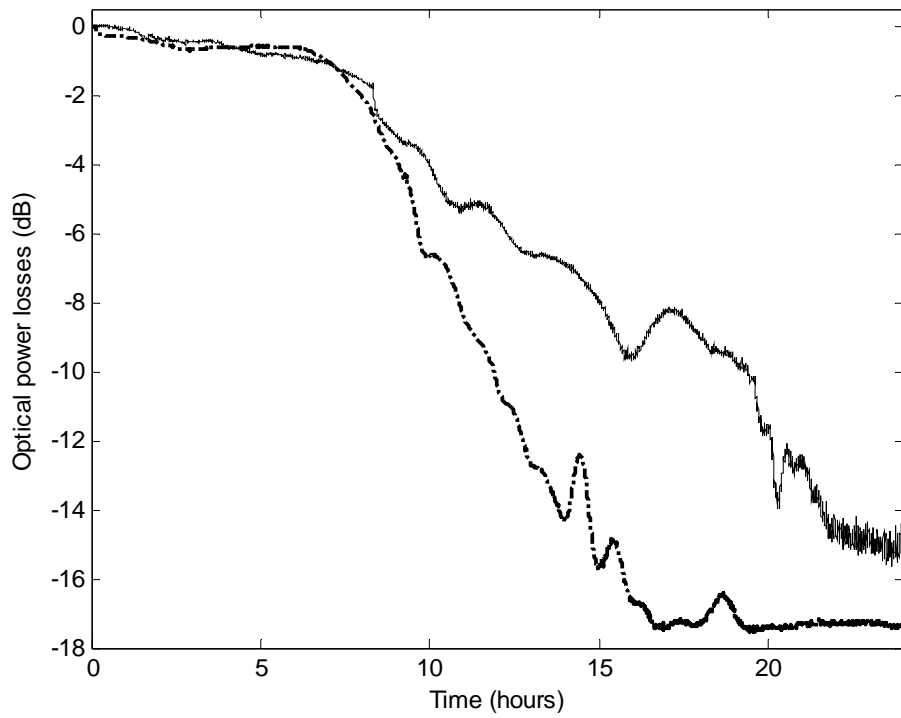


Fig.28. Ensayo con dos formulaciones diferentes del hidrogel.

Durante los últimos ensayos el tiempo de respuesta se ha mejorado de manera significativa respecto a anteriores ensayos, como puede verse en la Fig. 29.

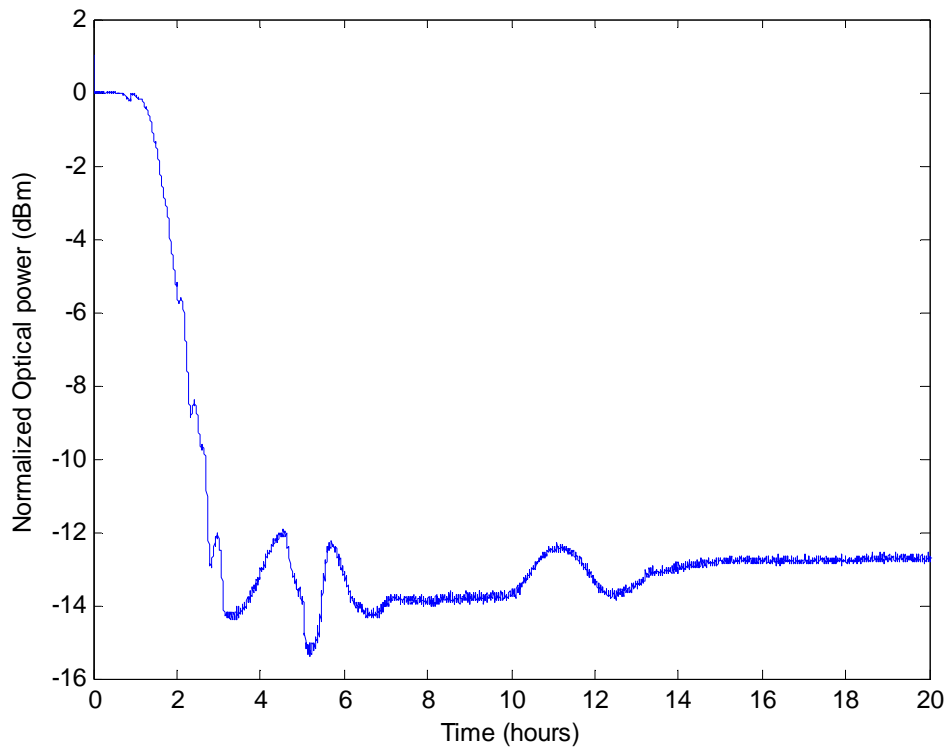


Fig.29. Medida del sensor de pH.

VI. Fibras Multimodo

Como hemos visto hasta ahora los sensores ópticos son capaces de medir perfectamente distintos tipos de parámetros físicos y químicos. Estos sensores son creados generalmente en fibras monomodo que si bien tienen muchas ventajas también acarrea una serie de inconvenientes que en determinadas aplicaciones puede ser determinante. Principalmente podemos destacar dos inconvenientes de las fibras monomodo, por un lado la necesidad de fuentes ópticas por lo general caras y por otro lado la interconexión de las fibras ópticas. Ambos factores hacen que el coste de instalación de un sistema de sensores ópticos sea en ocasiones demasiado elevado para ciertas aplicaciones, principalmente aplicaciones de ámbito doméstico o aplicaciones en automoción, donde los sensores ópticos pueden jugar un papel muy importante en los próximos años. Las fibras multimodo pueden solucionar estos dos inconvenientes ya que por un lado es posible utilizar fuentes ópticas más baratas (VCSEL), ya que poseen una apertura numérica mayor que las fibras monomodo y por tanto es más sencillo acoplar luz a este tipo de fibras, y por otro lado, puesto que el núcleo de una fibra multimodo es mucho mayor que el de una fibra monomodo estándar, los requerimientos de alineación de los conectores son menores permitiendo de esta manera un abaratamiento importante de los costes de los sistemas de monitorización.

No obstante la creación de sensores ópticos basados en redes de difracción sobre fibras multimodo no es en absoluto trivial y se tienen que tener en cuenta multitud de factores que en las fibras monomodo no estaban presentes. Se debe tener en cuenta por ejemplo la propagación de los distintos modos en la fibra óptica multimodo y su interacción, la técnica de inyección de luz, el tipo de fuente óptica adecuado para fibras multimodo, el perfil de índice de refracción, así como la preparación de las fibras ópticas multimodo para su conectorización, tanto entre las fibras como con los equipos de medida, entre otros muchos factores. Con el objetivo de encontrar soluciones a todos estos aspectos previos a la realización de las FBG en fibras multimodo se ha realizado una estancia dentro del programa Erasmus del máster de seis meses de duración en la Haute École Arc Ingénierie en Le Locle, Suiza. Para poner en práctica todos estos aspectos se ha caracterizado la atenuación modal diferencial de una fibra óptica de plástico (POF, Polymer Optical Fibers).

VII. Estudio sobre fibras ópticas de plástico

Las fibras POF son doblemente interesantes desde el punto de vista de los sensores ópticos. Por una parte las fibras POF, tanto las de salto de índice como las de índice gradual poseen un diámetro del núcleo muy grande (50–1000 μm) si lo comparamos con las fibras en silicio (5–60 μm) y una apertura numérica igualmente superior (0.2–0.9), lo que permite una conectorización más sencilla de los sistemas y una mayor eficiencia en el acoplamiento a fuentes ópticas de semiconductor y diodos. Poseen además completa inmunidad a interferencias electromagnéticas y una gran resistencia a daños mecánicos como consecuencia de la flexibilidad intrínseca de los materiales.

Por otra parte las FBGs son dispositivos creados en interior de las fibras ópticas y sus características como sensores dependen en gran medida de las características de las fibras sobre las que se crean, por su composición, las características mecánicas de estas fibras son totalmente diferentes a las de silicio, lo que puede aprovecharse para crear sensores ópticos con características distintas a las habituales. No obstante a pesar de los últimos avances en el estudio de este tipo de fibras aún sigue habiendo mucho desconocimiento sobre ellas. Numerosos parámetros ampliamente conocidos en las fibras de silicio y que condicionan en gran medida su capacidad, como la dispersión, tanto cromática como modal, la atenuación modal o la longitud de acoplamiento no se conocen, o en el mejor de los casos los diferentes estudios reflejan diferencias notables en la estimación de estos parámetros, seguramente debido a las grandes diferencias en las características de las fibras de los diferentes fabricantes. Debido a esto en algunas ocasiones la única opción para conocer las características de una determinada fibra es medir cada uno de estos parámetros.

Las fibras POF típicamente muestran un ancho de banda muy superior de lo que se podría esperar de las previsiones realizadas a partir de perfil de índice de refracción, lo que justifica en parte la atracción que levanta este tipo de fibras. Este fenómeno es generalmente atribuido al acoplamiento de modos, y varios estudios han encontrado evidencias de ello. El acoplamiento de modos tiene su origen tanto en factores intrínsecos, como las perturbaciones aleatorias en el índice de refracción, como en factores extrínsecos, siendo éstos últimos la principal fuente del acoplamiento de modos, entre ellos las microcurvaturas o las fluctuaciones en el diámetro de la fibra. Recientemente, la atenuación modal diferencial (DMA, del inglés Differential Modal Attenuation) también se ha demostrado como un factor importante para determinar la capacidad de estas fibras. [11]

Las fibras ópticas multimodo pueden guiar gran cantidad de modos, cada uno de ellos solución particular de las ecuaciones de Maxwell. La función de transferencia de una fibra óptica multimodo puede expresarse como se plantea en la ecuación (12). Se puede encontrar el análisis más completo en [12][13]

$$\begin{aligned} H_{MMF}(\lambda_0, z, \omega) &= \\ &= \int_1^{M_0} \int_{-\infty}^{\infty} 2m P(\lambda, \lambda_0) C_{eff}(m, \lambda) G(m, \lambda, z, \omega) L(m, \lambda, z) \exp[-i\omega\tau(m, \lambda)z] d\lambda dz \end{aligned} \quad (12)$$

