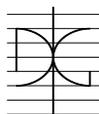


ESTUDIO EXPERIMENTAL DE SENSORES ÓPTICOS TIPO FBG PARA MEDIR DEFORMACIONES Y TEMPERATURAS EN ESTRUCTURAS

Por:
Benjamín Torres Górriz

Noviembre 2009.

Author / Author: Benjamín Torres Górriz	Fecha / Date: Noviembre 2009	
Título / Title ESTUDIO EXPERIMENTAL DE SENSORES TIPO FBG PARA MEDIR DEFORMACIONES Y TEMPERATURAS EN ESTRUCTURAS.		
Directores del trabajo / Supervisores: Dr. Ignacio Paya Zaforteza. Dr. Pedro A. Calderón García.	Código / Coda: CST/MIH-06	Nº páginas / Pagés: 180
Departamento / Departamento: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL		
Universidad / University: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA		 UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA
Palabras clave / Keywords: Rejilla de Bragg, Espectro, Micro deformación, Sensor óptico. Fiber Bragg Grating, Spectrum, Microstrain, Optical Sensor.		
Código Unesco: 3305.05, 3305.99: Instrumentación estructural.		

Benjamín Torres Górriz.
ICITECH, Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil
Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46071 Valencia, España
Tel.: +34 963877000 ext. 75619; fax: +34 963877568
E-mail: bentorgo@upvnet.upv.es

AGRADECIMIENTOS

Empezaré agradeciendo este trabajo al Dr. Pedro Calderón y al Dr. Salvador Sales, ejemplos constantes de capacidad de trabajo. Ellos fueron quienes confiaron en mí y depositaron su confianza para el desarrollo de este trabajo. Les quiero agradecer todo el apoyo, que resulta incalculable, la paciencia, orientación y consejos. Gracias por haberme permitido involucrarme en este proyecto, y ante todo, gracias por brindarme vuestra amistad.

Agradecer al Dr. Ignacio Payá y al Dr. Jose Miguel Adam, fuentes inagotables de ideas. Su ayuda está resultando fundamental para el desarrollo de este trabajo. La constancia, sus correcciones, y su formidable orientación, me está permitido seguir madurando y mejorando en este largo camino, que no ha hecho más que empezar.

Agradecer, por supuesto, al nuevo Dr. Yezid A. Alvarado, a Isabel Gasch y a Antonio Bueno. Son muchas las vivencias que hemos pasado juntos, y mucha la ayuda prestada. Pero lo más importante, es la amistad que ha nacido entre nosotros, que trasciende del ámbito laboral.

Como no, agradecer al personal de los Institutos ICITECH (Instituto y Ciencia de Tecnología del Hormigón) e ITEAM (Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia) toda la ayuda prestada. Especialmente, agradecer a Rai y a Davi, por toda la información y ayuda proporcionada.

Sería injusto olvidarme de los técnicos del laboratorio de Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil. Ellos me han brindado toda la disposición para realizar las pruebas experimentales que engloban el trabajo.

Y gracias a todas aquellas personas que en algún momento habéis contribuido de un modo u otro a este trabajo. Esa contribución no hace falta que sea un archivo Word, una hoja Excel, un artículo científico, o un documento .cad. Esa contribución ha podido ser un saludo, un almuerzo, una comida o un café.

DEDICATORIAS

Casi un año después desde la última vez, me vuelvo a encontrar frente al papel en blanco. Aquella vez, fue debido a mi PFC. Hoy se debe a la Tesina del Máster. En él voy a intentar plasmar unas pocas palabras que recogen mis sentimientos, que no son más que una muestra de cariño hacia los míos:

A mis padres, simplemente porque es lo más importante que tengo y ser los máximos responsables del porqué hoy me encuentro aquí.

A mis dos hermanas, María e Isabel, y a mis dos cuñados, Jose Miguel y Fede. Ellos representan una parte tan importante como imprescindible en mi vida.

A mis cuatro abuelos, Benjamín y Carmen, Pepe y Clotilde. Tenerlos a mi lado es toda una fortuna.

A mis amigos y compañeros. Su apoyo y aprecio, les hace acreedores de un rinconcito muy especial en mi corazón, especialmente para mi hermano Rubén “El Litri”.

Y por supuesto, en último lugar dedicaré este trabajo a las dos personas que hacen que cada día sea especial, de las que me confieso enamorado y que son los cimientos fundamentales de mi vida. Ellas son mis dos sobrinas, Isabel y Mía.

“El hombre encuentra a Dios detrás de cada puerta que la ciencia logra abrir.”

“Son tardes en las que uno pone el corazón. Pones toda tu ilusión y toda tu esperanza. Entonces, cuando pasan esas tardes es verdad que el cuerpo se afloja, se pone en calma.”

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS.

ÍNDICE DE TABLAS.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.

1.1. Introducción.

- 1.1.1- Identificación de la problemática.
- 1.1.2- Defectos habituales en estructuras.
- 1.1.3- Información estadística de la problemática.
- 1.1.4- Importancia de la monitorización estructural.

1.2. Técnicas empleadas en la monitorización de estructuras.

- 1.2.1- Técnicas basadas en Radar y Rayos X.
- 1.2.2- Técnicas basadas en emisión acústica.
- 1.2.3- Técnicas basadas en fotogrametría.
- 1.2.4- Técnicas basadas en termografía.
- 1.2.5- Técnicas basadas en Láser.
- 1.2.6- Técnicas basadas en Flujos magnéticos.
- 1.2.7- Técnicas basadas en extensometría clásica.
- 1.2.8- Técnicas basadas en sistemas ópticos.

1.3. Sistemas integrados de monitorización y control.

1.4. Objetivos, contribuciones y estructura de la Tesina.

- 1.4.1- Objetivos y contribuciones de la Tesina.
- 1.4.2- Estructura de la Tesina.
- 1.4.3- Contexto de desarrollo de los trabajos.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.

2.1. Descripción de trabajos más representativos para la monitorización de estructuras mediante sensores ópticos.

- 2.1.1- Estudio de un encapsulado para un sensor de fibra óptica (P. Moyo et al. 2005).
- 2.1.2- Célula de carga con sensores embebidos (Schulz et al. 2002).
- 2.1.3- Aplicaciones varias en puentes (Schulz et al. 2002).
- 2.1.4- Monitorización del puente Ke-Ya (www.smartec.ch).

- 2.1.5- Monitorización del puente Moskvoretskiy Bolshoi (A. del Grosso et al. 2000).
 - 2.1.6- Monitorización de los puentes gemelos en Suiza, realizado por el Laboratory of Swiss Federal Institute of Technology (Glisic & Inaudi. 1997).
 - 2.1.7- Monitorización del viaducto “Ricciolo” (Branko Glisic et al. 2007).
 - 2.1.8- Monitorización de una pila durante la construcción de un túnel en Los Alpes en Suiza (Daniele Inaudi & Branko Glisic 2007).
 - 2.1.9- Structural Health Monitoring (SHM) en embarcaderos en el puerto de Genoa. (A. del Grosso et al. 2007).
 - 2.1.10- Monitorización de la Iglesia Gandria. (Branko Glisic & Daniele Inaudi. 2001).
 - 2.1.11- Monitorización del puente Götaälv (M. Enckell et al 2007).
 - 2.1.12- Monitorización del puente arco Tranaberg (M. Enckell et al 2007).
 - 2.1.13- Fibra óptica empleada para la monitorización de la retracción a edades muy tempranas (Alan CL Wong et al 2007).
 - 2.1.14- Monitorización de la corrosión de armaduras mediante sensores ópticos. (Pérez 2001).
 - 2.1.15- Control de la socavación en pilas de puentes mediante sensores ópticos (Schulz et al. 2002).
 - 2.1.16- Control de la circulación del tráfico mediante sensores ópticos (Schulz et al. 2002).
- 2.2. Aportaciones del presente trabajo de investigación y conclusiones relativas al Estado del Arte.

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDIDA DE DEFORMACIONES Y TEMPERATURAS EN ESTRUCTURAS MEDIANTE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA.

- 3.1. La fibra óptica.
- 3.2. Redes de Difracción de Gragg.
- 3.3. Principio de funcionamiento de los sensores de fibra óptica tipo FBG.
- 3.4. Elementos que forman un sistema de monitorización óptico.
 - 3.4.1- Modos de onda.
- 3.5. Extensometría clásica versus Monitorización óptica. Ventajas e inconvenientes.
- 3.6. Tipos de sensores de fibra óptica.
 - 3.6.1- Según aplicación.
 - 3.6.2- Según medio sensitivo.
 - 3.6.3- Según el parámetro a medir.
 - 3.6.4- Sensores interferométricos
 - 3.6.4.1- Principio de funcionamiento.
 - 3.6.4.2- Interferómetro Fabry-Perot.

3.6.4.3- Interferómetro SOFO.

3.7. Fase Experimental.

3.7.1- Generalidades.

3.7.1.1- Estudio Experimental.

3.7.1.2- Características de las probetas.

3.7.1.3- Propiedades de los materiales.

3.7.1.4- Instrumentación.

3.7.1.5- Procedimiento de ensayo.

3.7.2- Resultados experimentales.

3.7.2.1- Encapsulado del sensor de deformación.

3.7.2.2- Calibración del sensor de deformación. Coeficiente de sensibilidad de la deformación.

3.7.2.3- Ensayos de compresión.

3.7.2.3.1- Probetas de hormigón.

3.7.2.3.2- Probetas de acero.

3.7.2.3.3- Comparativa con sensores ópticos comerciales.

3.7.2.4- Encapsulado del sensor de temperatura.

3.7.2.5- Calibración del sensor de temperatura. Coeficiente de sensibilidad de la temperatura.

3.7.2.6- Calibración del sensor de deformación frente a variaciones térmicas.

3.7.2.7- Resumen de las sensibilidades de los sensores ópticos.

3.7.2.8- Sensor doble (deformación + temperatura).

3.7.2.9- Compensación térmica de los sensores ópticos.

3.7.2.10- Sensor óptico de deformación embebido en el hormigón.

3.7.2.11- Sensor óptico embebido en el hormigón para medida de retracción.

3.7.2.12- Sensores ópticos embebidos en el hormigón para medida de la evolución de la temperatura interna.

3.7.2.13- Sensor óptico para medir deformaciones en la armadura de una estructura de hormigón armado.

3.7.2.14- Inconvenientes del encapsulado del sensor óptico. Posibles soluciones.

3.7.3- Conclusiones obtenidas.

3.8. Fase Numérica.

3.8.1- Generalidades.

- 3.8.1.1- Propiedades de los materiales empleados.
- 3.8.2- Tipos de elementos finitos y mallado empleado.
- 3.8.3- Condiciones de contorno y aplicación de la carga.
 - 3.8.3.1- Condiciones de contorno.
 - 3.8.3.2- Condiciones de carga.
- 3.8.4- Resultados obtenidos.
 - 3.8.4.1- Pauta general de comportamiento.
 - 3.8.4.2- Estudio de sensibilidad. Espesor de adhesivo empleado.
 - 3.8.4.3- Estudio de sensibilidad. Coeficiente de Poisson del adhesivo X60.
 - 3.8.4.4- Estudio de sensibilidad. Módulo de elasticidad del material del encapsulado.
 - 3.8.4.5- Comparativa con otros encapsulados comerciales.
 - 3.8.4.6- Conclusiones relativas al modelo numérico.
- 3.9. Diseño de un sistema de monitorización y control de estructuras. Desarrollo de un software para interrogación de sensores.
- 3.10. Aplicaciones a obras reales.
 - 3.10.1- Medidas de deformaciones en las losas postesas que forman las terminales de pasajeros del nuevo aeropuerto de Murcia.
 - 3.10.2- Medida de la evolución de temperaturas en un encepado de un puente atirantado en la Ronda Sur de Talavera de la Reina (Toledo).
 - 3.10.3- Medida de las deformaciones en el cajón metálico de la variante Sur Metropolitana de Alonsotegui (Bilbao).

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y PROPUESTAS DE NUEVAS INVESTIGACIONES.

- 4.1. Conclusiones relativas al Estado del Arte.
- 4.2. Conclusiones relativas a la Fase Experimental.
- 4.3. Conclusiones relativas a la Fase Numérica.
- 4.4. Propuestas de nuevas investigaciones.

REREFÉNCIAS.

APÉNDICES.

APÉNDICE 1. Extensometría clásica.

APÉNDICE 2. Características de los materiales emplados.

ÍNDICE DE FIGURAS.

Fig. 1.1 Frontón Recoletos (1935). Vista interior (izquierda) y modelo reducido a escala 1/10 (derecha). (Archivo Torroja – CEHOPU).

Fig. 1.2 Colapso de un puente sobre el río Missisipi en Mineapolis, USA. (www.nytimes.com)

Fig. 1.3 Distribución de fallos según el material estructural empleado (J. Calavera, 2005)

Fig. 1.4 Distribución de fallos según las etapas del proyecto constructivo. (J. Calavera, 2005)

Fig. 1.5 Encuesta GEHO. Distribución de fallos según las etapas del proceso constructivo (J. Calavera, 2005)

Fig. 1.6 Distribución de fallos según la edad de la construcción (J. Calavera, 2005)

Fig. 1.7 Importancia de la monitorización estructural. (Glisic & Inaudi, 2007)

Fig. 1.8 Estudio de la zapata de un muro mediante técnicas de RADAR (Q. Feng, 2003)

Fig. 1.9 Evolución de la fisuración en hormigón armado (Joachim Naumann, 2003)

Fig. 1.10 Sistema de emisión y detección de ondas acústicas (Baifeng et al. 2008)

Fig. 1.11 Puente de Tokyo para inspección mediante técnicas de emisión acústica. (Yuyama S. 2007)

Fig. 1.12 Mallado sobre la pieza de hormigón. Resultados de la fisuración, analizados mediante la técnica de la fotogrametría. (Lange et al. 2006)

Fig. 1.13 Detección de fisuración no detectada mediante inspección visual (M.R. Clark et al. 2003)

Fig. 1.14 Vista de la muralla y del TLS (Diario de Salamanca, 2009)

Fig. 1.15 Daño en el acero, e imperfección detectada mediante el método del flujo magnético (Casas JR. 2006)

Fig. 1.16 Esquema básico de una galga extensométrica (www.hbm.com)

Fig. 1.17 Principio de funcionamiento de los sensores ópticos tipo Fiber Bragg Grating. (P. Moyo, 2005)

Fig. 1.18 Esquema general de un sistema de monitorización (Fraile & García, 1987).

Fig. 2.1 Distribución de las investigaciones realizadas durante los últimos años.

Fig. 2.2 Distribución del empleo de los sensores ópticos en aplicaciones a la ingeniería. (B. Lee 2003).

Fig. 2.3 Diferentes tipologías de encapsulados propuestos. (a) encapsulados a base de fibra de carbono y poliamidas (J.S. Leng 2006). (b) Encapsulado metálico (P. Moyo et al. 2005).

Fig. 2.4 Célula de carga con sensores ópticos FBG embebidos (Schulz et al. 2002)

Fig. 2.5 Puentes instrumentados mediante sensores ópticos (a). Apoyo del tablero de un puente con sensores ópticos embebidos (b). (Schulz et al. 2002 & Eric Udd 2005).

Fig. 2.6 Termopares y sensores ópticos SOFO instalados en la estructura (a). Ley de retracción del hormigón a edades tempranas (b). (www.smartec.ch).

Fig. 2.7 Patologías detectadas en el Puente. Grietas en los tímpanos de piedra (a) y excesiva difusión de cloruros (b). (A. del Grosso et al. 2000).

Fig. 2.8 Imagen de una de las ampliaciones del tablero del puente (a). Sección transversal del puente, con la ubicación de los sensores ópticos (b). (Glisic & Inaudi, 1997).

Fig. 2.9 Comparativa entre las soluciones teóricas calculadas y medidas (Glisic & Inaudi, 1997).

Fig. 2.10 Vista del vano central del Puente (Glisic et al. 2007)

Fig. 2.11 Ubicación de los sensores en la planta del puente (a) y en el alzado (b). (Glisic et al. 2007)

Fig. 2.12 Sensores cruzados en apoyos para control del cortante. (Glisic et al. 2007)

Fig. 2.13 Deformación obtenida por los sensores embebidos en la armadura (a) y sensores cruzados (b). (Glisic et al. 2007).

Fig. 2.14 Vista de los pórticos a la entrada de los túneles (Glisic et al. 2007)

Fig. 2.15 Resultados obtenidos en la pila provisional. Rozamiento pilote-terreno (a). Desplazamiento para cada profundidad (b). (Glisic, 2007).

Fig. 2.16 Vista en planta del puerto de Genua (A. del Grosso et al. 2007)

Fig. 2.17 Sección transversal de los embarcaderos ya reforzados. (A. del Grosso et al. 2007).