Donde $P(\lambda, \lambda_0)$ es la densidad espectral de la fuente óptica, considerada como una fuente gaussiana, $C_{eff}(m, \lambda)$ es la eficiencia de acoplamiento de cada modo, $L(m, \lambda, z)$ son las pérdidas ópticas y $\tau(m, \lambda)$ es la función de retardo modal. λ es la longitud de onda, ω es la frecuencia angular eléctrica y z es la longitud de la fibra óptica. El factor $2m$ se introduce para tener en cuenta la degeneración de modos y la función $G(m, \lambda, z, \omega)$ es una función para describir el

acoplamiento de modos. La función de transferencia en banda base de las fibras ópticas multimodo se pueden representar como el producto de dos funciones de transferencia independientes $H_{\text{chromatic}}(\lambda_0, z, \omega)$ y $H_{\text{modal}}(\lambda_0, z, \omega)$ que representan las funciones de transferencia debidas a las dispersiones cromática y modal respectivamente. La función de transferencia cromática puede calcularse mediante la ecuación

$$H_{\text{chromatic}}(\lambda_0, z, \omega) = \frac{1}{(1 + i\omega/\omega_2)^{1/2}} \exp\left[-\frac{(\omega/\omega_1)^2}{2(1 + i\omega/\omega_2)}\right] \quad (13)$$

donde

$$\omega_1 = -[\sigma_\lambda D_0(\lambda_0)z]^{-1} \quad (14)$$

$$\omega_2 = \{\sigma_\lambda^2 [S_0(\lambda_0) + 2D_0(\lambda_0)/\lambda_0]z\}^{-1} \quad (15)$$

Estas últimas ecuaciones son las mismas que para una fibra óptica monomodo. La única diferencia estriba en que la dispersión cromática $D_0(\lambda_0)$ y la pendiente de la dispersión cromática $S_0(\lambda_0)$ deben considerarse como la media de todos los modos. Por otra parte, la función de transferencia modal puede ser descrita por la ecuación (16).

$$H_{\text{modal}}(\lambda_0, z, \omega) = \int_{x_0}^1 2xR(x, \lambda_0, z, \omega) dx \quad (16)$$

Donde $R(x, \lambda_0, z, \omega) = C_{\text{eff}}(x, \lambda_0)G(x, \lambda_0, z, \omega)L(x, \lambda_0, z) \cdot \exp[-i\omega\tau(x, \lambda_0)z]$ es la potencia óptica que transporta cada uno de los modos. Siendo x el número de grupo de modo normalizado al número máximo de grupos de modos que se propagan en la fibra óptica. El flujo de potencia entre los modos que se propagan se puede describir mediante una ecuación diferencial.

$$\begin{aligned} \frac{\partial R(x, \lambda_0, z, \omega)}{\partial z} = \\ = -[i\omega\tau(x, \lambda_0) + \gamma(x, \lambda_0)]R(x, \lambda_0, z, \omega) + \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial x} \left[xd(x, \lambda_0) \frac{\partial R(x, \lambda_0, z, \omega)}{\partial x} \right] \end{aligned} \quad (17)$$

Donde $d(x, \lambda_0)$ es el coeficiente de acoplamiento de modos normalizado y $\gamma(x, \lambda_0)$ es la atenuación modal en ausencia de acoplamiento de modos. En la Fig. 30 se representa el acoplamiento de los modos que se propagan a lo largo de la fibra óptica.

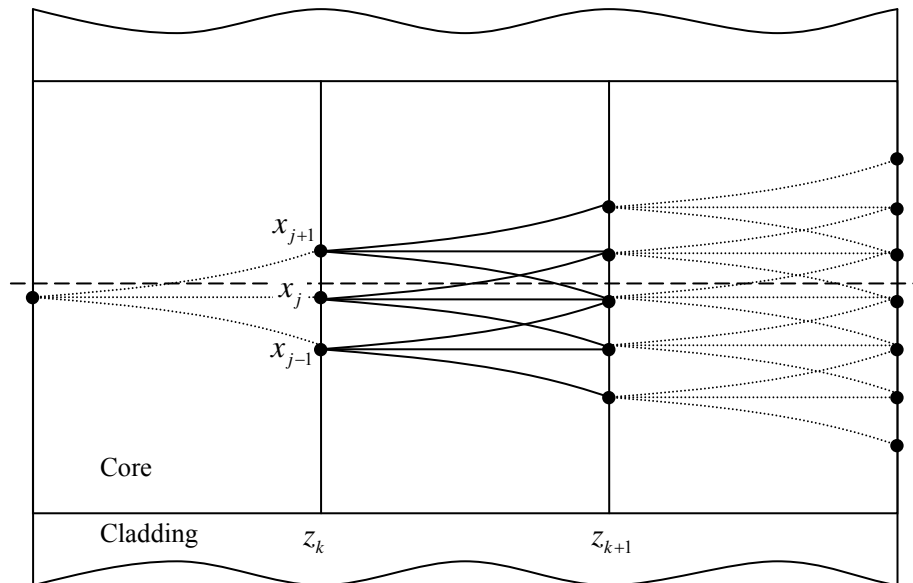


Fig.30. Acoplamiento de modos en una fibra multimodo.

El factor de acoplamiento determina la porción de la energía que se transfiere de un modo a otro a cada diferencial de longitud. En las fibras POF este acoplamiento puede ser de varios órdenes de magnitud superior al presente en las fibras de silicio. Esto tiene varios efectos, por un lado hace que se reduzca la dispersión modal debido a que los paquetes de energía pueden ocupar distintos modos mientras se propagan por la fibra. Por otro lado también provoca unas mayores pérdidas. Con el estudio de la DMA se puede estimar la longitud de acoplamiento así como el factor de acoplamiento modal de las fibras POF.

El montaje experimental se muestra en la Fig. 31. Para obtener la DMA se usará como fuente óptica un VCSEL (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) cuya longitud de onda de emisión se encuentra en 850 nm. Cabe destacar que la salida del VCSEL se ha acoplado a una fibra óptica con un diámetro de núcleo de $5 \mu\text{m}$, en la cual se ha obtenido una gran eficiencia, siendo esto algo extremadamente complejo debido a la baja apertura numérica de la fibra de $5 \mu\text{m}$.

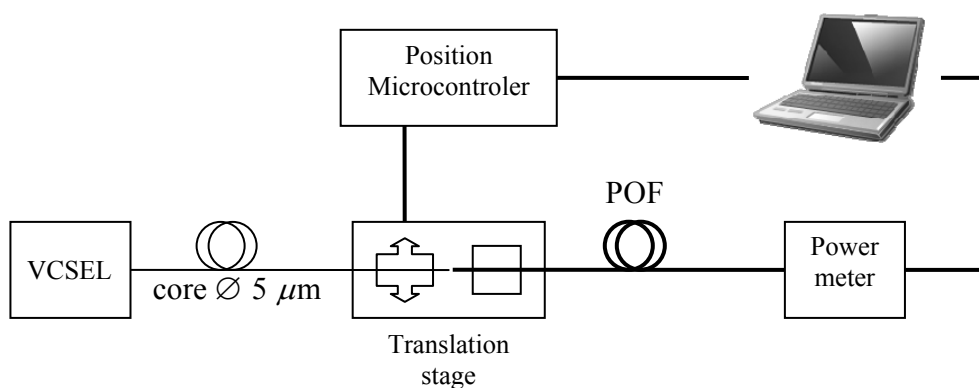


Fig.31. Esquema experimental para la medida de la DMA.

La medida de DMA se realiza inyectando la luz de forma restringida en distintas posiciones a la entrada de la fibra POF. Para ello se desplaza la fibra de 5 μm respecto a la fibra POF bajo medida con ayuda de una plataforma de desplazamiento controlada por ordenador. Para cada posición se guarda el valor de potencia óptica a la salida de la fibra. Las medidas se realizan para distintas longitudes de fibra POF, de forma que obtendremos la evolución de la atenuación modal respecto a la longitud de fibra.

Estas medidas son muy sensibles a la preparación del extremo de la fibra POF. A diferencia de una fibra de silicio, las fibras POF una vez cortadas necesitan pulirse para obtener una superficie en el corte uniforme. La preparación de ambos extremos ha sido uno de los principales obstáculos que se han tenido que solventar para trabajar con este tipo de fibras. Se ha desarrollado una estrategia de pulido de este tipo de fibras de forma que se obtienen unos resultados comparables a un conector estándar de fibra monomodo. Aún así y puesto que las medidas son más sensibles a las irregularidades a la entrada de la fibra que las irregularidades en el extremo del detector, una vez preparadas las fibras para la medida, se recorta la fibra bajo medida por el lado del detector.

Se han medido dos tipos de fibra distintos, una es una fibra de polimetil metacrilato (PMMA) fabricada por Nexans, mientras que la otra es una fibra perfluorinada (PF) fabricada por Chromis. La fibra PMMA tiene un núcleo de 120 μm de diámetro y un diámetro para la cubierta de 230 μm , como curiosidad esta fibra presenta un overcladding que hace que el diámetro total de la fibra sea de 0.5 mm. El núcleo de la fibra PF tiene un diámetro de 62.5 μm y una cubierta de 250 μm . A continuación se muestra los resultados obtenidos

VII.1. Fibra PMMA.

En la Fig. 32 se ha representado los resultados obtenidos para la fibra PMMA, la distancia total de la fibra empleada ha sido de 20 m. En la Fig. 33 se muestra esta evolución de la atenuación por unidad de longitud para distintas longitudes de fibra óptica para cada posición de inyección. Se puede apreciar la gran atenuación de los grupos modales superiores, llegando a valores de hasta 1200 dB/km, esto es un factor muy importante a tener en cuenta en las fibras POF, ya que contribuye en parte a explicar el gran ancho de banda que muestran este tipo de fibras ópticas. [14]

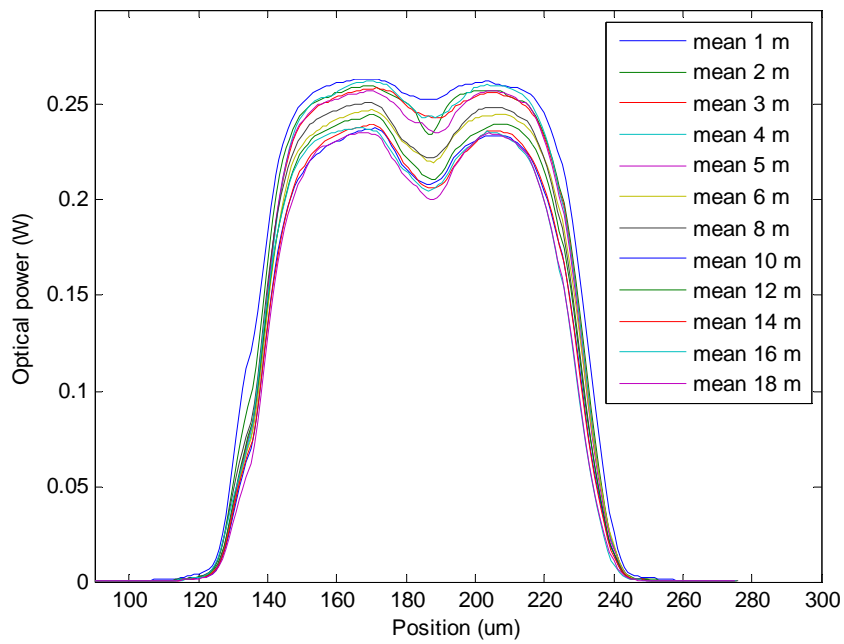


Fig.32. Medidas experimentales DMA para la fibra PMMA.