Fig. 2.18 Ley de deformaciones de los muros del embarcadero. Los valores máximos se corresponden con gradientes de temperatura importantes. (A. del Grosso et al. 2007).

Fig. 2.19 Vista de la fisuración en el arco y ubicación de los sensores (a). Imagen de una de las grietas y sensor SOFO instalado (b) (Inaudi et al. 2001).

Fig. 2.20 Evolución de la abertura de fisura y evolución de la temperatura ambiente. (Inaudi et al. 2001).

Fig. 2.21 Vista del Puente, durante una de sus maniobras de apertura (M. Enckell et al 2007).

Fig. 2.22 Deformaciones de las caras inferiores de las vigas metálicas (M. Enckel et al. 2007)

Fig. 2.23 Vista lateral del Puente y de las secciones monitorizadas. (M. Enckel et al. 2007)

Fig. 2.24 Ley de temperaturas y deformaciones, proporcionales en su forma (M. Enckel et al. 2007).

Fig. 2.25 Sensores instalados en el interior de las probetas (a). Probetas hormigonadas en condiciones controladas de temperatura y humedad (b) (Allan CL Wong et al. 2007).

Fig. 2.26 Retracción plástica del hormigón y su evolución térmica. (Allan CL Wong 2007).

Fig. 2.27 Comparativa de valores de retracción y temperaturas entre probetas normalizadas y probetas de un tamaño inferior (Allan CL Wong et al. 2007).

Fig. 2.28 Detalle de colocación del sensor tipo FBG de modo perimetral en la armadura (Pérez, 2001).

Fig. 2.29 Instante de la ejecución de la muesca mediante corte con radial (a). Cordón monitorizado mediante galgas (b). Redistribución de tensiones al producirse la rotura de un alambre (c). (Casas, 2002).

Fig. 2.30 Monitorización de la socavación y el descentramiento de las pilas del puente debido al paso de la corriente (Schulz et al. 2002).

Fig. 2.31 Sensores ópticos para control de la circulación del tráfico (Schulz et al. 2002).

Fig. 3. 1 Vista de las capas de una fibra óptica (K-T Lau et al. 2001)

Fig. 3. 2 Ángulo incidente y ángulo crítico. Modo de viaje de la luz a través de la fibra óptica. (www.Wikipedia.es).

Fig. 3. 3 Esquema de una Red de difracción (Barrera, 2008)

Fig. 3. 4 Principio de funcionamiento de los sensores ópticos basados en FBG (K-T Lau et al. 2001)

Fig. 3. 5 Instalación de una FBG en la superficie a monitorizar. Transmisión de deformaciones entre la superficie y la FBG (Barrera et al. 2008)

Fig. 3. 6 Variación en la longitud de onda reflejada por la Red de Bragg

Fig. 3. 7 FBG en serie, sobre un mismo cable de fibra óptica.

Fig. 3. 8 Elementos que forman un sistema de monitorización óptico basado en FBG (Barrera et al. 2008)

Fig. 3. 9 Montaje durante un ensayo. Estrellas pasivas e interrogador.

Fig. 3. 10 Fibra monomodo (Barbachi, 1996)

Fig. 3. 11 Fibra multimodo Step-Index (Barbachi, 1996)

Fig. 3. 12 Fibra Multimodo Graded-Index (Barbachi, 1996)

Fig. 3. 13 Características básicas de las fibras ópticas (Braunstein J. et al. 2002)

Fig. 3. 14 Dobleces en el cableado de fibra óptica, y dificultad para transmitir la luz. (Gerard F. 2005)

Fig. 3. 15 Pérdida de potencia reflejada debido a un doblez en el cableado.

Fig. 3. 16 Sensor tipo Fiber Bragg Grating. Principio de funcionamiento (JS. Leng et al. 2006)

Fig. 3. 17 Reflexión en un IFPI (Quirion et al. 2000)

Fig. 3. 18 Transmisión en un IFPI (Quirion et al. 2000)

Fig. 3. 19 Interferómetro extrínseco Fabry Perot (Quirion et al. 2000)

Fig. 3. 20 Sistemas de monitorización de estructuras SOFO (Glisic & Inaudi, 2007)

Fig. 3.21 Probetas metálicas y de hormigón empleadas en las campañas experimentales.

Fig. 3.22 Prensa empleada para la realización de los ensayos. Laboratorio del ICITECH.

Fig. 3.23 Cámara climática empleada para la realización de los ensayos. Laboratorio del ITEAM.

Fig. 3.24 Probeta de hormigón, con una FBG adherida a su superficie (a). Encapsulado a base de capas de PVC (b). (Gasch, 2008)

Fig. 3.25 Capas en las que se divide el encapsulado propuesto.

Fig. 3.26 Sistema de posicionamiento milimétrico (a). Variación de longitud de onda reflejada (b).

Fig. 3.27 Incremento de la longitud de onda en función del tiempo, para incrementos iguales de deformación en la FBG.

Fig. 3.28 Ajuste de la constante de sensibilidad.

Fig. 3.29 Propiedades de varios sensores ópticos comerciales. Valores del coeficiente de sensibilidad (www.micronoptics.com)

Fig 3.30 Esquema de instalación de los sensores en las probetas de hormigón.

Fig 3.31 Probeta de hormigón monitorizada, antes (a) y después (b) de la rotura.

Fig 3.32 Obtención de la curva de deformación a partir de la curva de longitud de onda reflejada.

Fig 3.33 Comparativa entre deformaciones de galgas y de sensores ópticos.

Fig 3.34 Probeta metálica colocada en la prensa.

Fig 3.35 Comparativa de resultados entre sensores ópticos y galgas sobre probetas metálicas.

Fig 3.36 Configuración del encapsulado de un sensor comercial (Moyo et al. 2005).

Fig 3.37 Comparativa de las deformaciones entre galgas y sensores ópticos comerciales. Sensor de fibra de carbono (a) y sensor de poliamida (b).

Fig 3.38 Diferentes tipos de sensores ópticos comerciales (www.fibersensing.com)

Fig 3.39 Encapsulado del sensor óptico de temperatura.

Fig. 3.40 Termopar y sensor óptico para medida de temperatura

Fig. 3.41 Evolución de la temperatura ambiente, comparación y calibración de los sensores ópticos.

Fig. 3.42 Probetas metálicas y de hormigón en el interior de la cámara climática.

Fig. 3.43 Evolución de temperaturas y calibración del sensor óptico adherido al hormigón.

Fig. 3.44 Ajuste del sensor óptico adherido al hormigón, con la temperatura objetivo de la cámara.

Fig. 3.45 Ajuste para el sensor óptico adherido al hormigón (a), y adherido a la probeta metálica (b), con la temperatura objetivo de la cámara climática.

Fig. 3.46 Ajuste del sensor de deformación en probeta de hormigón (a), y probeta metálica (b).

Fig. 3.47 Configuración y disposición del sensor doble.

Fig. 3.48 Resultados obtenidos para el sensor óptico doble.

Fig. 3.49 Funcionamiento incorrecto del sensor doble.

Fig. 3.50 Sensor óptico embebido en el hormigón una vez llevado a cabo el ensayo (a). Imagen del cableado empleado para una mejor protección (b).

Fig. 3.51 Comparativa de resultados entre sensores ópticos embebidos y laterales de superficie.

Fig. 3.52 Pérdida de potencia reflejada. Se produce en el segundo 450 desde el comienzo del ensayo

Fig. 3.53 Deformaciones de los sensores laterales y embebidos. Todos ellos indican la rotura en un punto próximo a un nivel de deformación de $2000\mu\epsilon$, que corresponde a un 2 % en compresión simple.

Fig. 3.54 Probeta prismática normalizada y ubicación del sensor óptico. Posición genérica de los sensores en el interior de una probeta.

Fig. 3.55 Evolución de los espectros durante las 5 primeras horas del ensayo. Sensor 1 (a), sensor 2 (b), sensor 3 (c)

Fig. 3.56 Acortamiento sufrido por las tres probetas de hormigón durante las primeras horas tras el hormigonado.

Fig. 3.57 Termopar y sensor óptico que serán embebidos en el hormigón (a). Probetas de hormigón instrumentadas (b).

Fig. 3.58 Curvas de evolución de la temperatura del hormigón frente al tiempo, medida por los sensores ópticos y por los termopares.

Fig. 3.59 Curvas de temperaturas de sensores ópticos y termopares.

Fig. 3.60 Evolución del espectro del sensor óptico durante el ensayo.

Fig. 3.61 Imagen del armado del nudo viga-soporte (a). Galgas y sensores ópticos adheridos sobre la armadura, señalados en rojo (b).

Fig. 3.62 Imagen de la probeta en el pórtico de ensayo.

Fig. 3.63 Leyes de deformaciones de los sensores ópticos instalados en las armaduras de la probeta.

Fig. 3.64 Evolución del espectro, antes y después del ensayo.

Fig. 3.65 Aleatoriedad en los pelos de la fibra de vidrio y afección sobre la red de Bragg.

Fig. 3.66 Esquema de mezclado de la fibra de vidrio y la resina de poliéster, con las proporciones adecuadas (www.glaspol.net)

Fig. 3.67. Imagen de las probetas durante la fabricación (a). Instante del ensayo (b).

Fig. 3.68 Sección transversal del encapsulado, adhesivo y superficie a monitorizar (a). Trabajo con el microscopio durante una medición (b).

Fig. 3.69 Probeta instrumentada con galgas, y dirección de aplicación de la carga en el ensayo.

Fig. 3.70 Curva tensión-deformación de una de las probetas de fibra de vidrio tratada con resina de poliéster.

Fig. 3.71 Tramo inicial de la curva tensión-deformación, y ajuste para obtener el módulo de elasticidad del material compuesto (a). Resumen de los módulos de elasticidad obtenido en las 6 probetas ensayadas.

Fig. 3.72 Valores del módulo de elasticidad en diferentes materiales compuestos. (Exequiel Rodríguez, 2003).

Fig. 3.73 Variación del coeficiente de Poisson con la carga en una de las probetas ensayadas (a). Resumen de los diferentes Coeficientes de Poisson en las diferentes probetas (b)

Fig. 3.74 Sección transversal de una fibra óptica empleada.

Fig. 3.75 Valores del módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson de distintos materiales (www.materiales.eia.edu)

Fig. 3.76 Imágenes del microscopio, donde se observa el espesor del adhesivo con la escala.

Fig. 3.77 Dimensiones y formas del encapsulado, del adhesivo y de la fibra óptica.

Fig. 3.78 Elemento BRS3 (Elemente Reference Manual. Lusas Version 14. Issue 2).

Fig. 3.79 Elemento HX20. (Elemente Reference Manual. Lusas Version 14. Issue 2).

Fig. 3.80 Mallado de la fibra óptica (a), del adhesivo comercial HBM (b) y del encapsulado (c).

Fig. 3.81 Imagen del mallado empleado para el adhesivo comercial HBM y el encapsulado, mediante elementos HX20.

Fig 3.82 Ratio entre los lados del elemento finito para garantizar el correcto funcionamiento del programa.

Fig 3.83 Planos de simetría del conjunto encapsulado, fibra óptica y adhesivo.

Fig 3.84 Planos de simetría, XY, ZY.

Fig 3.85 Plano inferior, movimiento restringido según el eje Y.

Fig 3.86 Cuadro con las propiedades del adhesivo empleadas en el modelo teórico.

Fig 3.87 Malla deformada del conjunto que integra el modelo. Espesor de adhesivo de 100 μ m.

Fig 3.88 Malla deformada del conjunto que integra el modelo. Espesor de adhesivo de 600 μ m

Fig 3.89 Comparativa de las deformaciones del plano (a), y de la fibra óptica (b).

Fig. 3.90 Gradiente de deformaciones que se produce en la base inferior del sensor óptico. Sección transversal del encapsulado.

Fig. 3.91 Ley de error en función del espesor de adhesivo empleado, para un valor $\nu=0.2$

Fig. 3.92 Espesor de adhesivo empleado normalmente en las operaciones de pegado. Las imágenes son captadas por un microscopio.

Fig. 3.93 Especificaciones técnicas del adhesivo comercial HBM. No existen datos relativos al valor del coeficiente de Poisson (www.hbm.com).

Fig. 3.94 Ley de error en función del coeficiente de Poisson adoptado.

Fig. 3.95 Ley de error en función del Coeficiente de Poisson

Fig. 3.96 Ley de error en función del módulo de elasticidad del material de encapsulado.

Fig. 3.97 Ley de error en función del adhesivo, para un módulo de Elasticidad de 11.3 GPa (Valor mínimo) y para un Coeficiente de Poisson de 0.4 (Valor máximo).

Fig. 3.98 Esquema de algunos encapsulados de sensores ópticos comerciales (Okabe et al. 2002).

Fig. 3.99 Esquema de algunos encapsulados de sensores ópticos comerciales (Moyo et al. 2005)

Fig. 3.100 Mallado empleado para modelizar un sensor óptico comercial.

Fig. 3.101 Gradiente de deformaciones que se produce en la base inferior del sensor óptico comercial. Sección transversal del encapsulado

Fig. 3.102 Comparativa de la ley de errores de los sensores ópticos comerciales y el sensor óptico ICITECH-ITEAM. ($\nu=0.2$).

Fig. 3.103 Comparativa de la ley de errores de los sensores ópticos comerciales, con diferentes espesores de la capa inferior de encapsulado y el sensor óptico ICITECH-ITEAM

Fig. 3.104 Pantalla del software para programar la captura de datos.

Fig. 3.105 Pantalla de visualización de los espectros en tiempo real..

Fig. 3.106 Pantalla donde se observa el valor de las deformaciones y temperaturas, con los umbrales límites de funcionamiento.

Fig. 3.107 Imagen de una de las losas postesas en el Aeropuerto de Murcia.

Fig. 3.108 Plano de ubicación de algunos sensores ópticos en la losa postesa.

Fig. 3.109 Protecciones adoptadas para el sensor óptico.

Fig. 3.110 Leyes de deformaciones en función del tiempo de los sensores ópticos.

Fig. 3.111 Leyes de deformaciones en función del tiempo de los sensores ópticos.

Fig. 3.112 Leyes de deformaciones en función del tiempo de los sensores ópticos.

Fig. 3.113 Imágenes de los sensores ópticos instalados en el interior del encepado (a) y encargado de medir la temperatura ambiente (3).

Fig. 3.114 Comparativa de la evolución de la temperatura Sensor óptico-Chari en el centro de gravedad y en el lateral del encepado.

Fig. 3.115 Evolución de la temperatura ambiente y gradiente existente entre el centro de gravedad y el paramento lateral.

Fig. 3.116 Evolución de temperaturas en una losa de la Torre Sacyr Vallehermoso durante su construcción. (Hermoso et al.2008)

Fig. 3.117 Evolución de temperaturas en una losa de hormigón. Torre Espacio (Calzón et al 1008)

Fig. 3.118 Vista del cajón metálico que formará la variante Sur Metropolitana de Bilbao.

Fig. 3.119 Ubicación de los sensores ópticos dentro de la sección transversal del cajón.

Fig. 3.120 Lanzamiento del cajón metálico, hasta apoyo de la nariz en la pila. En color se muestran las secciones instrumentadas.

Fig. 3.121 Leyes de deformaciones en función del tiempo en la sección 1 del cajón metálico.

Fig. A.1 Barra cilíndrica sometida a una fuerza axial (Fraile & García, 1987).

Fig. A.2 Materiales empleados en la fabricación de galgas. (Casas, 2002).

Fig. A.3 Puente de Wheatstone (www.hbm.com).

Fig. A.4 Imagen de una banda extensométrica de circuito impreso. (Fraile & García, 1987).

Fig. A.5 Galgas semiconductoras (Fraile & García, 1987).

Fig. A.6 Deriva de las bandas extensométricas. (Fraile &García, 1987).

Fig. A.7 Puente de Wheastone (Casas, 2002).

Fig. A.8 Monyaje en $\frac{1}{4}$ de puente. (Fraile & García, 1987).

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.1 Cuadro resumen con las principales aplicaciones, ventajas e inconvenientes de las técnicas de medición de estructuras.

Tabla 2.1 Principales estudios relacionados con la tecnología de la fibra óptica en el sensado de elementos.

Tabla 2.2 Principales aplicaciones realizadas con la tecnología de la fibra óptica en el sensado de elementos.

Tabla 3. 1 Cuadro resumen con los diferentes tipos de sensores.

Tabla 3. 2 Dosificación del hormigón convencional.

Tabla 3. 3 Características técnicas de la fibra de vidrio empleada. (www.fibercomposite.com)

Tabla 3. 4 Resumen de las sensibilidades calibradas en los sensores ópticos.