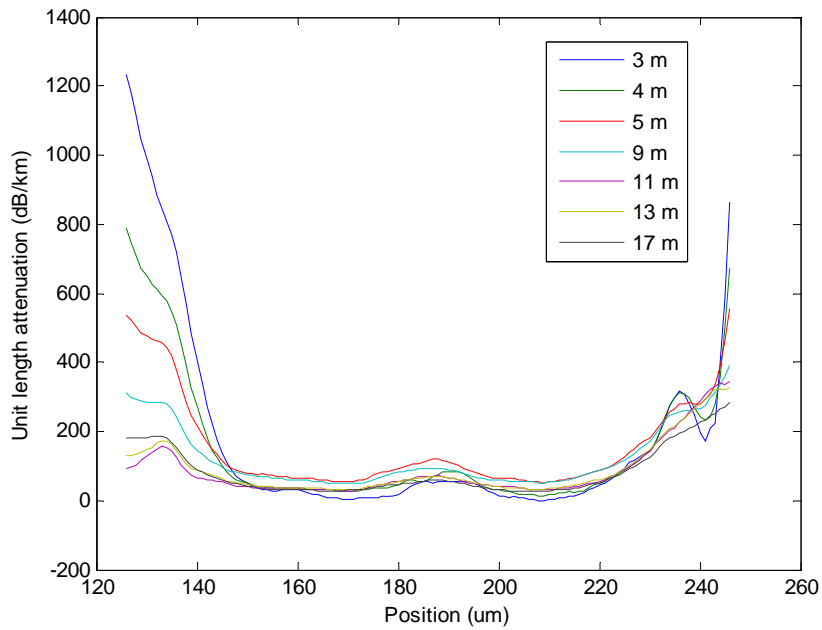


Fig.33. Atenuación por unidad de longitud para la fibra PMMA.

En la Fig. 34 podemos observar para cada posición de inyección la evolución de la atenuación por unidad de longitud. Esta gráfica muestra como se tiende rápidamente a alcanzar un equilibrio en el interior de la fibra óptica.

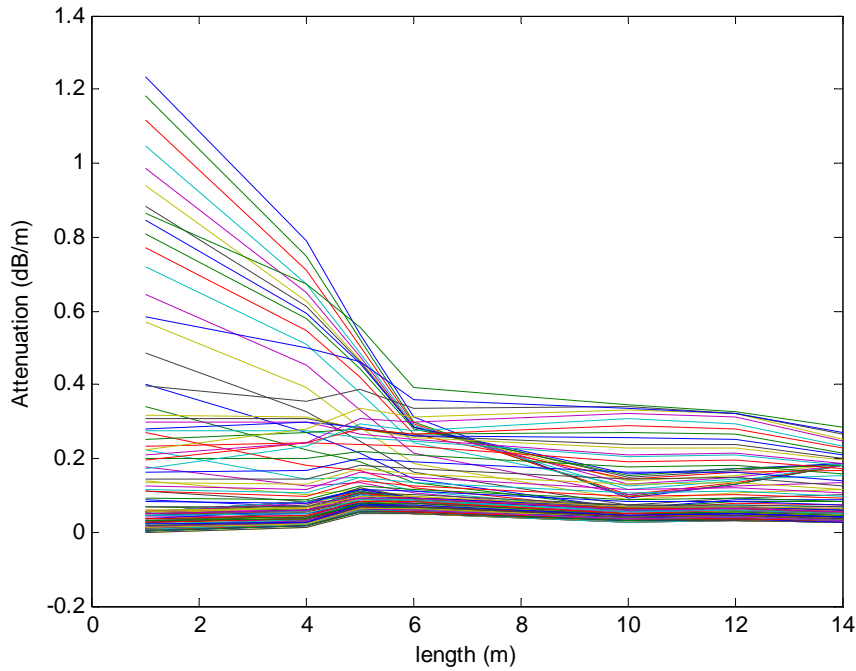


Fig.34. Evolución de la atenuación por unidad de longitud con la longitud de la fibra de medida para la fibra PMMA.

En la Fig. 35 se muestra la evolución teórica de distintos grupos modales en función de la distancia de la fibra óptica [15] y de la que hasta la fecha, y según nuestro conocimiento, no existían medidas experimentales, lo que puede dar una idea de la extrema dificultad que supone medir este parámetro experimentalmente. Se puede observar claramente en la Fig. 34 la existencia de grupos modales que incrementan su atenuación por unidad de longitud con la distancia así como de modos con el comportamiento inverso tal como predice la teoría.

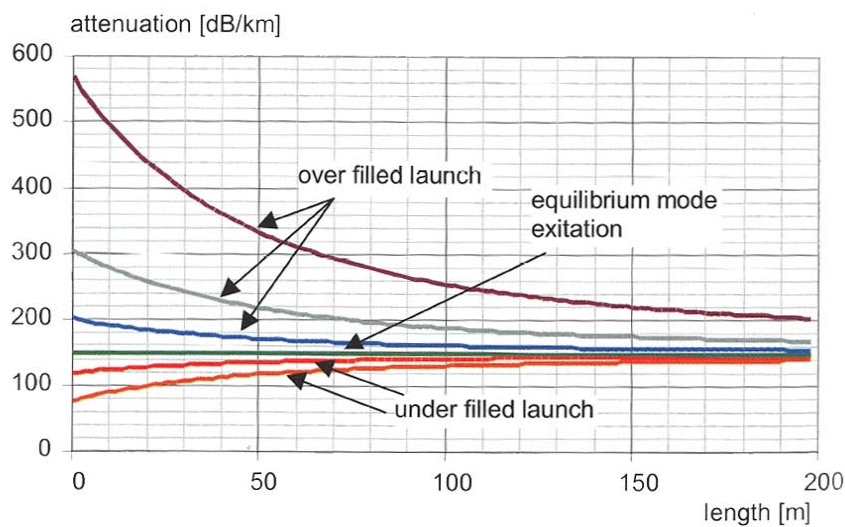


Fig.35. Evolución de la atenuación por unidad de longitud en una fibra POF.

VII.2. Fibra PF.

Para las fibras PF se han repetido las medidas. Esta vez la distancia máxima medida ha sido de 15 metros. Como se puede ver en las medidas representadas en la Fig. 36 y la Fig. 37 son parecidas, aunque con ligeras variaciones en la forma, a las que se obtuvieron para el caso de la fibra PMMA. Estas pequeñas variaciones son debidas a que las fibras están fabricadas con distinto tipo de material y que el tamaño del núcleo es igualmente diferente entre ellas.

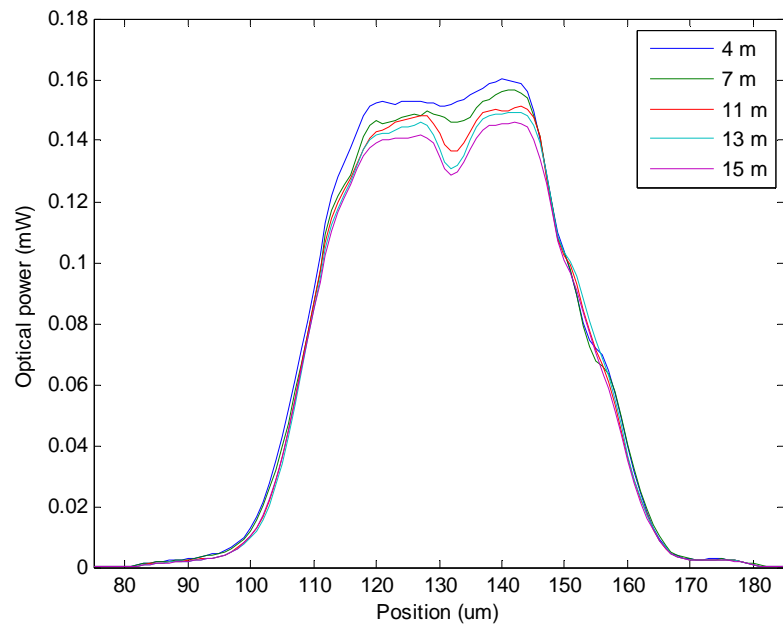


Fig.36. Medidas experimentales DMA para la fibra PF.

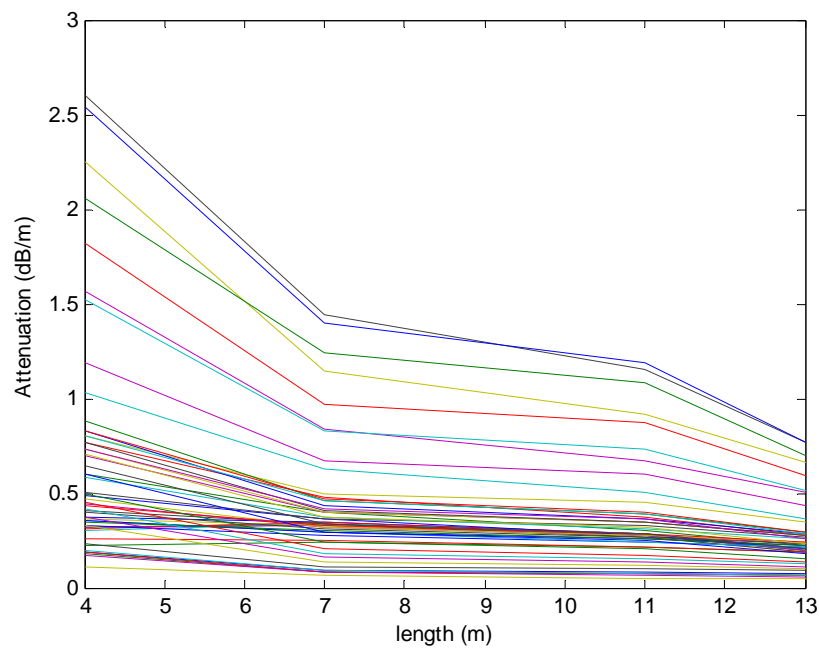


Fig.37. Evolución de la atenuación por unidad de longitud con la longitud de la fibra de medida para la fibra PF.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Politécnica de Valencia por su financiación en el marco del programa DESEOH.

A la Generalitat Valenciana por su financiación mediante la ayuda complementaria a la investigación ACOMP06/018.

Al Ministerio de Industria, Turismo y Comercio por la financiación en la modalidad PROFIT de los proyectos FIT-380000-2005-165 y FIT-380000-2006-63 “Desarrollo de un sensor multiparamétrico/multipunto de fibra óptica para incorporar en estructuras de hormigón - SEMMAFOHOR” y a la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología en el proyecto TEC2007-68065-C03-01.

Al Instituto Tecnológico de la Construcción (AIDICO) y al Instituto Tecnológico de Óptica, Color e Imagen (AIDO) por su colaboración en el proyecto SEMMAFOHOR.