Tabla 3. 5 Variaciones en los valores de las sensibilidades, en %.

Tabla 3. 6 Sensibilidades y deformaciones medidas por los sensores ópticos.

Tabla 3.7 Resumen de las propiedades de los materiales a emplear.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN, ANTECEDENTES Y OBJETIVOS.

1.1- Introducción.

La monitorización de estructuras (*structural health monitoring -o SHM-* en inglés) es una rama de la ingeniería estructural dedicada al desarrollo de sistemas que proporcionen información sobre cualquier cambio significativo o daño que se produzca en una estructura (www.ishmii.org)

El establecimiento formal de esta disciplina es relativamente reciente. Por ejemplo, la *International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure* fue fundada en el año 2003 y el primer número de la revista más antigua dedicada íntegramente a esta disciplina, el "*Journal of Intelligent Material Systems & Structures* ", apareció en el año 1990. No obstante, el interés por conocer el comportamiento real de las estructuras es muy anterior. Ya los ingenieros ingleses como Thomas Telford, Isambard Brunel y Robert Stephenson aplicaron en el S. XIX métodos experimentales para diseñar y comprobar la seguridad de estructuras, cuyo comportamiento exacto eran incapaces de predecir por las limitaciones de los métodos de cálculo existentes (Billington, 1985). En España, probablemente sea Eduardo Torroja el gran pionero de la instrumentación estructural. Su deseo por desarrollar nuevas formas con estructuras laminares como la cubierta del Mercado de Algeciras y la cubierta del Frontón Recoletos en Madrid (Figura 1.1), le llevó a crear modelos reducidos de las mismas, y en el segundo caso, incluso a instrumentar también la obra real. Como no existían empresas o instituciones que pudieran realizar estos trabajos, Torroja fundó en los años 30 del siglo pasado la empresa Investigaciones de la Construcción (ICON) y la entidad de carácter privado "Instituto de la Construcción y la Edificación" (Antuña J., 2002). Esta entidad fue el germen del Instituto Técnico de la Construcción y el Cemento creado en 1949 que, a su vez, pasó a llamarse "Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja" tras la muerte del insigne ingeniero en 1961.

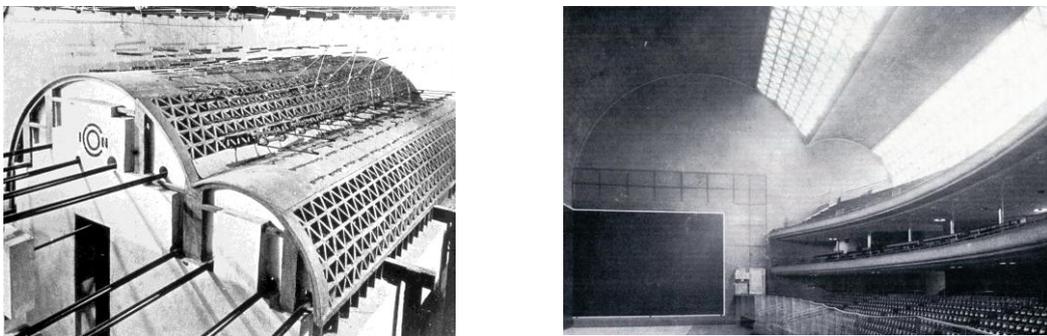


Fig. 1.1 Frontón Recoletos (1935). Vista interior (izquierda) y modelo reducido a escala 1/10 (derecha). (Archivo Torroja – CEHOPU).

La monitorización estructural tiene una gran importancia y desarrollo hoy en día. Algunas de las causas de este auge son:

- Conforme aumenta su nivel de desarrollo, los países tienen menos infraestructuras nuevas que construir y más infraestructuras antiguas que mantener y conservar. Los SHM permiten disponer de datos que ayuden a optimizar la gestión de infraestructuras y garantizar su seguridad.
- Los avances científicos y tecnológicos hacen que hoy en día sea posible proyectar y construir estructuras cada vez más complejas. En estos casos, los datos proporcionados por los SHM permiten comprobar que el comportamiento real de las estructuras se corresponde con el previsto en proyecto. De este modo, se garantiza tanto la seguridad de la estructura como los grados de confort requeridos por el propietario.
- Los accidentes recientes de algunas estructuras como el colapso del puente metálico en Minneapolis (USA) el 2 de agosto del año 2006 (Figura 1.2), han sensibilizado a la opinión pública sobre la importancia de invertir en el mantenimiento y gestión de las infraestructuras.



Fig. 1.2 Colapso de un puente sobre el río Missisipi en Mineapolis, USA. (www.nytimes.com)

Un sistema de monitorización se compone de los siguientes elementos: Transductores, sistema de procesado y acondicionado de la señal, línea de transmisión, y sistema de procesado y registro de datos. Esta Tesina se centra en uno de ellos: los sensores de fibra óptica (transductores) empleados para la medida de deformaciones y temperaturas en estructuras. Se resumen a continuación una serie de aspectos básicos referentes a la monitorización estructural y las principales técnicas empleadas para la monitorización de estructuras.

1.1.1- Identificación de la problemática.

El deterioro y patología de estructuras es un campo de investigación que últimamente está recibiendo una gran 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. En ocasiones, los costes de mantenimiento de infraestructuras son tan altos que se dan situaciones en las que superan a los costes de inversión en nuevas construcciones. Además, los avances científicos y tecnológicos han posibilitado construcciones de mayor complejidad, más esbeltas y de mayor luz. A esto hay que añadir que la seguridad de una estructura durante el proceso constructivo, es uno de los factores más importantes a tener en cuenta para establecer los plazos. Cabe citar que un importante número de publicaciones, p.e., Eldukair y Ayyub (1991), Kaminetzky y Stivaros (1994), Feld y Carper (1997), Epaarachchi et al. (2002), Azkune (2007), coinciden en que una de las etapas más críticas para la seguridad de una estructura, es precisamente su construcción. Este hecho queda de manifiesto al observar que un gran número de colapsos de estructuras se presentan durante el proceso constructivo.

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 expertos que analizan algunos parámetros de la misma, 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 su monitorización mediante dispositivos que permitan un control continuo, remoto y simultáneo de aquellos parámetros que determinen la integridad estructural.

Las técnicas existentes capaces de proporcionar información del comportamiento estructural son extremadamente variadas (Ver J. Calavera, 2005). Algunas de ellas son los métodos de ensayos no destructivos, los sistemas de medición de geometría de estructuras, o sistemas de medición de deformaciones. En el caso de esta Tesina, se desarrollará la técnica de medición de deformaciones y temperaturas mediante sistemas ópticos.

La monitorización estructural mediante un sistema óptico 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 deformaciones o temperatura, 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.

1.1.2- Defectos habituales en estructuras.

Resulta útil y fundamental definir la naturaleza y el carácter de los problemas de patologías. Conociendo el origen de los mismos, es posible llevar a cabo un seguimiento más eficaz. Además, la clasificación de defectos y patologías, resulta importante para futuras construcciones. De este modo, se puede planificar la monitorización del parámetro responsable

del daño, y conocer la evolución del mismo en cualquier momento de la vida útil de la estructura.

Las causas de estos problemas presentan tres orígenes diferentes: Concepción, materiales y ejecución (LCPC, 1984).

En lo que respecta a defectos de concepción, podemos definir tres tipos:

- Mal diseño de la estructura o de alguno de sus elementos estructurales.
- Debidos a errores de cálculos, tanto operativos como conceptuales: adopción de hipótesis erróneas o incompletas, olvido de determinadas acciones, etc.
- Los debidos a una excesiva simplificación del problema, que conduce a ignorar efectos no despreciables, tales como esfuerzos de segundo orden.

En lo que respecta a los materiales, podemos citar:

- Mala calidad de los hormigones: Hormigones porosos, entre otros.
- Empleo de materiales no adecuados: aceros sensibles a la corrosión bajo tensión.
- Incompatibilidad entre materiales empleados.

Por último, los defectos debidos a una mala ejecución pueden ser muy diversos, y entre los más importantes podemos citar:

- Defectos geométricos.
- Defecto de puesta en obra.
- Defectos causados por un almacenamiento deficiente del material: presencia de corrosión en el acero.

Debemos señalar también un defecto menos frecuente, pero que tiene tendencia a ir en aumento. Éste es el que deriva de la utilización de nuevas técnicas por personal no suficientemente especializado.

La clasificación aquí realizada presenta una gran importancia, puesto que muchas de estas causas de daños y patologías pueden ser controladas mediante la monitorización de un parámetro importante, que represente la evolución de la estructura.

1.1.3- Información estadística de la problemática.

Durante muchos años, ha existido un acentuado interés en conocer, dentro de las diferentes fases en que se divide la vida útil de una estructura, la concentración de fallos que se presentan, así como la siniestralidad de la construcción en general (Ver J. Calavera, 2005). El objetivo no es otro que disponer de la máxima información al respecto, para llevar a cabo un control y seguimiento sobre estos defectos, fallos y patologías.

Algunas conclusiones que se pueden extraer de la búsqueda de información, es que los materiales tienen una incidencia relativamente baja en la producción de fallos, en comparación con las fases de Proyecto, Construcción y Uso y Mantenimiento. Fundamentalmente, esta razón se debe a que el campo de fabricación de Materiales presenta un carácter mucho más industrial que el resto de actividades de la construcción. En contra, se va registrando en el tiempo un incremento del “porcentaje” de siniestros debidos al uso y mantenimiento (Ver J. Calavera, 2005).

A continuación se muestra una clasificación de fallos, que fue realizada por el *Bureau Securitas*, sobre una serie de 10.000 fallos declarados a las compañías de seguros (Ver J. Calavera, 2005).

La distribución de estos fallos según el material estructural utilizado es del 86% para el hormigón armado, mientras que un 7% es para la construcción metálica y estructura mixta, respectivamente (Figura 1.3).

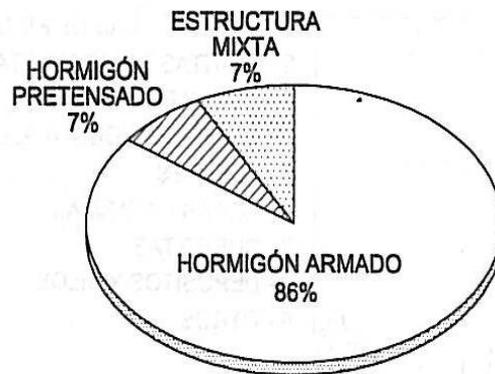


Fig. 1. 3 Distribución de fallos según el material estructural empleado (J. Calavera, 2005)

En cuanto a la distribución de fallos que tienen lugar según las etapas del proceso constructivo, queda patente la preponderancia e importancia de las etapas de proyecto y ejecución (Figura 1.4).

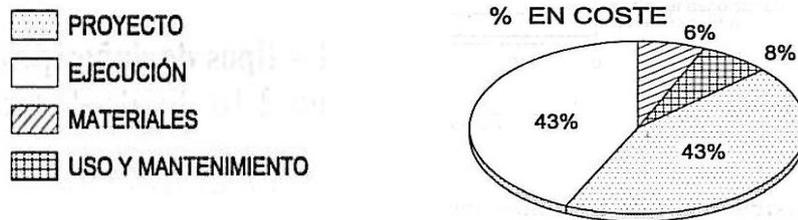


Fig. 1. 4 Distribución de fallos según las etapas del proyecto constructivo. (J. Calavera, 2005)

Sin embargo, según la encuesta realizada por el GEHO (Grupo Español del Hormigón) la distribución de la situación española presenta datos alarmantes y que llaman la atención (Figura 1.5).



Fig. 1. 5 Encuesta GEHO. Distribución de fallos según las etapas del proceso constructivo (J. Calavera, 2005)

En este caso, el porcentaje de fallos que tiene lugar durante las etapas de uso y conservación resulta ser de un 21%. Esta cifra pone de manifiesto la importancia del empleo de un sistema de monitorización y control, que sea capaz de instrumentar la integridad de las construcciones.

Además, si recopilamos los datos referentes a los fallos según la edad de las construcciones, se observa que la concentración de fallos tiene lugar o bien durante la construcción, o bien a largo plazo, en construcciones con edades superiores a 10 años (Figura 1.6).

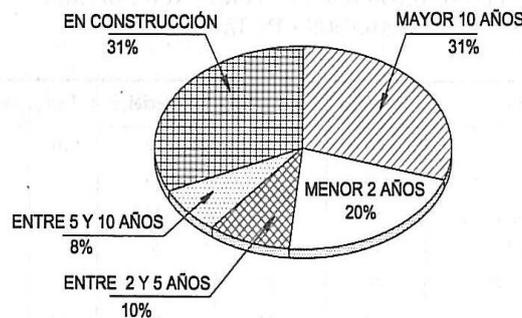


Fig. 1. 6 Distribución de fallos según la edad de la construcción (J. Calavera, 2005)

De nuevo, se pone de manifiesto la necesidad de un sistema que informe en tiempo real del estado de la estructura, durante la fase de construcción, o durante la fase de explotación y uso.

1.1.4- Importancia de la monitorización estructural.

Las estructuras civiles se encuentran presentes en cada sociedad, independientemente de su cultura, religión, localización geográfica y desarrollo económico. Éstas afectan directamente a la sociedad, ecología, economía, cultura y a la estética de la ciudad. Por lo tanto, la meta que se debe perseguir en toda estructura, no sólo es el buen diseño y la calidad de la construcción, sino también, una segura y duradera explotación.

No obstante, una estructura puede ser reparada o modificada, dependiendo de las necesidades existentes durante su etapa de servicio. Si la estructura se encuentra monitorizada, los datos obtenidos en tiempo real nos informarían de su comportamiento, y la actuación se realizaría más temprana en el tiempo, y por tanto, con una mejor planificación.

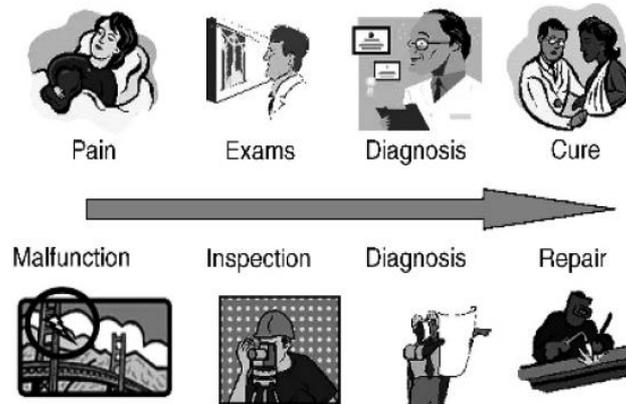


Fig. 1. 7 Importancia de la monitorización estructural. (Glisic & Inaudi, 2007)

En la Figura 1.7, y gracias a un sistema de monitorización, el funcionamiento incorrecto de la estructura, se detecta en tiempo real, y por tanto, la inspección, el diagnóstico y la reparación tienen lugar de un modo más temprano, probablemente cuando la inspección visual no detectaría ningún tipo de patología.

Profundizando algo más al respecto, el proceso de monitorización estructural juega un papel fundamental en:

- Gestión estructural:

Los datos obtenidos mediante un sistema de monitorización, pueden emplearse para optimizar labores de mantenimiento, reparación o rehabilitación.

Si las estructuras presentan deficiencias que no pueden ser identificadas mediante inspección visual, la monitorización aumenta la seguridad estructural, además de que el coste de reparación es menor, ya que el tiempo de intervención también lo es.

También cabe la posibilidad de que algunas estructuras estén en mejores condiciones de las supuestas inicialmente. En estos casos, la monitorización permite aumentar los márgenes de seguridad sin tener que realizar ninguna intervención. Por tanto, una pequeña inversión en el inicio del proyecto, conduce a un ahorro importante a largo plazo.

- Incremento de la seguridad:

El mal funcionamiento de una estructura puede conllevar consecuencias serias. La más grave de todas, es aquella en la que el accidente implica pérdida de vidas humanas, aunque existen otras de menor importancia, como la de dejar a una estructura fuera de servicio temporalmente. Por

ello, la monitorización de una estructura supone un incremento importante de la seguridad de la misma.

- Mejora de conocimientos:

Como se ha comentado anteriormente, la monitorización ayuda a mejorar y ampliar el conocimiento sobre una estructura, y supone una importante herramienta para la calibración de modelos numéricos empleados a predecir el comportamiento de la misma.

Además, analizar el comportamiento de una estructura en condiciones reales o en laboratorio, puede ayudar a mejorarlas en un futuro. Esto puede conducir a una construcción más barata, más segura y más duradera con una fiabilidad aumentada. No obstante, debemos apuntar que la diversidad estructural debida a factores como la región geográfica, influencias ambientales, propiedades del suelo, o cargas, hacen imposible tener un conocimiento absoluto y generalizado de todo tipo de estructuras (Glisic et al. 2007).