Al Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) por su colaboración en el proyecto DESEOH.

A la Haute École Arc Ingénierie y a los profesores Lucien Falco y Miguel Llera por su acogida y su apoyo durante mi estancia en Suiza.

Y un agradecimiento especial a todo el grupo de Comunicaciones Ópticas y Cuánticas (GCOQ) del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) y a mi director por darme esta oportunidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Othonos and K. Kalli, “Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing”, Artech House, ISBN 0-89006-344-3 (1999).
- [2] Meltz, KO, Hill. “Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview.” *Journal of lightwave technology*, 15, 8, (1997):1263-1276.P.
- [3] Kersey, AD, et al. "Fiber grating sensors." *Journal of lightwave technology* 15.8 (1997):1442-1463.
- [4] Tanaka, N, YOkabe, and NTakeda. "Temperature-compensated strain measurement using fiber Bragg grating sensors embedded in composite laminates." *Smart materials & structures* 12.6 (2003):940-946.
- [5] Takeda, K, et al. "Evanescent-wave spectroscopic fiber optic pH sensor." *Optics Communications* 122.4-6 (1996):122-126.
- [6] Gupta, BD, and NKSharma. "Fabrication and characterization of a fiber-optic pH sensor for the pH range 2 to 13." *Fiber and integrated optics* 23.4 (2004):327-335.
- [7] Ciaurriz, Z, et al. "An experimental study about hydrogels for the fabrication of optical fiber humidity sensors." *Sensors and actuators. B, Chemical* 96.1-2 (2003):165-172.

- [8] McKenzie, I., et al. "Distributed pH and water detection using fiber-optic sensors and hydrogels." *Journal of lightwave technology* 13.7 (1995):1415-1420.
- [9] Ciaurriz, Z, et al. "An experimental study about hydrogels for the fabrication of optical fiber humidity sensors." *Sensors and actuators. B, Chemical* 96.1-2 (2003):165-172.
- [10] Zhang, XM, et al. "Fiber optic Bragg grating sensor based on hydrogels for measuring salinity." *Sensors and actuators. B, Chemical* 87.3, (2002):487-490.
- [11] Golowich, SE, et al. "Quantitative estimates of mode coupling and differential modal attenuation in perfluorinated graded-index plastic optical fiber." *Journal of lightwave technology* 21.1 (2003):111-121.
- [12] Yabre, G. "Theoretical investigation on the dispersion of graded-index polymer optical fibers." *Journal of lightwave technology* 18.6 (2000):869-877.
- [13] Yabre, G. "Comprehensive theory of dispersion in graded-index optical fibers." *Journal of lightwave technology* 18.2 (2000):166-.
- [14] Ishigure, T, Kano, M and Koike, Y. "Which is a more serious factor to the bandwidth of GI POF: Differential mode attenuation or mode coupling?" *Journal of lightwave technology* 18.7 (2000):959-965.
- [15] W. Daum, J. Krauser, P. Zamzow, O. Ziemann, "Polymer optical fibers for data communications", Springer (2002)

ANEXOS

Aplicación de sensores ópticos basados en redes de difracción de Bragg para la caracterización de materiales.

Application of Fiber Bragg Grating optic sensors for material characterization

D. Barrera ⁽¹⁾, R. García ⁽¹⁾, S. Sales ⁽¹⁾, I. Gash ⁽²⁾, S. Ivorra ⁽²⁾, E. Giménez ⁽²⁾.

1. Grupo de Comunicaciones Ópticas y Cuánticas del instituto de investigación ITEAM, Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n, 46022, SPAIN (e-mail:dabarvi@teleco.upv.es)
2. Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón, ICITECH, Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n, 46022, SPAIN.

RESUMEN:

En este documento se presentan los resultados obtenidos de la utilización de sensores ópticos basados en redes de difracción de Bragg para la medida de deformaciones en distintos materiales. Se han realizado distintos tipos de ensayos, ensayos a tracción, compresión y flexotracción, con dos tipos de materiales muy utilizados, acero y hormigón. Los resultados obtenidos se han comparado con los obtenidos mediante sensores eléctricos convencionales utilizados habitualmente en este tipo de ensayos para comprobar el correcto funcionamiento de los sensores ópticos. En todos los ensayos realizados los resultados obtenidos por ambos tipos de sensores muestran una gran coincidencia, siendo las diferencias inferiores al 3 %.

Palabras clave: Sensor óptico, FBG, redes de difracción de Bragg, deformación, tracción, compresión, flexotracción, hormigón, acero.

ABSTRACT:

In this document we present the results obtained for the application of fiber Bragg grating optic sensors for strain measurements in several materials. We made different tests, traction, compression and flexotraction tests with steel and concrete. The results obtained had been compared with conventional electrical strain gauges normally utilized in these tests for compare the correct operation of the optic sensors. The results obtained in all test with the two types of sensors shows a good match, with differences less than 3 %.

Key words: Optic sensor, FBG, fiber Bragg grating, strain, traction, compression, flexotraction, concrete, steel.

1.- Introducción

A pesar de que en los últimos años se han desarrollado un gran número de sensores ópticos basados en diferentes técnicas, como los sensores basados en interferómetros Fabry-Perot [1, 2], o los sensores basados en backscattering [3], los sensores ópticos basados en redes de difracción de Bragg (FBG) mantienen un gran interés, debido principalmente a sus características inherentes. Ade-

más de las propiedades comunes a otros sensores ópticos como la inmunidad a interferencias electromagnéticas, tamaño y pesos reducidos, los sensores basados en FBGs tienen la ventaja de multiplexar la información procedente de diferentes sensores en una única fibra óptica y de una fácil interrogación en comparación con otros tipos de sensores ópticos.

En los últimos años se han realizado diferentes medidas usando distintos tipos de sensores ópticos tanto superficiales como embebidos para la caracterización de materiales. Kalamkarov [4] presentó un estudio con sensores distribuidos de Brillouin embebidos en polímeros reforzados con fibra de vidrio para la medida de las deformaciones internas en hormigón y Lau [5] presentó un estudio experimental de medidas de deformación con sensores basados en FBGs embebidos dentro de probetas de hormigón.

En este documento se presentan los resultados obtenidos de la aplicación práctica de sensores ópticos basados en redes de difracción de Bragg para su uso en la caracterización de materiales realizado por el Grupo de Comunicaciones Ópticas y Cuánticas del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITEAM) y del Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) de la Universidad Politécnica de Valencia.

El objetivo principal de estos ensayos es comprobar el correcto funcionamiento de los sensores ópticos para la medida de deformaciones en comparación con los sensores eléctricos que son habituales en este tipo de ensayos.

2.- Principio de funcionamiento

Se puede demostrar fácilmente que en una red de difracción de Bragg, la longitud de onda del máximo de reflectividad, o mínimo de transmisividad, viene determinada por la siguiente ecuación [6, 7]:

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

donde n_{eff} es el índice de refracción efectivo del modo y Λ es el periodo espacial de las perturbaciones inducidas en el índice de refracción del núcleo de la fibra óptica.

La longitud de onda del máximo de reflectividad se puede desplazar debido a variaciones de temperatura o bajo la influencia de tensiones aplicadas en la región donde se encuentra la FBG. Este desplazamiento viene determinado por la variación de la separación espacial de las perturbaciones en el índice de refracción. Teniendo únicamente en cuenta

los efectos termo-mecánicos, la variación de la longitud de onda en función del incremento de la temperatura y de la tensión axial en una red de difracción de Bragg se puede expresar mediante la siguiente ecuación [8]

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon \varepsilon + \lambda_B \xi_0 \Delta T \quad (2)$$

donde ε es la deformación unitaria en la región donde se encuentra la FBG y K_ε es una constante que indica la sensibilidad en deformación de la FBG y que se obtiene de forma experimental.

La segunda parte de la expresión determina la deriva del máximo de reflectividad debido al incremento de temperatura. En los distintos ensayos realizados la variación de la temperatura durante las medidas no es significativa, debido tanto a las condiciones en el interior del laboratorio como de los tiempos de medida, con lo que este factor no se ha tenido en consideración.

Para medir las variaciones del máximo de reflectividad de la red de difracción se ha utilizado el esquema que se observa en la Fig.1. En el esquema mostrado, la señal óptica procedente de una fuente óptica ancha ASE pasa a través del circulador óptico, hacia el acoplador en estrella, que distribuye la señal óptica a las distintas FBGs. Las distintas longitudes de onda que reflejan las FBGs se muestran en el analizador de espectros ópticos (OSA) y son enviadas a un PC donde se almacenan y procesan los datos.

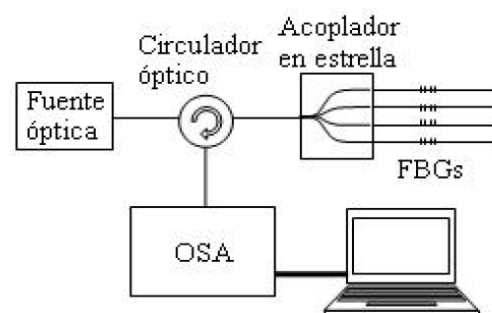


Fig. 1: Esquema de medición de las variaciones de longitud de onda de las FBGs

Para corroborar los resultados obtenidos por los sensores ópticos en los distintos ensayos se han utilizado galgas extensiométricas eléc-

tricas comúnmente utilizadas en este tipo de ensayos.

3.- Calibración de los sensores

El primer paso para la utilización de los sensores ópticos es la determinación de la constante K_ϵ que aparece en la ecuación (2) y que corresponde a la sensibilidad en deformación de las FBGs utilizadas. Para ello se dispuso un montaje con elementos de posicionamiento micrométrico. Uno de los extremos de la FBG se fija a un elemento de posicionamiento fijo mientras que el otro extremo se fija a un elemento móvil que permite aplicar deformaciones con una precisión de 0.01 mm. En la Fig.2 podemos ver la relación entre deformación unitaria y longitud onda del máximo de reflectividad de la FBG obtenida en las pruebas de calibración.

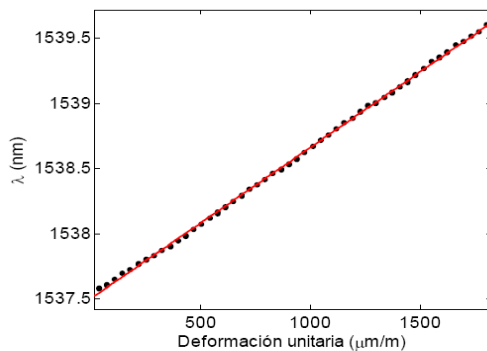


Fig.2: Obtención de la constante de sensibilidad en deformación

Como se puede observar los resultados obtenidos se ajustan claramente a una recta. A partir de la pendiente de esta recta se determina la constante de sensibilidad, obteniéndose en este caso un valor para K_ϵ de $1.15 \text{ pm}/(\mu\text{m}/\text{m})$.

4.- Experimentación

4.1.- Ensayos a tracción

El primero de los ensayos que mostraremos es un ensayo a tracción con probetas de acero. Los ensayos se realizaron en el laboratorio del Departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad Politécnica de Valencia. Y para ello se utilizó una máquina tipo Universal de ensayos a tracción y compresión para

todo tipo de materiales, con utillajes para ensayos de alambres. La dimensiones de las probetas así como la colocación de los sensores se muestra en la Fig.3.

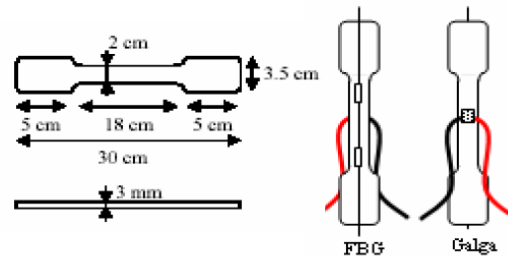


Fig.3: Dimensiones probetas de acero y Colocación de los sensores



Fig.4: Fotografía del ensayo a tracción

Los resultados obtenidos de estos ensayos se pueden observar en la Fig.5. Como se puede apreciar los resultados obtenidos por los sensores ópticos son coincidentes con los resultados de las galgas extensiométricas en ambos ensayos. A partir de estos ensayos se puede obtener el módulo de elasticidad de las probetas, que en el primer ensayo el módulo de elasticidad que se deriva de los datos de la galga extensométrica es de $219.400 \text{ N}/\text{mm}^2$ mientras que con el sensor óptico es de $222.100 \text{ N}/\text{mm}^2$, lo que supone una diferencia del 1%. En el segundo ensayo, los resultados son muy parecidos a los del primero. La galga extensométrica proporciona un módulo de elasticidad de $217.900 \text{ N}/\text{mm}^2$ y el sensor óptico de $221.300 \text{ N}/\text{mm}^2$, lo que en

este caso supone también una diferencia del 1%.

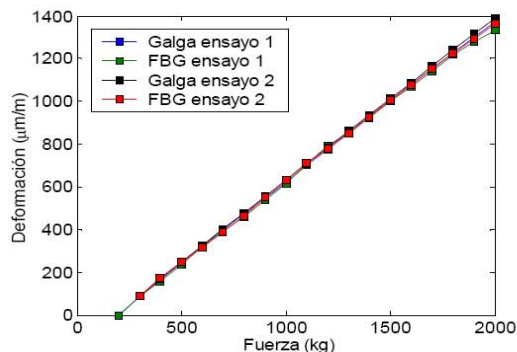


Fig.5: Resultados obtenidos en las pruebas de tracción en probetas de acero

4.2.- Ensayos a Compresión

El segundo de los ensayos que mostraremos consiste en pruebas de compresión en probetas de hormigón. Estas pruebas tuvieron lugar en el laboratorio del Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia y para realizarlas se utilizó una prensa para ensayar elementos a compresión conectada a un equipo informático que permite almacenar la carga y las medidas en cada instante y con la cual es posible alcanzar una carga máxima de 250T.

Para el ensayo se dispusieron tres sensores ópticos en posición vertical alrededor de la probeta en ángulos de 120 ° lo más cerca posible de otras tres galgas que servirán de referencia a la hora del análisis de los resultados. Las dimensiones de las probetas y la colocación de los sensores se muestran en la Fig.6.

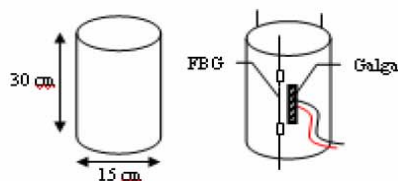


Fig.6: Dimensiones de las probetas para las pruebas de compresión y colocación de los sensores

Para poder medir compresiones sin un sistema de protección es necesario pretensar las FBGs. El pretensado consiste en aplicar una deformación controlada al sensor, de este

modo al comprimir la probeta el sensor pierde esta deformación y es posible medir la compresión. En este caso la deformación previa aplicada a los sensores fue del 0.2 %.

El proceso de carga se realizó según el protocolo que fija la norma UNE 83316:1996.



Fig.7: Fotografía del ensayo a compresión

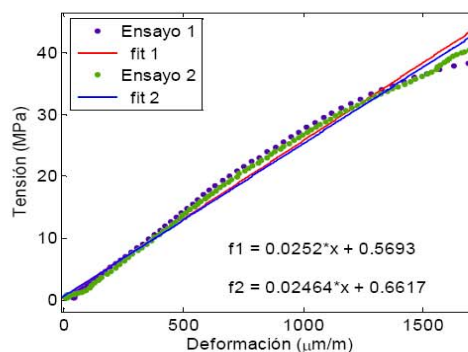


Fig.8: Cálculo del módulo de elasticidad

A partir de estos ensayos se obtiene la curva de tensión-deformación, de la que obtenemos el módulo elástico y que está representada en la Fig.8 para los datos procedentes de los sensores ópticos en los dos ensayos realizados. El módulo de elasticidad a partir de los datos de los sensores ópticos fue de 24.640 N/mm² y de 25.200 N/mm² en cada uno de los dos ensayos realizados, y de 25.300 N/mm² y 25.800 N/mm² respectivamente a partir de los datos de las galgas extensiométricas. Lo que supone una diferencia inferior al 3 %.

4.3.- Ensayos a flexotracción

El último ensayo que presentamos es un ensayo a flexotracción sobre probetas prismáti-

cas normalizadas (UNE-EN 12390-1:2001), de dimensiones 50x10x10 cm. La ubicación de los sensores ópticos y de las galgas extensiométricas se muestra en la Fig.9. Al igual que ocurría en el caso de los ensayos a compresión, es necesario pretensar los sensores ópticos para medir las deformaciones en compresión. En este caso la deformación previa aplicada fue del 1%, de este modo los sensores pueden medir tanto deformaciones por compresión como por tracción.

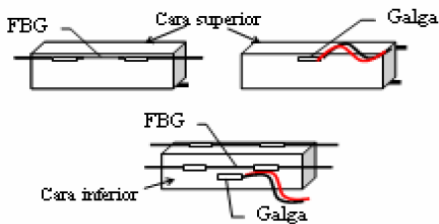


Fig.9: Colocación de los sensores en los ensayos de flexo-tracción

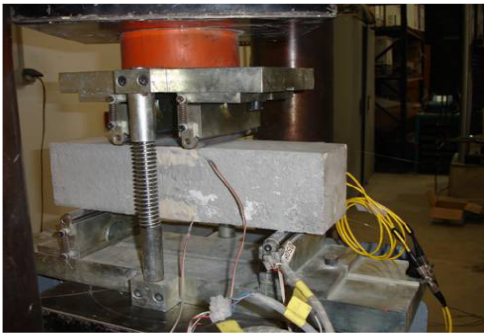


Fig.10: Fotografía del Ensayo a flexotracción

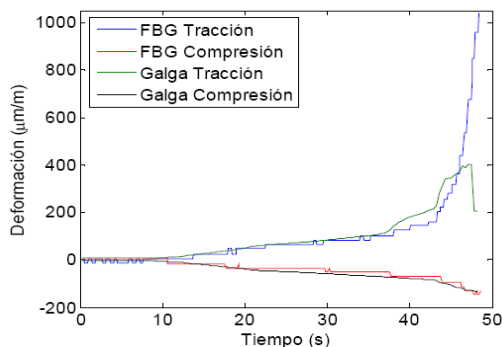


Fig.11: Resultados pruebas de flexotracción

Los resultados obtenidos se muestran en la Fig.11. Como se puede observar los resulta-

dos obtenidos por los sensores ópticos son coincidentes con los resultados obtenidos con las galgas extensiométricas durante la mayor parte del ensayo, únicamente en el caso de la galga en tracción se observa un comportamiento anómalo, debido a que la mayor superficie donde está pegada la galga en comparación con la del sensor óptico provoca que a deformaciones mayores ésta se desprege de la probeta.

5.- Conclusiones

En este documento hemos mostrado los resultados obtenidos mediante la utilización de sensores ópticos superficiales basados en redes de difracción de Bragg para la caracterización de materiales en laboratorios. Los resultados muestran un comportamiento comparable al obtenido por las galgas extensiométricas utilizadas normalmente en este tipo de ensayos.

6.- Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Politécnica de Valencia que ha financiado este trabajo en el marco del proyecto DESEOH.

Queremos agradecer también a la Generalitat Valenciana por el apoyo ofrecido mediante la ayuda complementaria a la investigación ACOMP06/018.

Referencias

- [1] Barnes, RA, et al. "Structural NDE of concrete structures using protected EFPI and FBG sensors." *Sensors and actuators. A, Physical* 126, 2, 340-347, 2006.
- [2] Pascale, G, and BBonfiglioli. "Internal strain measurements in concrete elements by fiber optic sensors." *Journal of materials in civil engineering* 15, 2, 125-133, 2003.
- [3] Cho, YT, TPNewson, and MNAlahbabi. "Long-range distributed temperature and strain optical fibre sensor based on the coherent detection of spontaneous Brillouin scattering with in-line Raman amplification." *Measurement science & technology* 17, 5, 1082-1090, 2006.
- [4] Kalamkarov, Alexander L., et al. "Strain measurement in a concrete beam by use of the Brillouin-scattering-based distributed fiber sensor with single-mode fibers embedded in glass fiber reinforced polymer

5ª Reunión Española de Optoelectrónica, OPTOEL '07

- rods and bonded to steel reinforcing bars." Applied optics 41, 24, 5105-5114, 2002
- [5] Chan KT, Zhou, Jin, Lau. "*Strain monitoring in composite-strengthened concrete structures using optical fibre sensors.*" Composites. Part B, Engineering, 32, 33-45, 2001.
- [6] Erdogan, Turan. "*Fiber grating spectra.*" Journal of lightwave technology 15, 8 1277-1294, 1997.
- [7] Meltz, KO, Hill. "*Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview.*" Journal of lightwave technology, 15, 8, 1263-1276, 1997.
- [8] Lau, KT. "*Strain monitoring in composite-strengthened concrete structures using optical fibre sensors.*" Composites. Part B, Engineering 32, 1, 33-45, 2001

Development of a Multi-Point Multi-Parametric Sensor for Structural Health Monitoring

David Barrera¹, Celia Silvestre², Manuel Cruz², Raimundo García-Olcina¹, Alicia Guillamón¹, Maria Luz Lozano³, Vicente Micó³, Jose Juan Esteve³, José Manuel Lloris², M^a José López-Tendero², Jose Antonio Carrión³, Teresa Molina³, Salvador Sales¹.

¹ITEAM Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, Spain.