Los sistemas de monitorización pueden ser empleados durante periodos cortos, largos e intermitentes de forma periódica. Para algunas aplicaciones, la monitorización de forma periódica puede proporcionar resultados importantes y satisfactorios, pero la información entre dos monitorizaciones es desconocida. El único modo de obtener un registro completo de la vida de una estructura se consigue mediante una monitorización continuada en el tiempo.

En cada aplicación concreta, será requerido un tipo diferente de interrogación. Ello dependerá del parámetro que se desee monitorizar, y la importancia del mismo. Estos parámetros que son susceptibles a ser monitorizados pueden ser de varios tipos, aunque los más usuales son:

- Parámetros físicos: Posición, deformaciones, inclinaciones, fuerzas, aceleraciones, tensiones, presiones y vibraciones.
- Parámetros químicos: Ph, humedades, concentraciones de cloro.
- Temperatura.
- Parámetros ambientales: Temperatura del aire, velocidad del viento, precipitaciones.

1.2-Técnicas empleadas en la monitorización de estructuras.

A continuación se explican los principales sistemas que se emplean para tomar medidas en estructuras, junto con algunos ejemplos de su aplicación, y un resumen de sus ventajas e inconvenientes.

1.2.1- Técnicas basadas en radar y rayos x

Estas técnicas resultan de importante aplicación para evaluar las condiciones del hormigón en cimentaciones, puentes, edificios o túneles. La metodología consiste fundamentalmente en inferir el estado de la estructura a partir de la medición de la respuesta ante un estímulo, tal como un impacto, o una radiación electromagnética. Se obtiene un espectro gráfico de respuesta, que debe interpretar un experto.

✓ Técnicas de Radar (*Radio Detection And Ranging*)

Es un sistema que usa ondas electromagnéticas, y su funcionamiento se basa en emitir un impulso de radio, que se refleja en el objetivo y se recibe en la misma posición del emisor. A partir de este "eco" se puede extraer gran cantidad de información (Koji Otsuka et al. 2003).

Se usa principalmente para:

- Localización de armaduras y fisuración.
- Exploración de anclajes.
- Detección de objetos en el suelo, instalaciones y cimentaciones (Figura 1.8)

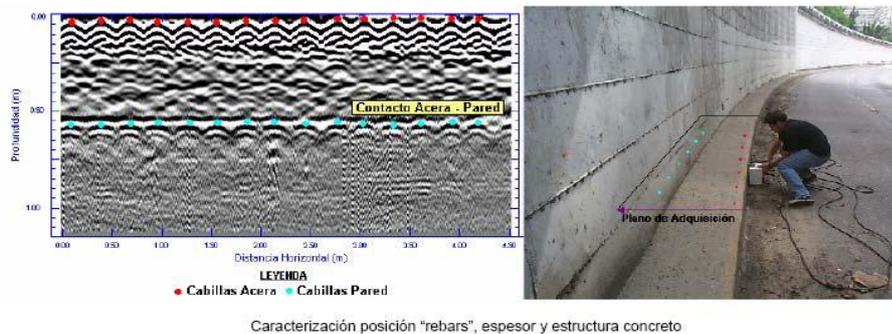


Fig. 1. 8 Estudio de la zapata de un muro mediante técnicas de RADAR (Q. Feng, 2003)

✓ Técnicas de Rayos X.

La denominación rayos X, designa a una radiación electromagnética, invisible, capaz de atravesar cuerpos opacos y de impresionar las películas fotográficas (Joachim Naumann et al. 2003). Los rayos X convencionales ofrecen la imagen desde una cara del objeto de estudio, y así, regiones internas al objeto, quedan oscurecidas por irregularidades o densidades que ofrecen una sombra a la radiación (Figura 1.9).

Se usa principalmente para:

- Detectar con exactitud el armado existente, distribución y diámetros.
- Estudio de la homogeneidad del hormigón.
- Inspección de los cables de pretensado.
- Detección de fisuración del hormigón.

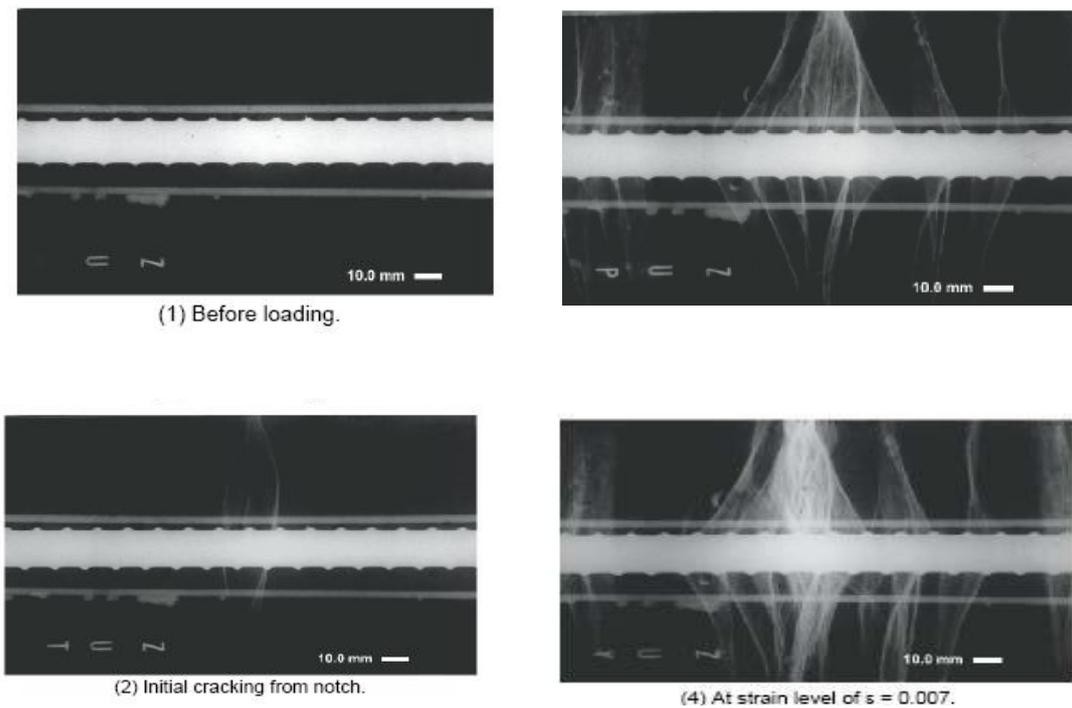


Fig. 1. 9 Evolución de la fisuración en hormigón armado (Joachim Naumann, 2003)

1.2.2- Técnicas basadas en emisión acústica.

Imaginemos una pieza de hormigón, que está siendo sometida a esfuerzos que van a provocar la fisuración del mismo. Cuando el material está siendo sometido a carga, la fisura se desarrolla debido a la liberación de energía almacenada, y se generan ondas elásticas (Figura 1.10). Estas ondas se propagan desde el interior del material hasta la superficie, donde son detectadas por el sensor de emisión acústica (Baifeng et al. 2008).

Estas ondas de emisión acústica son detectadas por un sensor, que convierte el movimiento dinámico de la superficie del material en una señal eléctrica. Debido a que las ondas son significativamente débiles, éstas deben ser amplificadas (Figura 1.10), normalmente a través de dos amplificadores. Asimismo, es necesario utilizar filtros con el propósito de eliminar el ruido externo que puede afectar a la interpretación de los resultados.

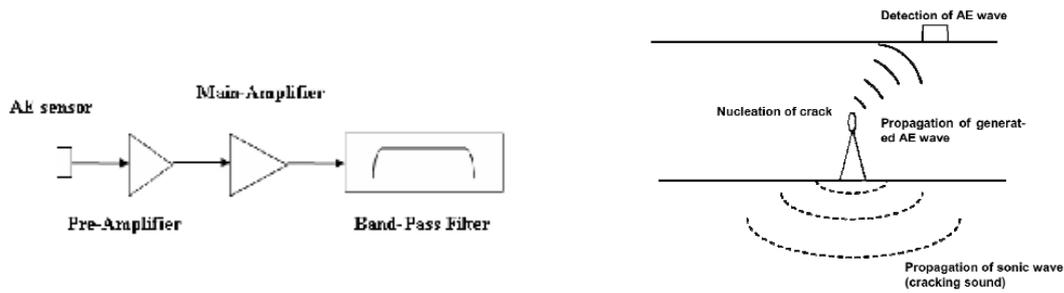


Fig. 1. 10 Sistema de emisión y detección de ondas acústicas (Baifeng et al. 2008)

En cuanto a las aplicaciones, Yuyama S. (2007), llevó a cabo la inspección de una viga que conecta dos pilares en un puente de alta velocidad en Tokyo, con tráfico continuo las 24 horas. El movimiento de los vehículos genera una gran cantidad de señales EA (señales de Emisión Acústica), que son detectadas por el sistema de emisión acústica (Figura 1.11).

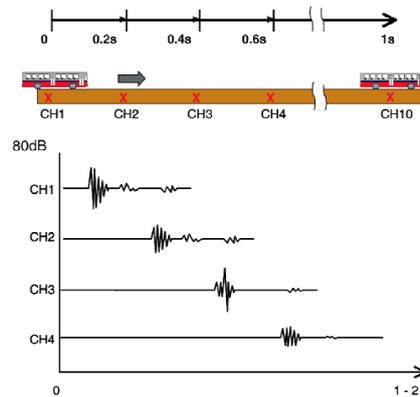


Fig. 1. 11 Puente de Tokyo para inspección mediante técnicas de emisión acústica. (Yuyama S. 2007)

1.2.3- Técnicas basadas en la fotogrametría.

La fotogrametría es la ciencia y el arte de determinar el tamaño y la forma de los objetos, a partir de un análisis de las imágenes registradas con películas, o mediante medios electrónicos. En principio, la fotogrametría puede usarse en cualquier situación en la cual el objeto a medir pueda ser fotografiado.

En los últimos años, la fotogrametría se ha aplicado ampliamente en ingeniería civil, tanto para el control de ensayos, como para tareas de monitorización. Como ejemplo, pueden citarse trabajos, como el de Whiteman et al. 2002, que emplea la fotogrametría para medir las flexiones en vigas de hormigón; el de Lange et al. 2006 sobre la fisuración mediante fotogrametría (Figura 1.12) o el de Lee & Al-Mahaidi 2008, sobre el comportamiento de vigas en T de hormigón armado reforzadas con GFRP.

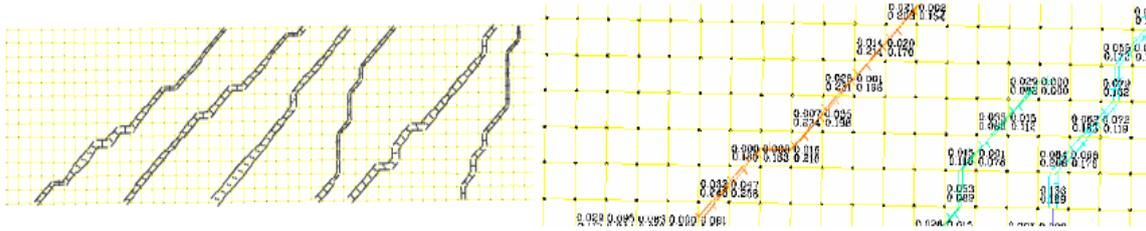


Fig. 1. 12 Mallado sobre la pieza de hormigón. Resultados de la fisuración, analizados mediante la técnica de la fotogrametría. (Lange et al. 2006)

1.2.4- Técnicas basadas en la termografía.

Esta técnica está basada en el principio físico de la radiación, por el que todos los objetos por encima de la temperatura del cero absoluto, emiten radiación infrarroja (Figura 1.13). Sólo resta, para obtener resultados, convertir una radiación invisible en una visible, y para ello, existen diferentes técnicas (Carosena Meola et al. 2006).

Se puede hacer un análisis pormenorizado de dos formas diferentes: la transmisión de calor y la reflexión. En el análisis de la transmisión, la cámara de infrarrojos se coloca en la cara opuesta de la probeta. Sin embargo, en muchos estudios fuera de laboratorio, la cara opuesta está fuera de alcance, por lo que se debe estudiar mediante la reflexión.

Como principales ventajas podemos destacar la rápida respuesta y la no intrusión de los elementos de medida en el proceso físico.

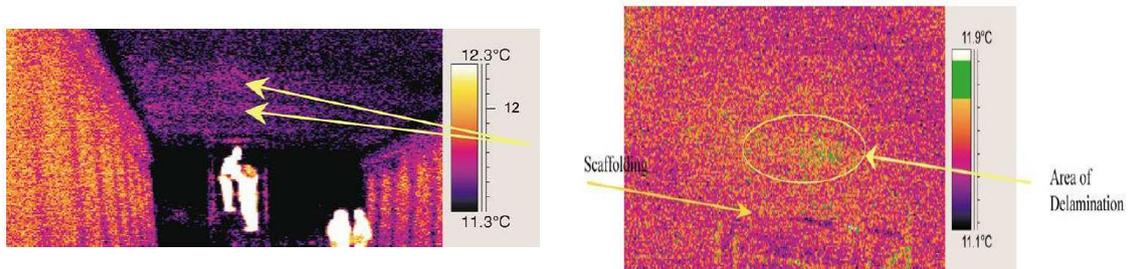


Fig. 1. 13 Detección de fisuración no detectada mediante inspección visual (M.R. Clark et al. 2003)

1.2.5- Técnicas basadas en láser.

Como principal y novedosa aplicación de este sistema, se citan a continuación los trabajos realizados por la Universidad de Salamanca, con el objetivo de evaluar el estado de la estructura de la muralla de Ávila (Figura 1.14). El sistema, que recibe el nombre TLS (*Terrestrial Laser Scanner*) resulta útil para trabajos de mantenimiento de monumentos y de estructuras antiguas.

El trabajo se inició con la recogida de datos. Para ello, los investigadores midieron *in situ* la muralla mediante un TLS. El escáner lanza un láser que rebota en la muralla y regresa a un sensor interno de tal modo que mide las distancias de cada punto del muro. El rayo láser hace un

barrido por la superficie de la muralla, de modo que se obtiene una red continua de puntos monitorizados.

El TLS toma dos medidas, una en el intradós y otra en el trasdós, con 1,5 y 2,5 millones de puntos respectivamente. Mediante la ayuda de algoritmos programados, se representan los perfiles de la muralla en tres dimensiones.

De esta manera se pueden detectar dos tipos de patologías: el desplome y la falta de verticalidad de la muralla, y el desplazamiento que experimenta el muro.



Fig. 1. 14 Vista de la muralla y del TLS (Diario de Salamanca, 2009)

1.2.6- Técnicas basadas en métodos de flujos magnéticos.

Esta técnica se emplea para detectar daños o anomalías en las barras de acero corrugado que conforman la armadura de una estructura de hormigón armado. El método emplea un fuerte campo magnético que pasa a través de la estructura de hormigón para magnetizar el acero embebido. Se emplean unos sensores para medir el campo producido por el metal en la estructura, y si existe una imperfección en el acero magnetizado, se produce una imperfección que es registrada (Figura 1.15). Estas discontinuidades producen una anomalía singular en el gráfico, dependiendo del tamaño y la distancia al sensor.

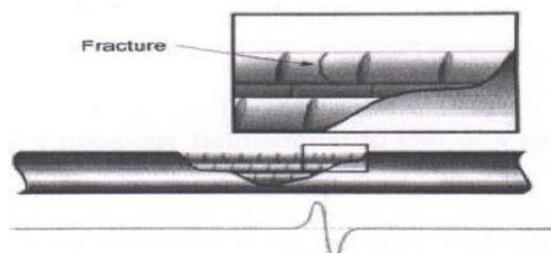


Fig. 1. 15 Daño en el acero, e imperfección detectada mediante el método del flujo magnético (Casas JR. 2006)

1.2.7- Técnicas basadas en la extensometría clásica (galgas extensométricas).

Se trata de uno de los sistemas que más ampliamente se han empleado. Su aplicación ofrece buenos resultados para control de deformaciones en estructuras de acero y de hormigón. El principio de funcionamiento radica en la variación de resistencia que experimenta un conductor, cuando sobre él se modifica la sección y/o la longitud (Figura 1.16).

Se trata de un sistema que será analizado con mayor detenimiento en el Anejo 1. Extensometría clásica, debido a la importancia que esta técnica ha presentado durante el desarrollo de este trabajo.