² Construction Technology Institute, AIDICO

³ AIDO-Technological Institute of Optics, Colour and Imaging
dabarvi@iteam.upv.es

Abstract

In the last years, a lot of optic fiber sensors have been developed for structural health monitoring systems. There are several physical, chemical and environmental factors that contribute to concrete structures deterioration. There is a need to monitor all these factors to explain the produced damages after extended periods. In this paper we present the results from the development of a multi-point and multi-parametric sensor for measure the four main factors that can indicate a possible deterioration problem: strain, temperature, humidity and pH. The sensor proposed here is based on Fiber Bragg Gratings and humidity and pH sensitive hydrogels.

1. Introduction

Due to hard environment conditions and a long-time operation life, concrete structures suffer an internal deterioration that can not be externally appreciated. There are several physical, chemical and environmental factors that contribute to this deterioration: deformation, strain, temperature, wind, humidity, salinity, pH, amongst others. All of them are present in a real structure and need to be considered join together to explain the produced damages over the concrete structure after extended periods. Then, it is advisable to have a control over these environmental parameters. Conventional electrical sensors can measure most of these parameters but in the last years optical sensors have been developed too. The main advantages of optical sensors are well known: electromagnetic immunity, stability and durability

against harsh environments, compact size and lightweight among others. For these reasons fiber optical sensors can provide a superior performance in certain situations.

Although a lot of fiber optic sensing techniques have been developed for use in intelligent health monitoring systems [1-4] there has been a significant interest in developing Fiber Bragg Gratings (FBGs) based sensors because, added to the optical fiber advantages mentioned above, FBGs have also inherent characteristics that make them easy to multiplex and easy to embed, with a low installation maintenance cost. Many different FBGs based sensors have been proposed for health monitoring. Strain and temperature measurements are well documented and have been used frequently in the last years in real concrete structures [5-8]. Humidity and moisture sensors have been proposed too. For example, Yeo et al. proposed a moisture sensor for structural concrete based on FBGs [9] and Arregui et al. proposed an optical fibre sensor for simultaneous measure humidity and temperature using a combination of a FBGs and a Fabry-Perot interferometric sensor [10].

More recently pH optical sensors have been proposed [11-13]. Several schemes are based on swelling hydrogels. For example, in [13] a pH optical sensor based on a hydrogel was presented using optical time domain reflectometry to obtain the optical losses along the optical fiber. But, the previous sensors proposed measures a maximum of two of these deterioration factors at the same time, in addition to this combining different sensors is not always possible due to the different monitoring schemes needs.

In this document we present preliminary results obtained within the project for the development of a multi-point multi-parametric fiber optic-based sensors for measure four of the main factors that contributes to the deterioration of concrete structures: strain, temperature, humidity and pH. Besides, one of the big achievements of this work is the inclusion of different types of hydrogels with the FBGs in order to determine changes in humidity and pH levels, at the same time.

2. Strain and temperature sensors

In a FBG, the refractive index of the optical fiber is modulated upon exposure to ultraviolet light. When a photosensitive optical fiber is irradiated by an ultraviolet laser beam through a phase mask or by holographic recording process, an intense optic interference pattern is created producing a periodic refractive index variation along the core can be permanently recorded. When a broadband light is transmitted through the optical fiber and reaches the FBG, a strong reflection is produced at a given wavelength in that refractive index modulation. This wavelength is known as Bragg wavelength λ_B , which is given by the following relation [14-15]:

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

where Λ is the grating period and n_{eff} the effective refraction index of the fiber core. Due to the dependency between the Bragg wavelength and the grating spatial period, the reflected Bragg wavelength is shifted depending on the different parameters that change the spatial period. In general, the Bragg wavelength shift in a FBG comes from two parameters: strain and temperature. The strain response arises due to both the physical elongation of the sensor and the change in fiber index due to photoelastic effects. The thermal response arises due to the inherent thermal expansions/compressions of the fiber material and the temperature dependence of the refractive index. The shift in Bragg wavelength according with strain and temperature can be expressed using the following equations [16]:

$$\Delta\lambda_B = K_\epsilon \cdot \Delta\epsilon + K_T \cdot \Delta T \quad (2)$$

$$K_\epsilon = (1 - P_e) \lambda_B \quad (3)$$

$$K_T = \left(a + \frac{\left(\frac{dn}{dT} \right)}{n} \right) \lambda_B \quad (4)$$

where $\Delta\epsilon$ is the strain variation, ΔT is the temperature change, K_ϵ and K_T indicates the strain and temperature sensibility, P_e is the effective photoelastic coefficient and a is the coefficient of thermal expansion of the material. The values of the coefficients of the strain and the temperature sensibility can be estimated experimentally. Hence, when only the wavelength shift is measured, the effect of strain and temperature cannot be distinguished. An easy way to isolate the influence of both parameters is to define the FBG sensors in pairs, one in mechanical contact with the structure and the other one isolated from it. In this way, the isolated FBG measures only the wavelength shift due to thermal expansion/compression and using this measure is possible to obtain the wavelength shift only due to strain variation. Figure 1 depicts an experimental setup to discern between FBG's wavelength shifts due to load and due to temperature. Black points in strain FBG array arm represents the joint points between the fiber optic based sensors and the structure under test.

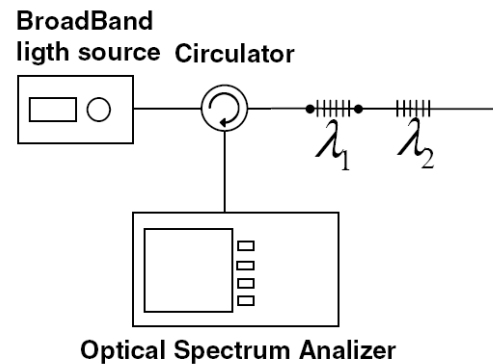


Figure 1. Experimental setup to discern strain and temperature measurements using FBGs.

3. Humidity and pH sensors

The most chemical processes in concrete can be characterized by his pH and humidity levels. Concrete is a basic medium which pH uses to be between 12 and 13 in the pH scale depending on its formulation. So, it is highly interesting to detect pH changes below 12

because this fact shows a real possibility that a frame corrosion process can be generated.

Hydrogels are composed by crossed hydrophilic polymer meshes able to increase its water content up to the 30% of its initial value. By properly selecting the base polymer it can be sensible to a given parameter such as for instance pH or humidity, the resulting polymer mesh will be sensible to changes in such parameter. This property can be used to modify the FBG wavelength spectral response if the hydrogel is integrated in a right configuration with the FBG. Figure 2 shows an image of a hydrogel expansion in comparison with its initial state. For this project one of the considered hydrogel with pH sensibility is the poli-N-vinyl pirrolidona (Poli-NVP). For humidity measurements others hydrogels are also considerer such as polyacrylamide, due to its higher hydration capacity in basic mediums, and the N-isopropyl acrylamide (Poli-NIPAAm) due to its easy manipulation procedure once it is polymerized and by its reproducibility and repeatability in consecutive hydration-deshydration cycles. These materials are been studied and characterized at the laboratory using thermogravimetic analysis (TGA), total reflection attenuation of infrared spectroscopy (ATR-IR), and simple techniques of mass evaluation during hydration-deshydration cycles.



Figure 2. Volume difference between expanded (right) and non-expanded hydrogel (left).

In the FBG spectral response, wavelength shift and reflected optical power change can be distinguished. In order to measure strain, temperature, humidity and pH simultaneously, wavelength shift has been reserved for strain and temperature measurements and optical losses has been used for humidity and pH measurements. Figure 3 shows the experimental setup for the

simultaneous measurement of strain, temperature, humidity and pH.

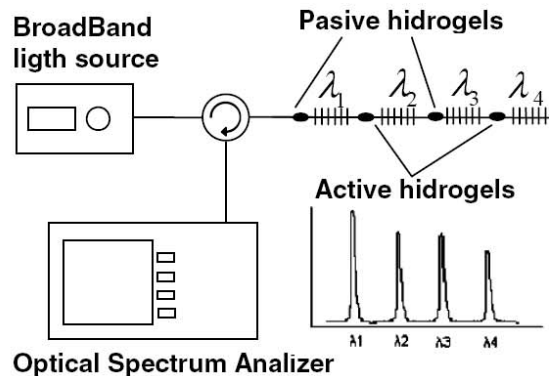


Figure 3. Experimental setup for multi-point sensor.

The FBG is used for measure strain and temperature and at the same time reflects the optical losses from hydrogels. The losses are created by the curvature produced by the hydrogel expansion in the area through the use of a proper transducer.

5. Experimental results

In order to characterize the response of the sensor for strain, temperature, pH and humidity, different tests were performed. The measurements were performed using a Personal Computer connected to an Optical Spectrum Analyzer using a USB-GPIB interface. The reflected optical power and the wavelength at the FBG maximum was recorded using a LabView developed program.

To obtain the FBG strain sensibility K_e , a micrometric placement system was used. One tip of the FBG was adhered to a fix element and the other tip was adhered to a mobile element with a 0.01mm displacement precision. In Figure 4 is shown the results obtained from these tests. The results show a linear response of the FBG with strain. The value of the strain sensibility was $1.15 \text{ pm} / \mu\text{strain}$.

Bare FBG temperature tests were performed in a climatic chamber that was programmed with temperature cycles. Two FBGs of different wavelengths were introduced in the climatic chamber and monitorized at the same time. One of these temperature cycles are shown in figure 5. This figure shows a good agreement of the FBGs with the thermocouple measurements. Figure 6 shows the wavelength shift of a FBG due to temperature changes.

The temperature sensibility factor was obtained from Figure 6 and was 8.12 pm/°C for both FBGs.

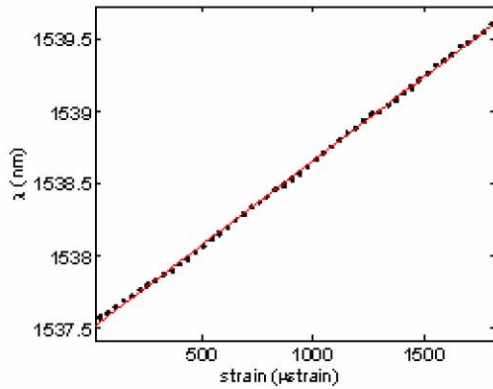


Figure 4. FBG strain characterization.

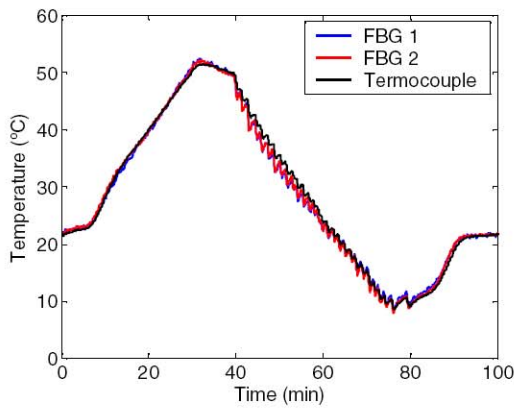


Figure 5. FBG temperature measurements.