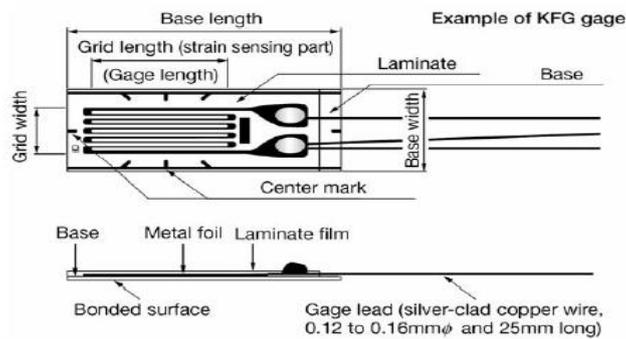


Fig. 1. 16 Esquema básico de una galga extensométrica (www.hbm.com)

1.2.8- Técnicas basadas en sistemas ópticos.

El presente trabajo de investigación está centrado en la técnica de sistemas ópticos. Su principio de funcionamiento radica en medir las variaciones de longitud de onda que experimenta la luz cuando es reflejada, al chocar contra un filtro (*grating*), que es instalado en la superficie de la estructura a monitorizar (Figura 1.17). Estos sensores son llamados FBG (Fiber Bragg Grating). Existen otros sistemas de medidas ópticos. Destacamos el sistema SOFO (en francés, Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques), los Sensores IFPI (Interferómetro intrínseco Fabry-Perot) o los EFPI (Interferómetro extrínseco Fabry Perot).

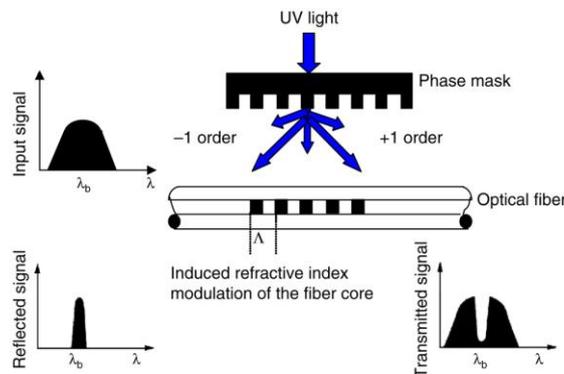


Fig. 1. 17 Principio de funcionamiento de los sensores ópticos tipo Fiber Bragg Grating. (P. Moyo, 2005)

Por la importancia que presentan estas técnicas en este trabajo de investigación, sus principales aspectos serán desarrollados a lo largo del mismo, y pueden consultarse a lo largo del capítulo 3.

La Tabla 1.1 que se muestra a continuación cita las aplicaciones más importantes, ventajas e inconvenientes de las principales técnicas de medición de estructuras.

Tabla1.1 Cuadro resumen con las principales aplicaciones, ventajas e inconvenientes de las técnicas de medición de estructuras.

CUADRO RESUMEN		<i>Aplicaciones</i>	<i>Investigadores</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>
TÉCNICAS DE MEDICIÓN EN ESTRUCTURAS.	Radar	Áreas fisuradas. Localización de armaduras	Koji Otsuka et al.(2003)	Claridad de información obtenida. Pruebas in situ.	Resultados erróneos y confusos en hormigón. Difícil aplicación.
	Rayos X	Fracturas del material. Humedades	Joachim Naumann et al. (2003)		
	Emisión acústica	Evolución de la fisuración en hormigón. Corrosión de armaduras.	Baifeng JI et al. (2008)	Buenos resultados en laboratorio, con control del ruido.	Afección ruidos y vibraciones del tráfico. Incapacidad de separar efectos.
	Fotogrametría	Trabajos de laboratorio. Flexiones en vigas. Detección de fisuración.	Lee & Al-Mahaidi (2008)	Instrumentación de "no contacto". Medición en tres dimensiones. Proporciona registros visuales de los ensayos.	Calibración muy inestable. Viento, ruido o movimientos distorsionan el resultado.
	Termografía	Detección de defectos en vainas de postesado. Fisuración del hormigón.	Carosena Meola et al. (2004)	Excelentes resultados en variaciones térmicas. Sistema portátil. Rango de medidas muy amplio.	Afección importante del entorno. Válida sólo para laboratorio.
	Láser	Verticalidad y desplomes en estructuras lineales, tipo muros.	International Conference on Modal Analysis. (2005)	Velocidad y constancia en la medición.	Sistema de referencia fijo. En caso de movimiento, lecturas erróneas.
	Flujos magnéticos	Corrosión en armaduras y tendones.	Casas, JR. (TD 2006)	Rápido y sencillo. No necesita personal especializado para su uso.	Afección radiación electromagnética exterior.
	Extensometría clásica	Deformación en hormigón, acero y otros materiales.	<i>HBM.</i>	Facilidad de instalación. Económico. Resultados satisfactorios.	Sistema eléctrico. Deterioro condiciones ambientales. Incapacidad de separar efectos.
	Sistemas ópticos	Deformaciones. Temperaturas. Corrosión. Ph. Retracción. Transmisión de datos a la velocidad de la luz.	<i>MicronOptics, Smartec.</i>	Resultados muy satisfactorios. Elevada durabilidad. No afección radiaciones electromagnéticas. Separación efectos.	Fragilidad del sistema. Afección por la suciedad y polvo. Precaución con dobleces cableado.

1.3- Sistemas integrados de monitorización y control.

El propósito que se persigue en este apartado es el de describir, de una forma muy sencilla, los componentes básicos que componen un sistema de monitorización (Fraile y García, 1987), tal y como muestra la Figura 1.18.

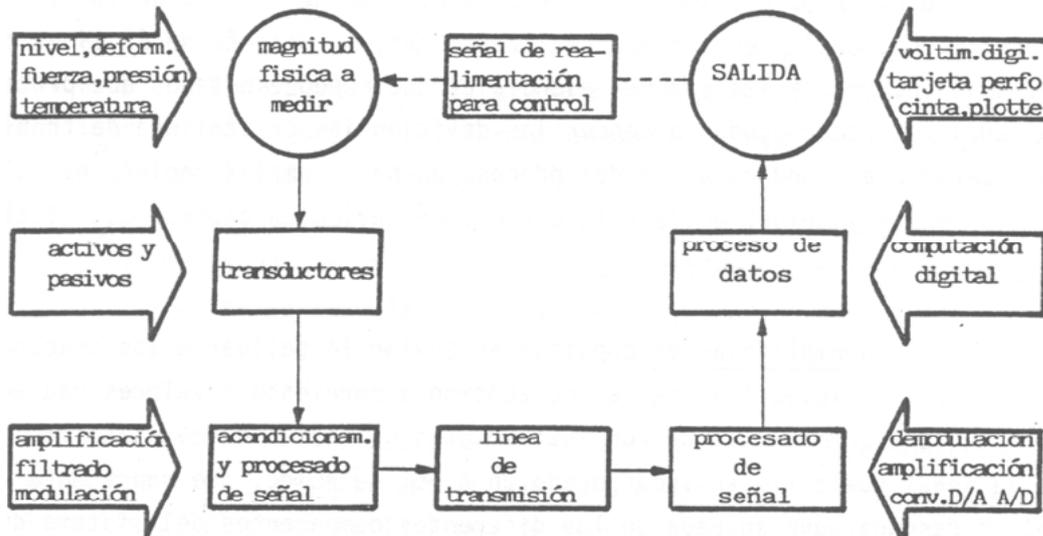


Fig. 1. 18 Esquema general de un sistema de monitorización (Fraile & García, 1987).

- Transductores.

Son los componentes que convierten la magnitud física a medir, en otro tipo de señal. El término señal, se emplea para identificar la magnitud variable que aparece en la salida del transductor y que se emplea para enviar información de los valores medidos desde el transductor al resto del sistema. La salida del transductor se trata adecuadamente para que, mediante una línea de transmisión, la señal se registre.

- Procesado y acondicionado de la señal.

Refiriéndose a las diversas transformaciones y modificaciones que debe sufrir una señal desde su salida del transductor, ésta debe ser acondicionada y procesada antes y después de su transmisión. La razón fundamental es anular las posibles deficiencias de la línea de transmisión.

Las operaciones fundamentales del procesado de una señal son la amplificación, el filtrado y la modulación-demodulación.

Por un lado, la amplificación consiste en elevar los niveles de tensión para que la señal pueda ser manipulada. Generalmente, la señal lleva incorporada un nivel de ruido, que se transmite por los diferentes componentes del sistema de instrumentación. Por este motivo, la señal de los transductores se filtra previamente para eliminar parte de la señal no deseada y posteriormente, se amplifica para lograr un nivel de señal muy superior al nivel de ruido.

Por otro lado, otra técnica de procesado es la modulación, que suele emplearse cuando la línea de transmisión es larga. La modulación se utiliza para reducir los efectos de atenuación y ruido que surgen en la línea de transmisión, permitiendo enviar señales simultáneas por una misma línea.

- Línea de transmisión.

La línea de transmisión tiene como objetivo enviar la señal desde la salida de los transductores hasta los elementos de medida. Las propiedades de la línea pueden limitar la eficacia de la transmisión, es decir, la precisión y la velocidad con la que se pueden realizar medida.

- Procesado y registro de datos.

El objetivo de cualquier sistema de instrumentación es el de realizar medidas y transmitir las a una unidad de control para su tratamiento. El procesado y registro de datos se realiza mediante un ordenador.

1.4-Objetivos, contribuciones y estructura de la tesina.

Este apartado resume los objetivos y la organización del presente trabajo. Para ello, se explica la división efectuada en capítulos, y los aspectos que cada uno de ellos desarrolla. Finalmente, se indica el contexto en que se han realizado los trabajos que engloban la Tesina.

1.4.1- Objetivos y contribuciones de la tesina.

Este trabajo de investigación se presenta con el objetivo principal de desarrollar un sensor de fibra óptica y un sistema de monitorización y control de estructuras de hormigón y acero, para su posterior aplicación en estructuras reales.

Este trabajo de investigación se presenta como una propuesta para conseguir un sistema que ofrezca mayores garantías respecto a los sistemas ya existentes de control de deformaciones de una estructura, puesto que en ocasiones, éstos últimos presentan limitaciones. Algunas de ellas ya han sido expuestas en la Tabla 1.1 de este mismo capítulo. En el caso del sistema de galgas extensométricas, sus limitaciones serán expuestas en el apartado 3.5 del capítulo 3.

El sistema propuesto en este trabajo está basado en la tecnología de los sensores de fibra óptica y su función consiste en monitorizar las deformaciones que se producen en determinados puntos de la estructura, e informar sobre la evolución de las mismas en tiempo real.

Mediante este sistema, no sólo es posible la monitorización de las deformaciones en ciertos puntos. También es posible obtener un registro continuo de otros parámetros importantes, tales como temperatura ambiente o de la masa del hormigón, retracción del hormigón, corrosión de armaduras, o evolución del ph del hormigón, entre otros.

Para lograr el objetivo de este trabajo, se hace necesario el análisis de los siguientes aspectos:

- Conocer la información general en cuanto a la problemática existente, defectos y fallos habituales en estructuras e información estadística disponible.
- Presentar los métodos actuales existentes que nos permiten obtener información de ciertos parámetros de la estructura, indicando sus usos, ventajas y limitaciones.
- Mostrar la importancia del proceso de monitorización estructural.
- Mostrar diversas aplicaciones de monitorización y control estructural en tiempo real, mediante sistemas ópticos.
- Estudio comparativo de los principios de funcionamiento y bases teóricas de la instrumentación clásica (galgas extensométricas) y del sistema de monitorización propuesto basado en la fibra óptica.
- Estudio de los diferentes tipos de sensores de fibra óptica, y elección del sensor a utilizar en el sistema de monitorización que engloba el presente trabajo.
- Desarrollo y calibración de un sensor de fibra óptica aplicado a la medida de deformaciones en estructuras de hormigón y acero.

- Desarrollo y calibración de un sensor de fibra óptica aplicado a la medida de temperatura en la superficie de un material o en el interior del hormigón.
- Desarrollo de un sensor de fibra óptica aplicado a la medida de deformaciones en la armadura de una estructura de hormigón.
- Desarrollo de un sensor de fibra óptica aplicado a la medida de deformaciones internas en la masa del hormigón.
- Desarrollo de un sensor de fibra óptica aplicado a la medida de la retracción del hormigón a edades muy tempranas.
- Realizar una serie de campañas experimentales con el objetivo de validar el sistema de monitorización y los diferentes sensores ópticos propuestos.
- Puesta en marcha, empleo y aplicación del sistema de monitorización en obras reales.

1.4.2- Estructura de la tesina.

Este trabajo está estructurado en 4 capítulos:

- En el primer capítulo (Introducción, antecedentes y objetivos) se presenta una síntesis de una parte de la investigación bibliográfica realizada. El objetivo principal de esta síntesis consiste en mostrar la importancia y la necesidad del proceso de monitorización estructural.

Fruto de esta investigación realizada, se hace necesario presentar los métodos existentes más usuales, para obtención de información de determinados parámetros estructurales.

- En el segundo capítulo (Estado del arte) se realiza otra síntesis de la revisión bibliográfica realizada. En él, se presenta una descripción de los trabajos más representativos realizados en el campo de la monitorización de estructuras mediante sistemas ópticos.
- En el tercer capítulo (Diseño de un sistema de medida óptico de deformaciones y temperatura en estructuras) se expone la parte más extensa del presente trabajo de investigación. En él se incluye, inicialmente, una detallada descripción de aspectos referente a los sistemas ópticos empleados en el proceso de gestión y monitorización estructural.

Se presentan también las diferentes campañas de ensayos realizadas, con el fin de conseguir la calibración de los sensores ópticos desarrollados por el ICITECH e ITEAM.

Una vez realizadas las diferentes campañas experimentales, se ha llevado a cabo un estudio mediante un programa de elementos finitos (LUSAS V.81), en el que se ha modelizado el sensor desarrollado por el ICITECH (Instituto y Ciencia de Tecnología

del Hormigón) e ITEAM (Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia), con el objetivo de demostrar la bondad y validez de dicho sensor óptico.

- En el cuarto capítulo (Conclusiones y futuras líneas de investigación), se exponen las conclusiones obtenidas de este trabajo, así como una visión de las futuras líneas de investigación que se pueden plantear, o que ya se encuentran planteadas y en evolución.
- Finalmente, se adjuntan una serie de anexos.

1.4.3- Contexto de desarrollo de los trabajos.

Tal y como se evidencia en las páginas anteriores, existe la necesidad de desarrollar un sistema de medición de deformaciones, que aventaje al resto de técnicas, y ofrezca garantías en cuanto a la obtención de resultados.

La investigación está siendo realizada por un grupo de investigadores de la Universidad Politécnica de Valencia. Estos investigadores pertenecen a dos institutos diferentes: el ICITECH (Instituto y Ciencia de Tecnología del Hormigón) y el ITEAM (Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia)

Los investigadores del ICITECH tienen una amplia experiencia en el proyecto y monitorización de estructuras, con un especial énfasis en la patología estructural y en la realización de modelos teóricos que permitan validar y extrapolar los resultados de ensayos de laboratorio y de estructuras reales. Algunas de sus publicaciones más representativas son Calderón et al. (2009), Adam et al. (2009), Giménez et al. (2009) y Pallarés et al. (2009). Por otro lado, los investigadores del ITEAM tienen una amplia y probada experiencia en el diseño y fabricación de dispositivos ópticos y dispositivos ópticos integrados, así como en el diagnóstico no destructivo de materiales.

Los investigadores de ambos grupos unieron sus capacidades en el año 2006 para desarrollar y estudiar las propiedades de la fibra óptica en el campo del sensado de las estructuras. Con este objeto, se planteó la investigación “Desarrollo de sensores ópticos aplicados a la instrumentación de estructuras para conocimiento de su comportamiento en tiempo real”, sobre la que se están realizando las campañas experimentales de laboratorio. Esta investigación ha sido financiada por el Ministerio de Fomento y por la empresa constructora Sacyr Vallehermoso.

CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.

2.1-Descripción de trabajos más representativos para la monitorización de estructuras mediante sistemas ópticos.

Una parte esencial de toda Tesina de Máster es la identificación de aquellos aspectos relacionados con el tema estudiado, y que no hayan sido tratados en investigaciones anteriores. Esta parte recibe el nombre de revisión bibliográfica y es esencial pues permite establecer la idoneidad de un tema y enfocarlo correctamente.

El Estado del arte aquí detallado se centra exclusivamente en tecnologías que emplean la fibra óptica para la auscultación de estructuras. Se explican diferentes investigaciones experimentales relacionadas con el desarrollo de sensores de fibra óptica, así como diferentes aplicaciones de los sensores a obras reales. Además, no sólo se hace referencia a las aplicaciones de los sensores ópticos en el campo de las estructuras, sino que también se citan aplicaciones en el campo de la ingeniería en general.

Como punto de partida, las Tablas 2.1 y 2.2 resumen la situación actual de las investigaciones y aplicaciones realizadas mediante sistemas ópticos en el campo de la ingeniería, junto con el autor y el año del estudio.

Investigador	Tipo de sensor estudiado	Tipo de estudio
Tarun Kumar Gangopadhyay (2006)	FBG	Estudio del encapsulado.
K.S.C. Kuang (2008)	FBG	Evolución Espectro/Carga
C.A. Ramos (2008)	FBG	Desarrollo de sensor óptico.
D.H. Kang (2007/2008)	FBG	Factores que influyen en el espectro.
Rupali Suresh (2007)	FBG	FBG embebida en GFRP.
B. Glisic/A. Inaudi (2008)	SOFO/FBG	Edades tempranas del hormigón.
Volker Slowik (2008)	SOFO/FBG	Retracción plástica del hormigón.
Insang Lee (2007)	SOFO/FBG	Abertura de fisura.
C. Frias (2008)	FBG	Composición química del hormigón.
Paul Childs (2006)	FBG/FPI	Coefficiente de expansión térmica hormigón.
David Barrera (2008)	FBG	Medida de PH en el hormigón.
Miguel Azenha (2007)	FBG	Evolución térmica a edades tempranas.
A. del Grosso (1999)	SOFO/FBG	Medida de deformaciones.

Tabla 2. 1 Principales estudios relacionados con la tecnología de la fibra óptica en el sentido de elementos.

Investigador	Tipo de sensor estudiado	Tipo de aplicación.
Schulz (2002)	FBG	Deformaciones en tirantes de puentes.
Smartec (2002)	SOFO	Deformación en cables de postesado.
Inaudi (1998)	SOFO/FBG/FPI	Interacción entre hormigones de muy diferentes edades.
B. Glisik (2005)	SOFO/FPI	Deformación por cortante y torsión en puente curvo.
Daniele Inaudi (2008)	FBG	Características geotécnicas terreno.
A. del Grosso (2009)	FBG/FPI	Flexión en muros de puertos.
M. Enckell (2005)	FBG	Abertura de fisura en cúpulas.
Babei K. (2003)	FBG	Corrosión en cordones de tesar.
Schulz (2002)	FBG	Socavación en pilas de puente.
Schulz (2002)	FBG	Control de la circulación del tráfico.

Tabla 2. 2 Principales aplicaciones realizadas con la tecnología de la fibra óptica en el sensado de elementos.

Según la revisión bibliográfica realizada, a grandes rasgos la distribución de las investigaciones y publicaciones realizadas entre 1998 y 2009 pueden agruparse según las proporciones que indica la Figura 2.1:

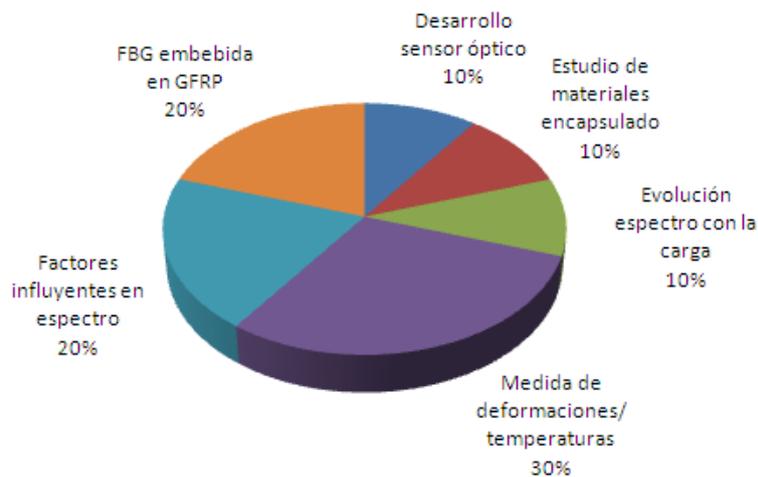


Fig. 2. 1 Distribución de las investigaciones realizadas durante los últimos años.

Son pocas las investigaciones que hacen referencia al desarrollo de un sensor óptico y su encapsulado, y sin embargo, este aspecto resulta fundamental en todo sistema óptico de sensado. Esto puede estar motivado por la existencia de sensores ópticos comerciales en el mercado. No obstante, existen aspectos que son objeto de mejoras y que se tratan en este trabajo. Por este motivo, queda justificado el desarrollo de esta investigación.

Por otro lado, existe una gran variedad de sensores ópticos. Cada uno de ellos presenta unas características que los hacen adecuados para unas aplicaciones u otras. Generalmente, los más empleados son los sensores tipo Fibre Bragg Grating (Figura 2.2), debido a su mayor simplicidad de funcionamiento y mejores prestaciones que el resto. Además, su principio de funcionamiento permite obtener información de los parámetros más importantes en una estructura, como son deformaciones y temperaturas.

En este trabajo, también se ha empleado este tipo de sensor.

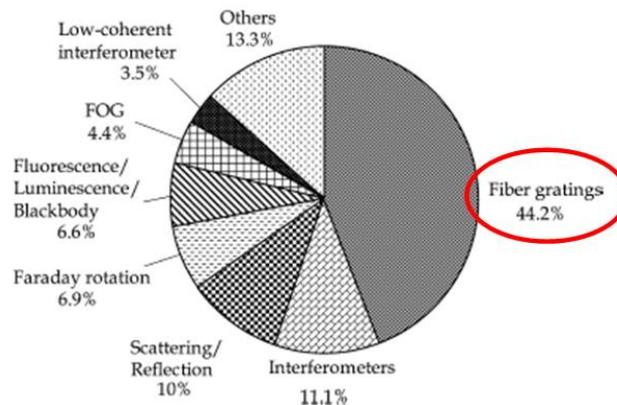


Fig. 2. 2 Distribución del empleo de los sensores ópticos en aplicaciones a la ingeniería (B. Lee, 2003).

A continuación, se describen las investigaciones y aplicaciones con sensores de fibra óptica más relevantes en relación con los objetivos de este trabajo.

2.1.1- Estudio de un encapsulado para un sensor de fibra óptica (P. Moyo et al. 2005).

El estudio del encapsulado de un sensor de fibra óptica es una parte fundamental en el buen funcionamiento del mismo. El objetivo es compatibilizar las deformaciones que se producen en el elemento a medir, y que toda la deformación sea captada por la fibra óptica.

En este aspecto, se han realizado algunas investigaciones tratando de desarrollar un encapsulado que proteja a la fibra, pero que además proporcione propiedades interesantes para la toma de medidas. La Figura 2.3 muestra algunos de los encapsulados que se han propuesto para el desarrollo del sensor.

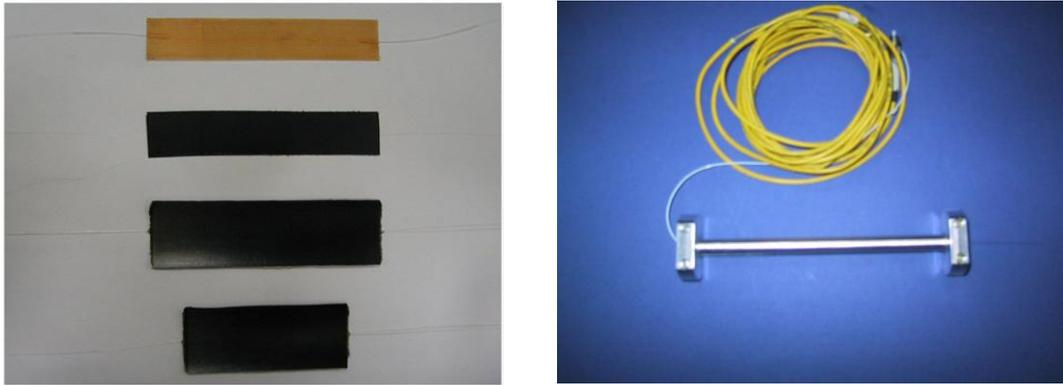


Fig. 2.3 Diferentes tipologías de encapsulados propuestos. (a) encapsulados a base de fibra de carbono y poliamidas. (b) Encapsulado metálico (P. Moyo et al. 2005).

2.1.2- Célula de carga con sensores embebidos (Schulz et al. 2002).

Una de las aplicaciones de la fibra óptica consiste en la célula de carga que presenta sensores embebidos transversalmente. Con ello, el objetivo es medir deformaciones en dirección ortogonal a la de aplicación de la carga.

La geometría que describe el cable se puede adaptar a la forma de la célula de carga, midiendo deformaciones según la orientación de las FBG, en tres direcciones ortogonales o en dirección radial (Figura 2.4). Normalmente, se emplean varias FBG en un mismo cable de fibra óptica, obteniendo de este modo una envolvente de datos a lo largo del perímetro del cable.

Si esta célula de carga se emplea como neopreno de apoyo de la pila de un puente, es posible conocer en cualquier instante el descentramiento de la carga que recibe la pila desde el tablero, o el giro longitudinal que experimenta éste.

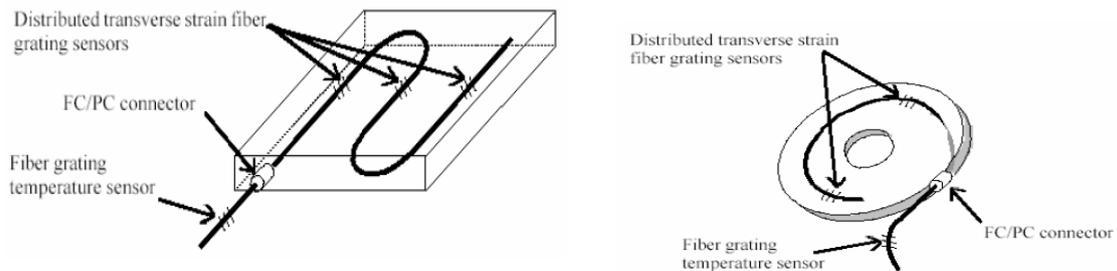


Fig. 2. 4 Célula de carga con sensores ópticos FBG embebidos (Schulz et al. 2002)

2.1.3- Aplicaciones varias en puentes (Schulz et al. 2002).

En el campo de la ingeniería Civil, la mayoría de las aplicaciones de los sensores de fibra óptica se ha centrado en la monitorización de puentes. Uno de los ejemplos que más se repite, consiste en la monitorización de los cables portantes de los puentes atirantados y los apoyos del tablero con la pila (Figura 2.5).

En la actualidad son varias las estructuras y puentes que se han intentado monitorizar mediante el empleo de sensores de fibra óptica, confirmándose que este tipo de aplicaciones se encuentra en pleno desarrollo. A continuación, se exponen algunos de ellos.

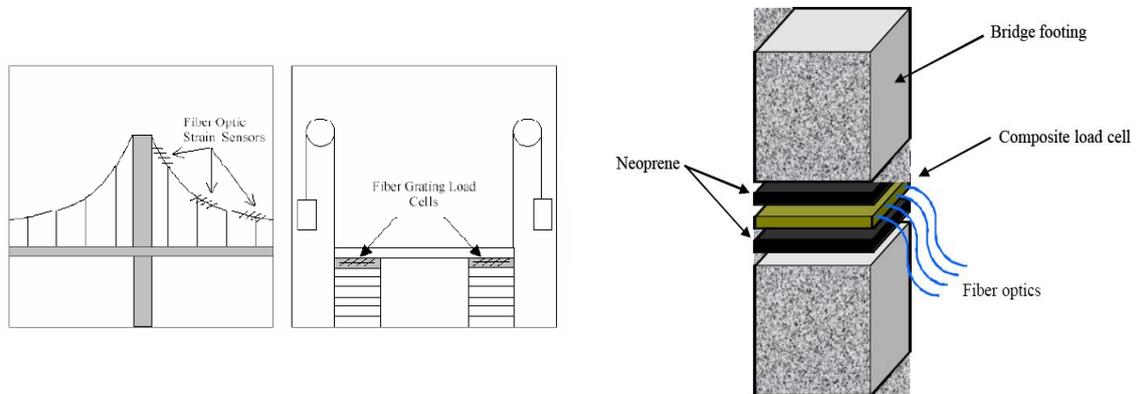


Fig. 2. 5 Puentes instrumentados mediante sensores ópticos (a). Apoyo del tablero de un puente con sensores ópticos embebidos (b). (Schulz et al. 2002 & Erich Udd 2005)

2.1.4- Monitorización del puente Ke-Ya (www.smartec.ch)

Este puente se encuentra situado en Hsin-Chu (Taiwan), y recibe este nombre por ser la estructura de paso sobre el arroyo Ke-Ya. Este puente pretensado consta de varias vigas de sección en cajón de 40 metros de longitud y 12,5 m de ancho, con 10 tendones de tesado para cada uno de los cajones.

Con la monitorización de este puente se controla el comportamiento de la estructura a edades tempranas del hormigón. Se embeben 3 sensores de fibra óptica SOFO (del francés, Surveillance d'Ouvrages par Fibras Optiques) con termopares para medida de la evolución de la temperatura (Figura 2.6).

Las mediciones y la toma de datos se lleva a cabo a las pocas horas del vertido del hormigón. La ley de retracción a edades tempranas sigue la ley que se indica en la Figura 2.6:

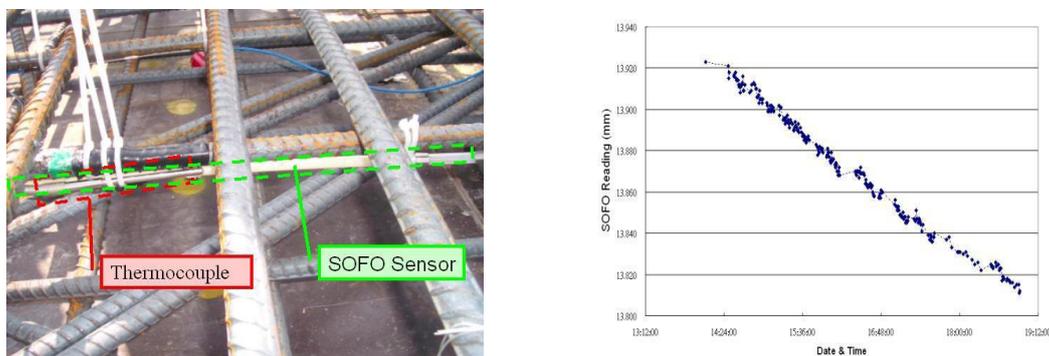


Fig. 2. 6 Termopares y sensores ópticos SOFO instalados en la estructura (a). Ley de retracción del hormigón a edades tempranas (b). (www.smartec.ch).

2.1.5 - Monitorización del puente Moskvoretskiy Bolshoi (A. del Grosso et al. 2000)

Este puente se encuentra ubicado en Moscú (Rusia). Fue construido en el año 1936, sobre el río del mismo nombre. Se trata de una de las líneas principales de tráfico que vertebra la ciudad.

La estructura del puente consta de tres arcos paralelos de hormigón armado de 100 metros de longitud, ocultos tras tímpanos de piedra. La superestructura descansa sobre unos pilares que nacen de los arcos en los extremos del puente y apoyan en la clave del arco.

Durante una de las inspecciones visuales, se detectan dos tipos de degradación en el puente. Por un lado, el asentamiento excesivo del centro del arco que provoca las grietas en los muros de piedra que forman los tímpanos. Por otro lado, la excesiva difusión de cloruros (Figura 2.7). Debido a la importancia histórica y funcional que representa el puente, las autoridades deciden llevar a cabo un proceso de monitorización continuada en el tiempo.

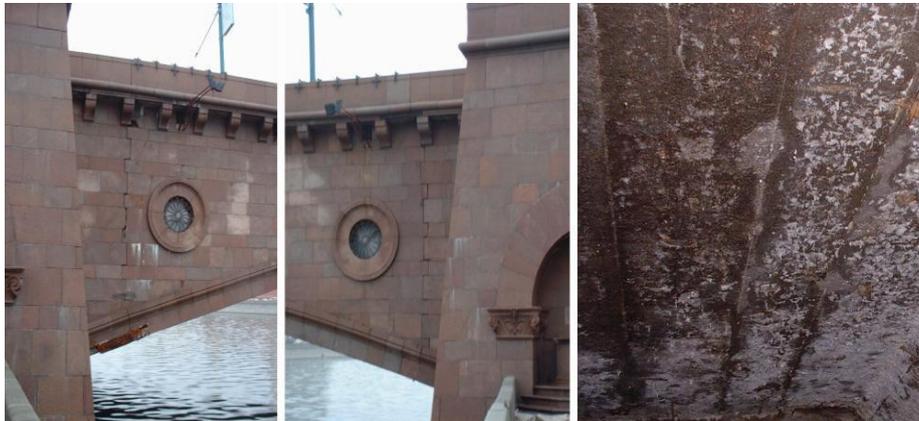


Fig. 2.7 Patologías detectadas en el Puente. Grietas en los tímpanos de piedra (a) y excesiva difusión de cloruros (b). (A. del Grosso et al. 2000).