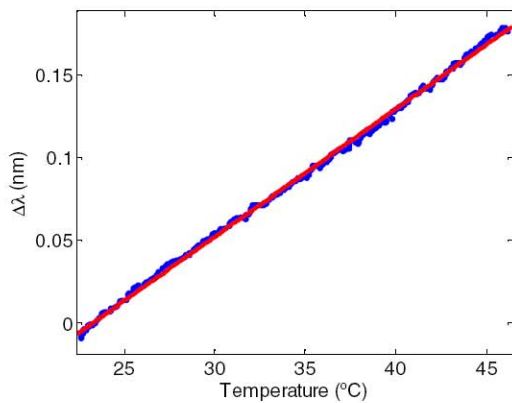


Figure 6. Temperature sensibility coefficient.

Results can be viewed in Figure 7. It can be seen clearly when the sensor were immersed in the distilled water. At this moment, a fall in the reflected optical power was observed due to the manipulation of the sensor. After this moment, the water ingress through a porous membrane till the hydrogel and produces a change in his volume. The transducer translates this volume change into optical losses. In Figure 7, a 9 dB optical attenuation was observed at the final of this measurement, despite this, the FBG reflected wavelength was clearly visible in the optical spectrum analyzer.

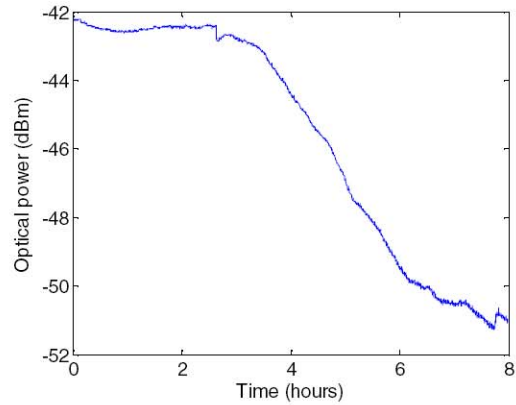


Figure 7. Humidity sensor response.

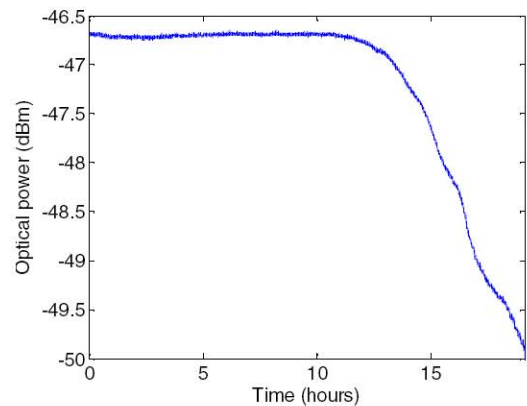


Figure 8. pH sensor response.

For the pH sensors tests a similar process was followed, but utilizing a different hydrogel composition that makes it sensible to pH changes. After a period of time when the hydrogel utilized to observe the passive response of the sensor, it was immersed in an acid dissolution. Figure 8 shows the results obtained. In this case, an optical attenuation of 3.5 dB was observed at the end of the measurement

time. Although time response is not critical for this application, because pH reduction in concrete is normally a slow process, and hydrogel response was observed immediately after the sensor was immersed in the acid dissolution we continue developing the transducer for reduce the time necessary to stabilize the measurement.

6. Conclusions

This paper shows results obtained in the development of a multi-parametric fiber optic sensor based in fiber Bragg gratings and hydrogels that are sensible to changes in humidity and pH and that can vary the spectral response provided by the FBG to measure strain, temperature, pH and humidity along several points of a concrete structure.

7. Acknowledgements

This work is supported by the Spanish Ministerio de Industria, Turismo y Comercio in a PROFIT modality under the project FIT-380000-2005-165 and FIT-380000-2006-63 named "Desarrollo de un sensor multiparamétrico/multipunto de fibra óptica para incorporar en estructuras de hormigón - SEMMAFOHOR".

8. References

- [1] Barnes, RA, et al. "Structural NDE of concrete structures using protected EFPI and FBG sensors." *Sensors and actuators. A, Physical* 126, 2, (2006), 340-347.
- [2] G. Pascale and B. Bonfiglioli. "Internal strain measurements in concrete elements by fiber optic sensors." *Journal of materials in civil engineering* 15, 2, (2003), 125-133.
- [3] Cho, YT, TPNewson, and MNAlahbabi. "Long-range distributed temperature and strain optical fibre sensor based on the coherent detection of spontaneous Brillouin scattering with in-line Raman amplification." *Measurement science & technology* 17, 5, (2006), 1082-1090.
- [4] Kalamkarov, Alexander L., et al. "Strain measurement in a concrete beam by use of the Brillouin-scattering-based distributed fiber sensor with single-mode fibers embedded in glass fiber reinforced polymer rods and bonded to steel reinforcing bars." *Applied optics* 41, 24, (2002), 5105-5114.
- [5] Winter, D, et al. "Structural health monitoring of concrete cylinders using protected fibre optic sensors." *Smart materials & structures* 15.2 (2006):302-308.
- [6] Chan, CC, et al. "Strain monitoring in composite-strengthened concrete structures using optical fibre sensors." *Composites. Part B, Engineering* 32.1 (2001):33-45.
- [7] G. Kister, R.A. Badcock. "Monitoring of an all-composite bridge using Bragg grating sensors" *Construction and Building Materials*, 21, 7, (2007), 1599-1604.
- [8] Yu, L, et al. "Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation." *Engineering structures* 28.5, (2006): 648-659.
- [9] Cox, MAC, et al. "Monitoring ingress of moisture in structural concrete using a novel optical-based sensor approach." *Journal of Physics – Conference Series* 45, (2006):186-192.
- [10] Arregui, F.J., et al. "Simultaneous measurement of humidity and temperature by combining a reflective intensity-based optical fiber sensor and a fiber Bragg grating." *IEEE sensor journal* 2.5 (2002):482-487.
- [11] Lewis, E, et al. "A novel technique for optical-fiber pH sensing based on methylene-blue adsorption." *Journal of lightwave technology* 13.7 (1995):1407-1414.
- [12] Sharma, DK, and BdGupta. "Evanescent wave absorption based fiber optic pH sensor prepared by dye doped sol-gel immobilization technique." *Optics Communications* 140.1-3, (1997):32-35.
- [13] Culshaw, B, et al. "Distributed sensor for water and pH measurements using fiber optics and swellable polymeric systems." *Optics letters* 20.1 (1995):103-105.
- [14] Erdogan, Turan. "Fiber grating spectra." *Journal of lightwave technology* 15, 8 (1997):1277-1294.
- [15] Meltz, KO, Hill. "Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview." *Journal of lightwave technology*, 15, 8, (1997):1263-1276.
- [16] P. Moyo, J.M.W Brownjohn. "Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure." *Engineering structures* 27.12, (2005), 1828-

[17] Zhang, XM, et al. "Fiber optic Bragg grating sensor based on hydrogels for measuring salinity." *Sensors and actuators. B, Chemical* 87.3, (2002):487-490.

[18] Zarjani, RA, et al. "Agarose film coated glass slides for preparation of pH optical sensors." *Sensors and actuators. B, Chemical* 121.2, (2007):396-400.

Fiber Bragg Gratings for measuring pH and strain in Concrete Structures

D. Barrera¹, S. Sales¹, M. Cruz-Yusta², M. L. Lozano³, J. M. Lloris², V. Micó³, R. García-Olcina¹, J. J. Esteve-Taboada³, J. A. Carrión³, M. J. López², T. Molina-Jiménez³.

¹Dpto. de Comunicaciones, iTEAM Research Institute, Universidad Politécnica de Valencia,

A. C/ Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, Spain.

²AIDICO – Instituto Tecnológico de la Construcción,
Avda. Benjamín Franklin 17, 46980 Paterna, Valencia, Spain.

³AIDO - Technological Institute of Optics, Colour and Imaging, C/Nicolás Copérnico 7,
Apartado 139, 46980 Paterna, Valencia, Spain.

ABSTRACT

We show the basic mechanism of optical pH sensors using hydrogels and FBGs. We show the experimental results obtained and the importance of a precise formulation of the hydrogel and an appropriated design of our transducer.

Keywords: optical fibre sensors, pH and strain sensors, intensity and FBG multiplexed sensors

1. INTRODUCTION

Damage caused over civil engineering structures is a growing interest field in the last decades. Concrete structures such as bridges, tunnels, dams, dikes and buildings are subjected to physical and chemical changes that can affect their structural safety. The most important parameters affecting the structure health can be separated in two blocks. The first one is composed by environmental parameters: temperature, humidity and potential of Hydrogen (pH) value. These variations produce changes in the structure that can derive into permanent damages. The second one is concerning mechanical parameters such as load, strain and vibrations. All of them are present in a real structure and need to be considered join together to explain the produced damages over the concrete structure after extended periods. The pH value is a very important parameter to check the health of the concrete structures. The pH value characterizes the level of acidity or alkalinity of an aqueous solution. Concrete is a basic medium, its pH value use to be between 12 and 13. So, it is highly interesting to detect pH changes below 12 because this fact shows a real possibility that a frame corrosion process can be generated [1].

Optical-sensing technologies have come into play in civil engineering and building industry with a high successful factor due to their intrinsic advantages such as immunity to electromagnetic and radio-frequency interference, ability to work under extreme conditions of temperature, pressure and toxic or corrosive environments that can cause the erode and degrade of metals [2].

A lot of types of fibre based sensors have been developed during the past years [2-4]. Intensity-modulated fibre sensors are the simplest photonic sensors, and therefore offer the lowest cost by using inexpensive light sources and non-sophisticated detection methods. However, the issue of distinguishing between sensors has to be addressed when using this type of sensors. Several referencing techniques have been demonstrated for this purpose [3-4]. We are going to use Fibre Bragg Gratings (FBG's). FBGs are simple and easy to manufacture [2-4] and they are not sensitive to the pH changes of the concrete structures. FBGs can be easily multiplexed, has a low maintenance installation cost and can be sensitive to strain, vibration, temperature and humidity. Thus, we are going to use the FBGs to multiplex the intensity pH optical sensors and a quite simple and unexpensive interrogation system. Besides, we will be able to upgrade the system using the properties of the FBG to sense another parameter. In our case, we are interested in strain measurements, achieving a multiparameter sensors that permit the measurement of loads and tensions applied to the structure, just as the pH of the concrete at the measurement point.