Se instalan un total de 16 sensores ópticos SOFO, con el fin de conocer la tensión en el punto medio del arco, y la evolución de las curvaturas del mismo, tanto en horizontal como en vertical. Con el objetivo de poder compensar los efectos térmicos, también se instalan 6 termopares.

2.1.6 - Monitorización de los puentes gemelos en Suiza, realizado por el Laboratory of Swiss Federal Institute of Technology (Glisic & Inaudi. 1997).

Estos puentes se encuentran en Versoix (Suiza), sobre la autopista A9 de la ciudad. La estructura inicial del puente está conformada por dos vigas de hormigón postensado, que soportan una losa de hormigón de 30 cm de espesor, con voladizos a ambos lados de la planta del puente.

Con el objetivo de aumentar el tráfico de vehículos se decide ampliar el mismo, ensanchando las vigas y aumentando los voladizos (Figura 2.8). Para comparar la interacción entre hormigones

de muy distintas edades, se opta por monitorizar la nueva estructura con más de cien sensores ópticos del tipo FBG.

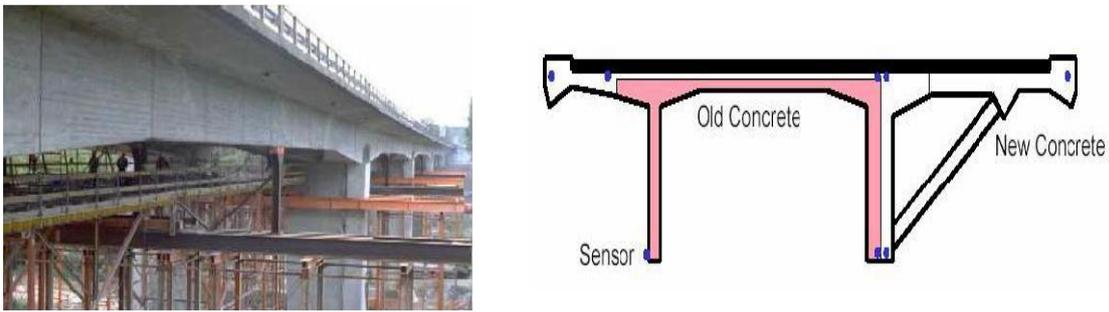


Fig. 2.8 Imagen de una de las ampliaciones del tablero del puente (a). Sección transversal del puente, con la ubicación de los sensores ópticos (b). (Glisik & Inaudi, 1997).

Los resultados instrumentados son comparados con los valores teóricos calculados, y ambas soluciones presentan valores muy similares, tal y como muestra la Figura 2.9.

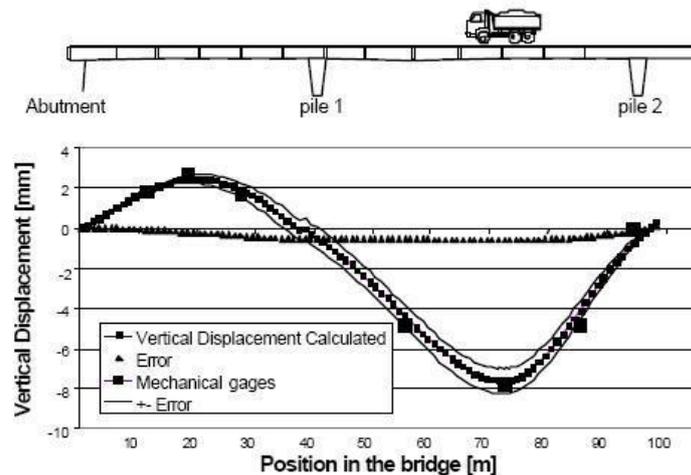


Fig. 2. 9 Comparativa entre las soluciones teóricas calculadas y medidas (Glisik & Inaudi, 1997).

2.1.7 - Monitorización del viaducto “Ricciolo” (Branko Glisik et al. 2007).

El viaducto Ricciolo fue construido durante 2004 y 2005 en Suiza. Se construyó como vía de salida de la autopista A2, a su paso por el norte de Lugano.

Se trata de un puente curvo (Figura 2.10), de sección en cajón y postensado en varias direcciones. La estructura consta de cinco vanos con una longitud total de 134 metros. El vano central presenta una longitud de 35 metros, y se encuentra situado justo sobre el río Vedeggio.

Debido a la forma curva del viaducto, la sección transversal no sólo está sometida a momentos flectores contenidos en el plano vertical, sino que la existencia de momentos torsores, hacen cambiar las direcciones principales de deformación. Además, el hecho de existir postesado en varias direcciones, hace todavía más complejo el campo de deformaciones y tensiones.



Fig. 2. 10 Vista del vano central del Puente (Glisic et al. 2007).

La monitorización se lleva a cabo mediante sensores de fibra óptica que son embebidos en las armaduras del hormigón para medir deformaciones internas. Además, se emplean inclinómetros, encargados de medir la inclinación de las paredes del cajón y termopares.

La ubicación de los sensores ópticos, termopares e inclinómetros tanto en planta como en sección transversal se muestra en la Figura 2.11

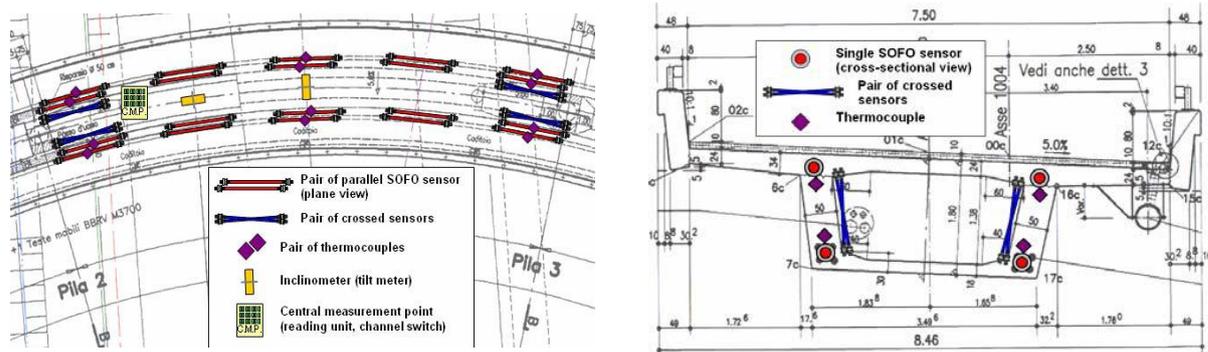


Fig. 2. 11 Ubicación de los sensores en la planta del puente (a) y en el alzado (b). (Glisic et al. 2007)

Para monitorizar la deformación de cortante, se instalan en los apoyos sensores cruzados, con un ángulo de inclinación respecto de la horizontal de 45° , tal y como indica la Figura 2.12.



Fig. 2. 12 Sensores cruzados en apoyos para control del cortante. (Glisic et al. 2007)

La instrumentación se realiza continuada a lo largo de un año. Existen pérdidas de datos, que se observa en los tramos rectos de las curvas de las deformaciones (Figura 2.13), debido a que los equipos no se encontraron disponibles en ciertas fases.

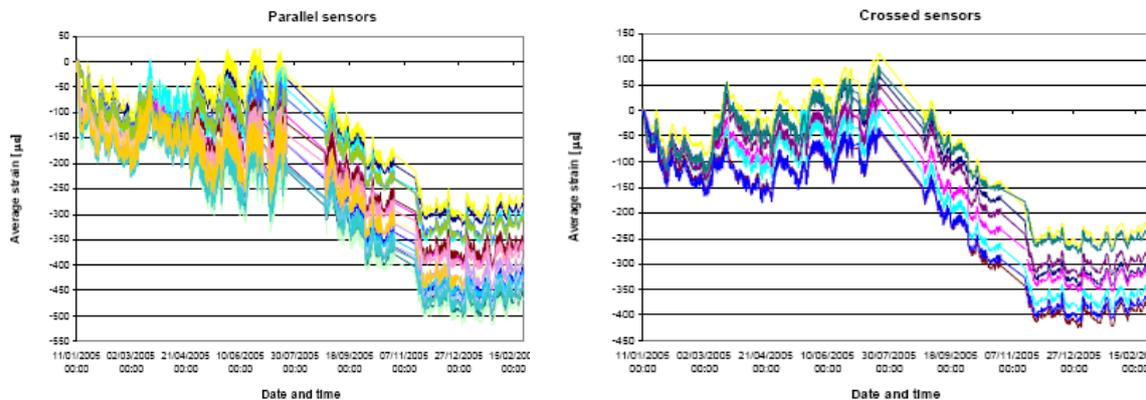


Fig. 2. 13 Deformación obtenida por los sensores embebidos en la armadura (a) y sensores cruzados (b) (Glisic et al. 2007).

Las deformaciones que se obtienen indican que los materiales empleados están trabajando en su régimen elástico y lineal. Las deformaciones longitudinales máximas alcanzadas, han arrojado valores máximos de $550 \mu\epsilon$. Por otro lado, los valores que indican los sensores ópticos cruzados han sido del orden de $400 \mu\epsilon$.

Aproximadamente a los 7 meses de la construcción, el sistema de instrumentación informa que aparecen las mayores deformaciones, que coincide con la actuación de las sobrecargas.

2.1.8 - Monitorización de una pila durante la construcción de un túnel en Los Alpes en Suiza. (Daniele Inaudi & Branko Glisic. 2007).

Suiza está construyendo una nueva línea ferroviaria a través de las montañas. El objeto de este trabajo es el de permitir una conducción más segura y más rápida (hasta 250 km/h) para los usuarios. Los trabajos de este proyecto, consisten en la ejecución de dos túneles de 57 km de longitud cada uno.

Debido a la necesidad de hacer frente a la línea ferroviaria y carreteras ya existentes, es necesario la construcción durante los 300 primeros metros de túnel, de una serie de pórticos paralelos (Figura 2.14). Éstos están cimentados profundamente y sobre suelo poco competente. La cimentación se trata de pilotes de 34 metros de profundidad, diseñados para que resistan fundamentalmente por fuste.

Para controlar el proceso de construcción de los pilotes, se propone la auscultación de los mismos mediante tecnología óptica. La casa Smaster fue la encargada de llevar a cabo la instrumentación.



Fig. 2. 14 Vista de los pórticos a la entrada de los túneles (Glisic et al 2007).

Con la instalación de estos sensores se pretende conocer las fuerzas de rozamiento que se desarrollan a lo largo del fuste del pilote, además de otros parámetros como la ley de deformaciones y desplazamientos en la pila, módulo de Young de cada estrato o la carga última de hundimiento.

Previamente a la construcción, se ejecuta una pila provisional que sirve de probeta para estudiar el comportamiento del resto de pilas.

La pila se divide en 8 zonas, y se instala un sensor óptico en cada zona. Para detectar un posible descentramiento de carga, en la primera zona del pilote decide instalarse un segundo sensor óptico enfrente con el anterior. Los sensores ópticos fueron instalados en serie.

Los resultados obtenidos permiten determinar las deformaciones en el pilote, y las fuerzas de rozamiento que se crean entre el pilote y el terreno (Figura 2.15).

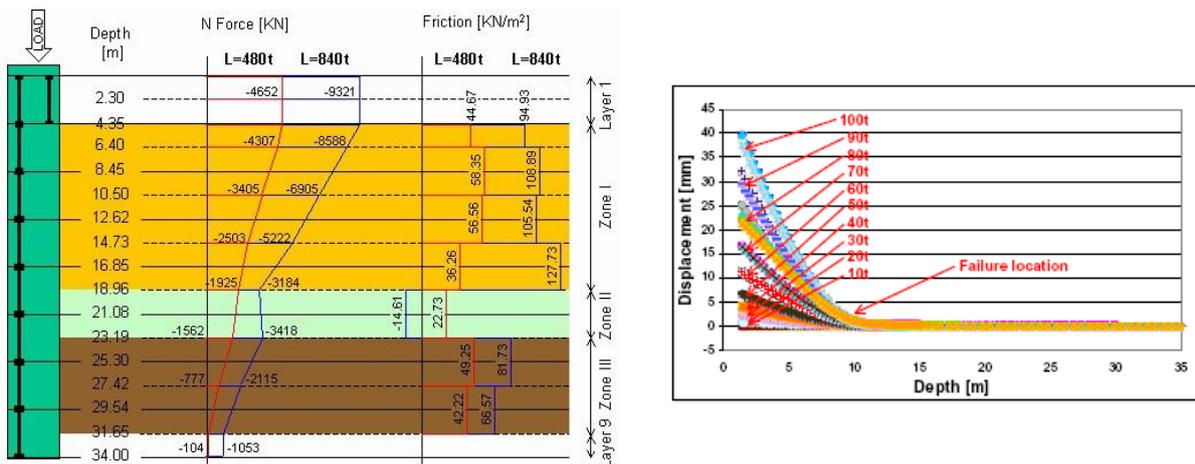


Fig. 2. 15 Resultados obtenidos en la pila provisional. Rozamiento pilote-terreno (a). Desplazamiento para cada profundidad (b). (Glisic et al. 2007).

2.1.9 - Structural Health Monitoring (SHM) en embarcaderos en el puerto de Genoa. (A. del Grosso et al.2007).

El aumento del tamaño de los buques de mercancías ha obligado a aumentar el calado de los puertos, así como un diseño más resistente de los muros de contención de los embarcaderos. Actualmente, los puertos están haciendo frente a inversiones económicas importantes, con el fin de dragar los fondos de los puertos, y por tanto, reforzar o sustituir aquellas estructuras que estén expuestas a mayores acciones.

Para llevar un control de los muros de contención, se ha llevado a cabo un estudio en el puerto de Genoa (Figura 2.16), instrumentándolos mediante sensores ópticos, y monitorizando la afección que el dragado del puerto tiene sobre ellos.

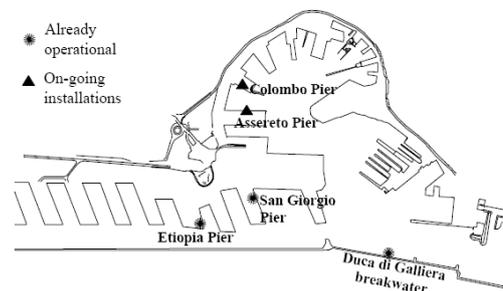


Fig. 2. 16 Vista en planta del puerto de Genoa (A. del Grosso et al. 2007)

Uno de los embarcaderos donde se llevó a cabo el estudio fue el de San Giorgio. Los muros de este embarcadero fueron construidos en el 1920, mediante bloques de hormigón. En los últimos años, el muelle fue prolongado 400 metros, y tras esta operación, se procedió a dragar el puerto hasta una profundidad de 14 m. Previamente, la cimentación se reforzó mediante columnas de *jet-grouting* de 20m de profundidad, y el alzado mediante anclajes activos al terreno, del modo indicado en la Figura 2.17.

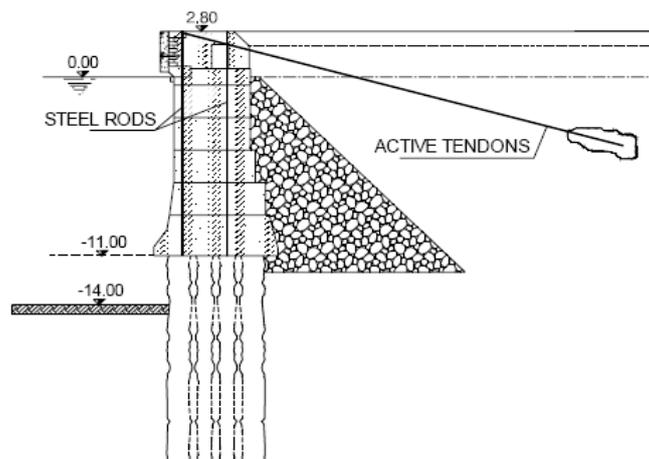


Fig. 2. 17 Sección transversal de los embarcaderos ya reforzados. (A. del Grosso et al. 2007).

Tras cinco años de monitorización continuada en el tiempo, se han representado las leyes de deformación de los sensores. En ellas, existen pérdida de datos (Figura 2.18), debido a la no disponibilidad de los equipos de medida.