There are two main techniques for measuring the pH value using optical fibre sensors: the evanescent wave fiber optic sensors [5-6], and the hydrogel based sensors [7-8]. Evanescent wave fibre optic sensors use an uncladded portion of an optical fibre surrounded by pH sensitive elements, that vary the optical power received in the detector when pH value changes. Hydrogels are composed by crossed hydrophilic polymer meshes able to increase its water content up to the 30% of its initial value. By properly selecting the base polymer it can be sensible to a given parameter such as for instance pH, humidity or salinity [9-10], the resulting polymer mesh will be sensible to changes in such parameter. The volume increase of the hydrogel is used to change one or two parameters of the light. In this letter, we present an application for the measurement of pH values using FBGs and hydrogels. Contrary to previous papers that use hydrogels for measuring relative low changes of the pH values, we are more interested in the detection of high changes of the pH values. This is an indicator of the deterioration processes of the concrete. In the next sections, we show the basic mechanism used for the measurement of this chemical magnitude and the experimental results obtained.

2. PRINCIPLE OF OPERATION

The standard pH value of the concrete is between 12 and 13. A decrease in the pH value means that the concrete is deteriorating. FBGs are generally not sensitive to changes of the pH values. But, the hydrogels can be fabricated to detect changes of the pH value. We have fabricated a hydrogel that expands when the pH value decreases. We can use the volume change in the hydrogel to modify the FBG wavelength spectral response or the optical power received in the detector if the hydrogel is integrated in a right configuration with the FBG. Basically, our structure creates an increase in the losses when the hydrogel expands due to a decrease of a curvature radio, see figure 1. The basic scheme used for the measurement of the pH value is shown at figure 1. It is composed by a broadband light source (ASE), an optical circulator, a coupler, an Optical Spectrum Analyzer (OSA), and a Personal Computer (PC) that registers the power reflected of each sensor. The transducer is placed not around the FBG in order to simplify the fabrication of the optical fibre sensor. The transducer is placed independently of the FBG fabrication process and the FBG does not require a sophisticated protection system to protect it from chemical agents.

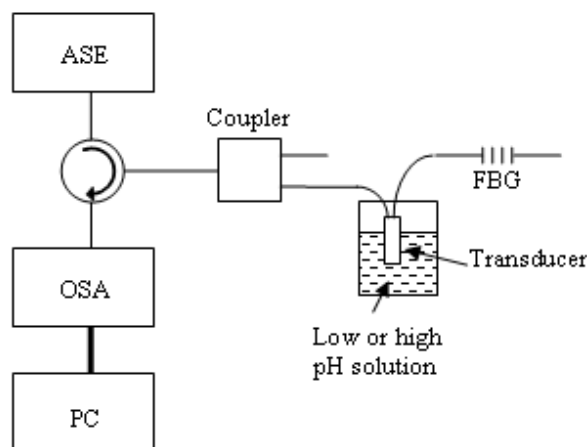


Fig. 1. Basic scheme for pH measurement

In order to be able to multiplex the pH optical sensors and to detect another parameter of the concrete structure (i.e. strain), we have placed the pH optical sensors in between of the FBGs, see figure 2. This configuration enables to distinguish the measurements of the different pH sensors with no ambiguity. The configuration is quite simple and the interrogation system is also quite simple and robust.

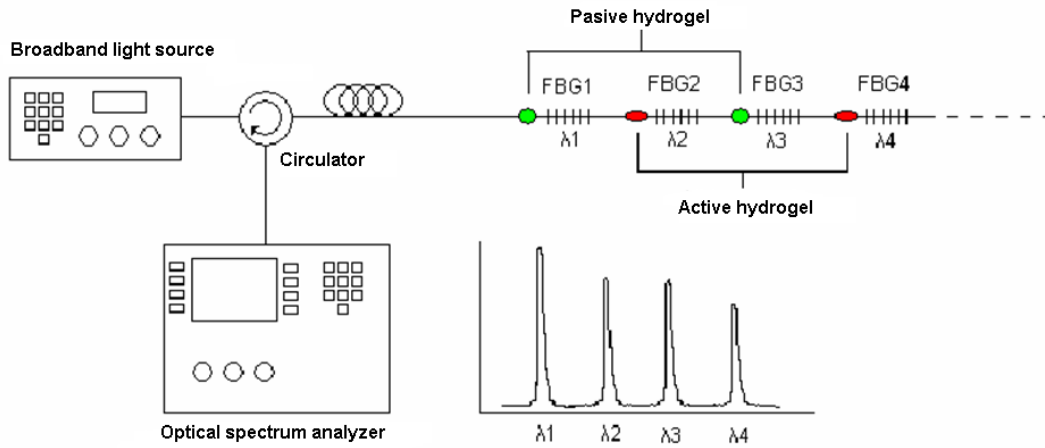
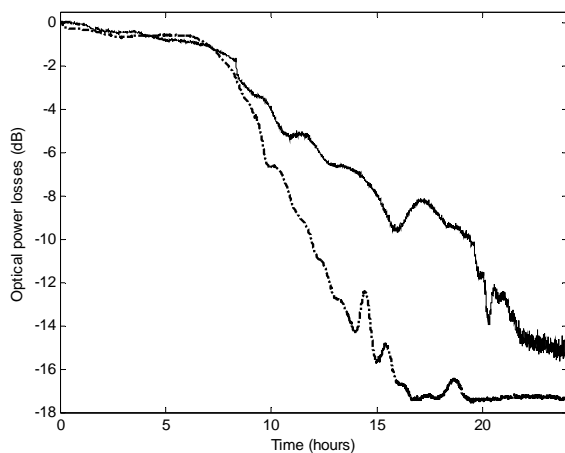


Fig. 2. Basic scheme for pH measurement

3. EXPERIMENTAL RESULTS

In order to check the behavior of the optical pH fibre sensors some solutions with different values of pH have been prepared. Then, the optical fiber sensor has been immersed in these solutions. Whereas in the solution with a pH value higher than 13 has a negligible variation in the response of the optical fibre sensor, less than 0.2 dB changes after 24 hours, low pH solutions induces high curvature losses as hydrogel volume changes (we have observed more than 17 dB of attenuation just in one optical fibre sensor).

Figures 3 shows the responses of two different pH optical sensors immersed in two solutions with the same pH value of 7. The two sensors have different hydrogel formulation. Both of them are based on N-isopropilacrylamide polymer with different concentration of monomers. The first part of the figure shows a period of time where the pH sensor is out of the solution, this will help us to show the stability of the sensors. After this period of time, we immerse the two sensors at the same time and optical power progressively decreases. The solid line shows how after a 2 hours period, the total power received from sensor 1 decreases 14 dB, while the response from the second sensor (the dashed line) is slower and produces less attenuation,



see figure 3.

Fig. 3. Time response of two pH sensors based on different composition of N-isopropilacrylamide

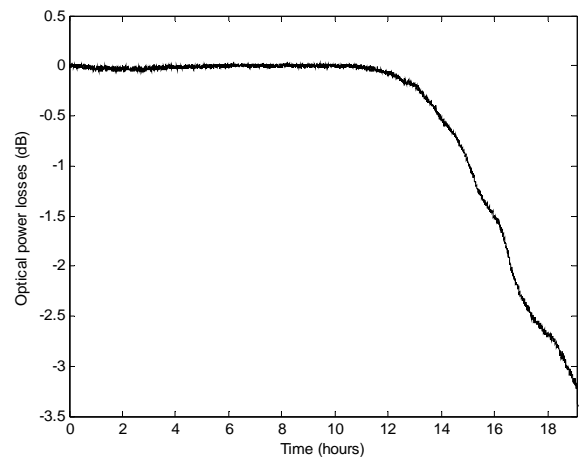


Fig. 4. Time response of special pH sensor optical sensor polymer designed to have variations of the attenuation of only 3 dB.

We have proposed a configuration as the one showed in figure 2, thus it is important the change of attenuation is enough to have a good resolution but it is not good to have too much attenuation because in this case the number of sensors that can be cascaded is reduced. To achieve the proper value of attenuation,

we have re-designed the transducer of the pH sensor and the formulation of the hydrogel to obtain an attenuation of only 3.5 dB, which allows us to cascade more than a dozen of pH sensors. Figure 4 shows the results of this new transducer immersed in a solution with a pH value of 7.

4. CONCLUSIONS

In this letter we show the basic mechanism of optical pH sensors using hydrogels and FBGs. We show the experimental results obtained and the importance of a precise formulation of the hydrogel an appropriated design of our transducer in order to obtain the best performance for our optical sensor. We have obtained changes of the amplitude of the optical power higher than 17 dB in one optical fibre sensor and also we have designed the proper hydrogel and transducer to achieve enough resolution and the availability of cascaded a big number of sensors.

ACKNOWLEDGEMENTS

Financial support from the Spanish Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología within the project TEC2007-68065-C03-01 and the Spanish Ministerio de Industria, Turismo y Comercio in a PROFIT modality under the projects FIT-380000-2005-165 and FIT-380000-2006-63 is acknowledged.

REFERENCES

- [1] Srinivasan, R., Phillips, T. E., Barger, C. B., Carlson, M. A., Schemm, E. R., Saffarian, H.M. "Embedded micro-sensor for monitoring pH in concrete structures" Proc. SPIE Vol. 3988, p. 40-44, Smart Structures and Materials 2000.
- [2] A. Othonos and K. Kalli, "Fiber Bragg Gratings: Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing", Artech House, ISBN 0-89006-344-3 (1999).
- [3] Culshaw B. Optical fibre sensing and signal processing. London: Peregrinus, 1984.
- [4] Grattan KTV, Meggitt BT. Optical fiber sensor technology. London: Chapman and Hall, 1995.
- [5] Takeda, K, et al. "Evanescent-wave spectroscopic fiber optic pH sensor." *Optics Communications* 122.4-6 (1996):122-126.
- [6] Gupta, BD, and NKSharma. "Fabrication and characterization of a fiber-optic pH sensor for the pH range 2 to 13." *Fiber and integrated optics* 23.4 (2004):327-335.
- [7] Ciauriz, Z, et al. "An experimental study about hydrogels for the fabrication of optical fiber humidity sensors." *Sensors and actuators. B, Chemical* 96.1-2 (2003):165-172.
- [8] McKenzie, I., et al. "Distributed pH and water detection using fiber-optic sensors and hydrogels." *Journal of lightwave technology* 13.7 (1995):1415-1420.
- [9] W.C. Michie, B. Culshaw, M. Konstantaki, I. McKenzie, S. Kelly, N. B. Graham, C. Moran 1995, Distributed pH and water detection using fiber-optic sensors and hydrogels, *Journal of Lightwave Technology* Vol. 13, No. 7, 1415-1420
- [10] F. J. Arregui, I. R. Matías, K. L. Cooper, R. O. Claus 2002, Simultaneous measurement of humidity and temperature by combining a reflective intensity-based optical fiber sensor and a fiber Bragg gratinc, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 2, N° 5)
- [9] J. Cong, X. Zhang, K. Chen, J. Xu 2002, Fiber optic Bragg grating sensor based on hydrogels for measuring salinity, *Sensors and Actuators B* 87, 487-490