La primera conclusión importante que se puede extraer es que la temperatura juega un papel fundamental en el movimiento entre bloques de hormigón. En principio, factores como el volumen de la mercancía que descansa sobre el embarcadero, no afectan a la estabilidad del mismo. La ley de dislocaciones que sufre la estructura es proporcional a la ley de temperatura registrada dentro de un tiempo de reacción de la misma, debido a la inercia térmica en la respuesta estructural del embarcadero.

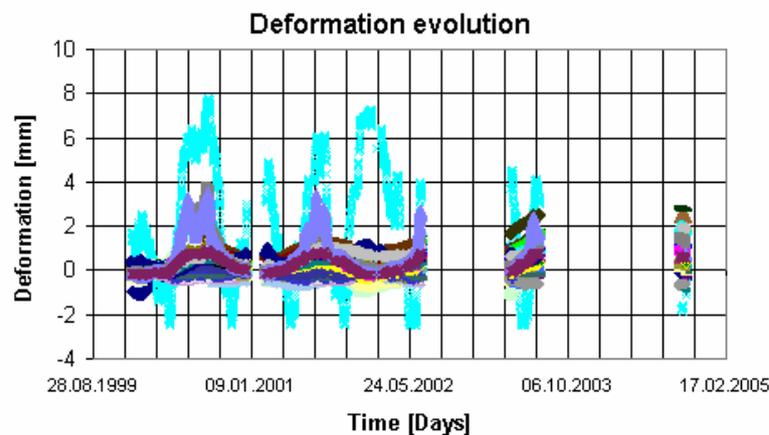


Fig. 2. 18 Ley de deformaciones de los muros del embarcadero. Los valores máximos se corresponden con gradientes de temperatura importantes. (A. del Grosso et al. 2007).

2.1.10 - Monitorización de la Iglesia Gandria. (Branko Glisik & Daniele Inaudi. 2001).

Esta estructura se encuentra situada en una ladera que rodea el *Lago Lugano*, en el sur-este de Suiza. La estructura se trata de una pequeña iglesia que presenta una importante grieta que atraviesa la clave del arco que conforma su cúpula. Otras grietas más pequeñas se encuentran ubicadas en el lado convexo exterior del mismo. Aunque la forma de rotura del arco parece evidente, se decidió instalar 10 sensores ópticos (6 de ellos en clave, y 4 en los extremos) tipología SOFO del modo indicado en la Figura 2.19, para conocer la evolución de la abertura de fisura y la curvatura del arco.

Los sensores empleados presentan una longitud de entre 20-60 cm, y se encuentran anclados a cada lado de la fisura, mediante unos angulares en forma de L.

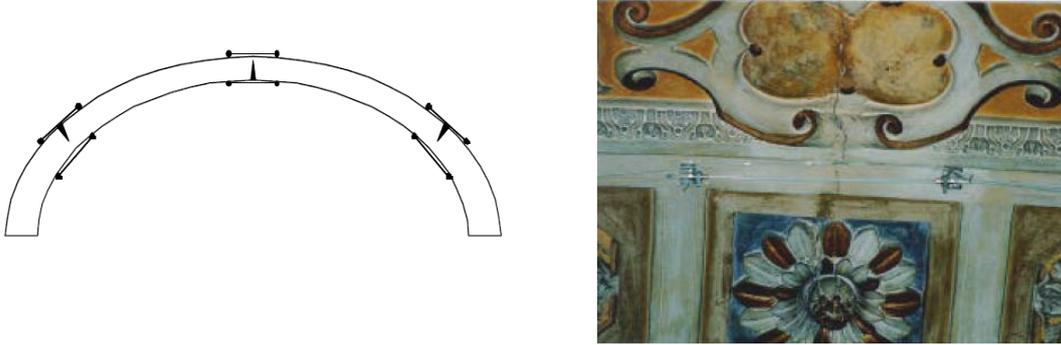


Fig. 2. 19 Vista de la fisuración en el arco y ubicación de los sensores (a). Imagen de una de las grietas y sensor SOFO instalado (b) (Glisic 2001).

Se realizó una monitorización continuada en el tiempo, obteniendo la evolución de las aberturas de fisuras de la clave y de los extremos, además de registrarse la evolución de la temperatura ambiente (Figura 2.20).

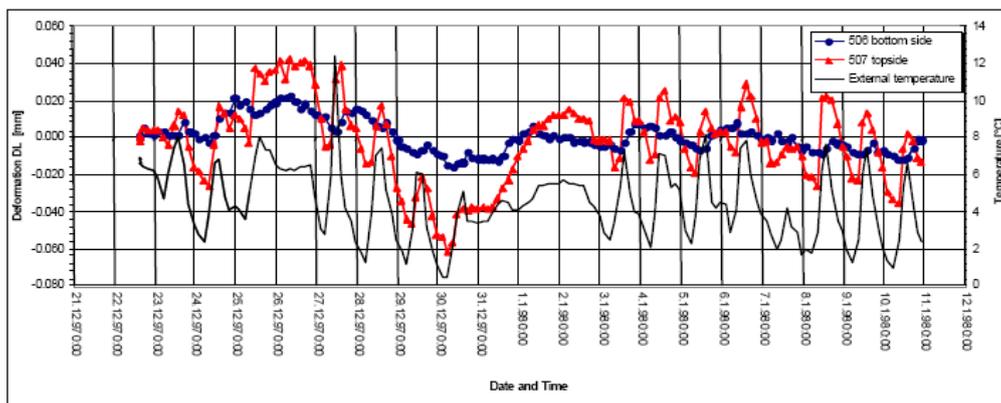


Fig. 2. 20 Evolución de la abertura de fisura y evolución de la temperatura ambiente. (Glisic 2001).

Tras un año de lectura, los sensores muestran deformaciones en las que la abertura de fisura alcanza un valor oscilante de 0,3 a 0,1 mm. Estos valores de abertura de fisura presentan una relación directa con la temperatura ambiente registrada, de modo que los valores máximos de la misma se alcanzan durante los meses de verano. Estos valores medidos no comprometen la estabilidad del arco.

El motivo de la aparición de las grietas se debe a una decompresión del arco motivado por unas obras de restauración, pero en la actualidad el arco ha encontrado una nueva configuración estable, por lo que no existe peligro de colapso.

2.1.11 - Monitorización del puente Götaälv (M. Enckell et al 2007).

Götaälv es un puente abatible de 950 m de longitud de vigas de acero y losa de hormigón construido en el año 1939, por el que discurre tráfico de carretera y de ferrocarril,. Se trata de

una de las más importantes redes de conexión del tráfico por carretera y ferrocarril entre la ciudad de Gothenburg e Hisingen (Figura 2.21).



Fig. 2. 21 Vista del Puente, durante una de sus maniobras de apertura (M. Enckell et al 2007).

La gran densidad del tráfico por carretera y ferrocarril causa efectos dinámicos en el puente, y durante la operación de apertura para el tráfico de barcos, se producen grandes cargas asimétricas.

Con el fin de aumentar la seguridad del puente, el Instituto Geotécnico Noruego (NGI), propone el empleo de un sistema de monitorización mediante sistemas ópticos. La casa Smartec es la responsable de llevar a cabo la instrumentación.

Para ello, un total de 5 vigas metálicas de sección en H, son seleccionadas para realizar la instalación. El sistema empleado para llevar a cabo la monitorización del puente recibe el nombre de DiTest, y consiste en controlar las deformaciones y la temperatura de los puntos donde se realiza la instalación. Mediante un único cable de fibra óptica, es posible realizar la monitorización de todo el puente completo, a partir de la multiplexación de los diferentes sensores. Ello supone pequeñas pérdidas de potencias en los espectros registrados (2 db), pero que no son significativas para la lectura.

La Figura 2.22 muestra los resultados obtenidos de tres de los sensores instalados. Las gráficas se encuentran en el mismo color, por lo que resulta muy difícil distinguir la ley que indica cada uno de ellos.

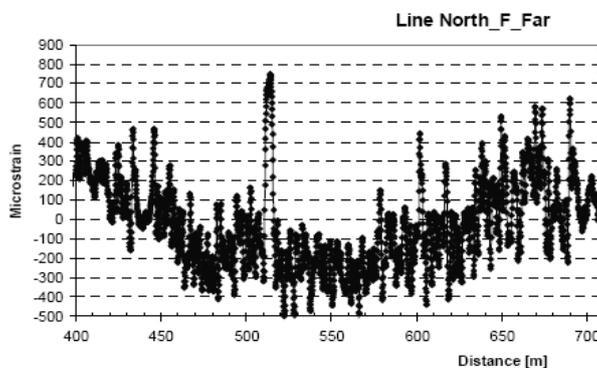


Fig. 2. 22 Deformaciones de las caras inferiores de las vigas metálicas (M. Enckel et al. 2007)

Las conclusiones que se obtienen de este estudio, recalcan que el puente se encuentra próximo al fin de su vida útil, y que en un futuro próximo será necesario ser reemplazado o en todo caso, rehabilitado. Las deformaciones registradas sufrían una leve tendencia ascendente con el paso del tiempo, situación que impulsó a tomar tal decisión.

Hay que comentar que algunos de los sensores instalados sufrieron desperfectos, debido al ataque medioambiental y al excesivo viento existente. En caso de rotura, la reparación de este tipo de sensor resulta muy compleja, por lo que no pudo obtenerse información en alguno de los puntos.

2.1.12 - Monitorización del puente arco Tranaberg (M. Enckell et al 2007).

El puente arco *Traneberg* ha sido rehabilitado manteniendo la estructura del arco de hormigón y reconstruyendo los pilares y el tablero. Aprovechando esta rehabilitación, se decide llevar a cabo un proceso de monitorización continuada en el tiempo, durante toda la fase de rehabilitación (16 meses). Con la monitorización del puente se preveé obtener información de las deformaciones y estudiar la afección de la temperatura sobre la fisuración del arco. La Figura 2.23 nos muestra una vista lateral de las secciones monitorizadas: A, B, C y D.

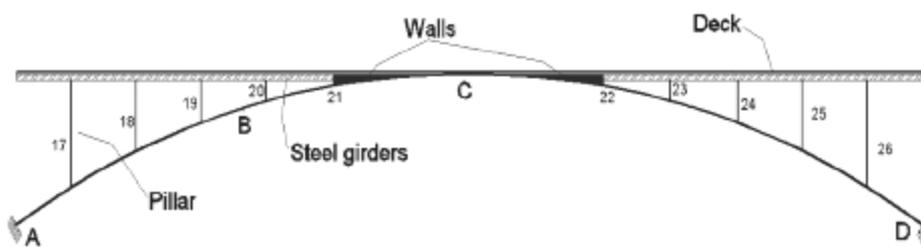


Fig. 2. 23 Vista lateral del Puente y de las secciones monitorizadas. (M. Enckell et al. 2007)

Los valores monitorizados confirmaron que el arco de hormigón, con 70 años de edad, se encuentra en buenas condiciones. Las fisuras sufren un comportamiento oscilante, motivado fundamentalmente por las variaciones de temperatura existentes, que provocan que cada una de las fisuras, se abran y se cierren (Figura 2.24).

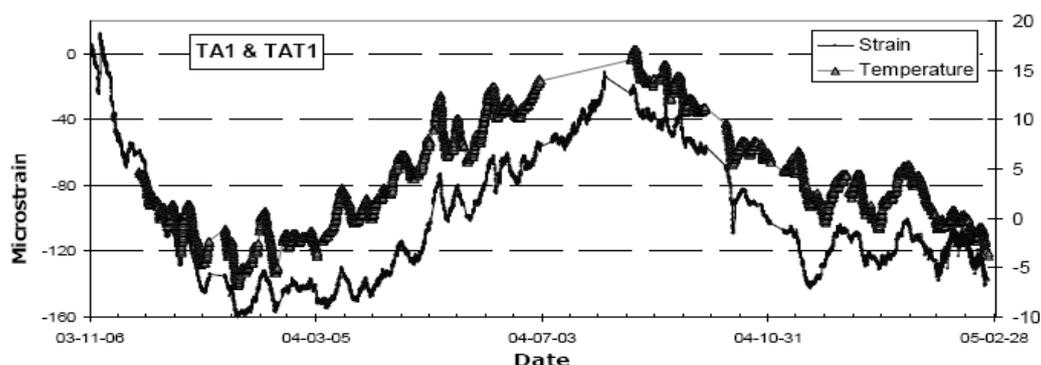


Fig. 2. 24 Ley de temperaturas y deformaciones, proporcionales en su forma. (M. Enckell et al. 2007)

2.1.13- Fibra óptica empleada para la monitorización de la retracción a edades muy tempranas (Alan CL Wong et al 2007).

Esta aplicación consiste en ensayos experimentales de laboratorio. No obstante, ya se ha realizado alguna aplicación en obras, para intentar controlar y evaluar la retracción plástica durante las primeras horas del hormigón.

Las pruebas consisten en embeber sensores ópticos en el hormigón, con un encapsulado especial que protege a la fibra óptica de roturas. La monitorización se realiza desde el mismo instante en que se produce el hormigonado (Figura 2.25).

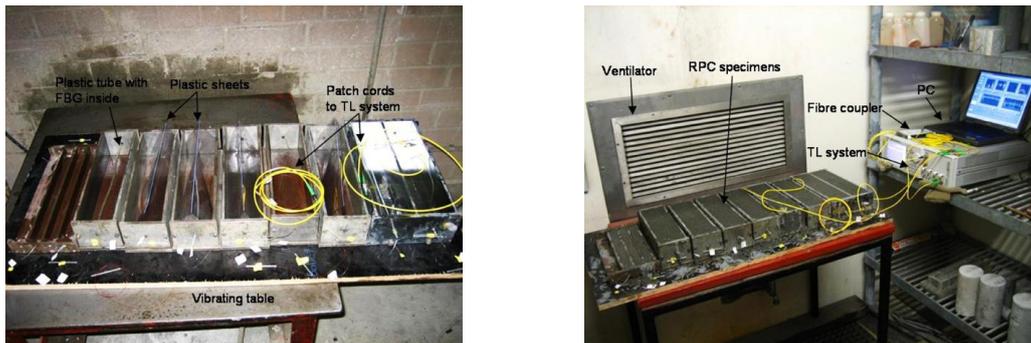


Fig. 2. 25 Sensores instalados en el interior de las probetas (a). Probetas hormigonadas en condiciones controladas de temperatura y humedad (b) (Allan CL Wong et al. 2007).

La Figura 2.26 muestra algunos resultados obtenidos tras los ensayos. Inicialmente se produce una expansión de aproximadamente, $125 \mu\epsilon$, que se debe a la absorción de agua durante el proceso de hidratación del cemento. Esta reacción es exotérmica, y se genera calor, por lo que la temperatura del hormigón también sufre un aumento. A partir de las 5 horas, comienza un proceso de acortamiento del hormigón, en el que, aproximadamente acaba a las 24 horas de comenzada la monitorización. En este proceso de acortamiento se alcanza un valor de $377 \mu\epsilon$. Este valor corresponde con un 80% del valor total de acortamiento que se alcanza a los 7 días ($488 \mu\epsilon$). Este acortamiento, coincide con un descenso importante de la temperatura.

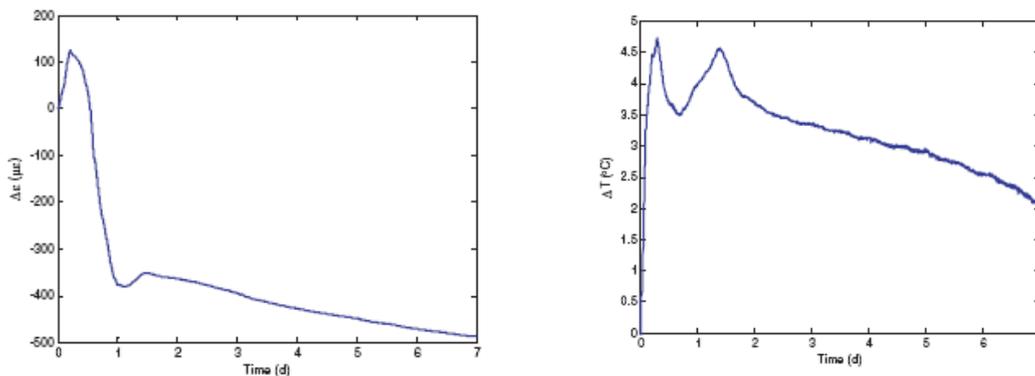


Fig. 2. 26 Retracción plástica del hormigón y su evolución térmica. (Allan CL Wong 2007).

Sobre la hora 35, el hormigón tiende a expandirse, y es debido al segundo aumento de temperatura. Esta pequeña expansión no es comparable a la primera, y ello es debido a que la probeta ya se encuentra endurecida por lo que la variación térmica presenta mucha menos influencia sobre la misma. Por otro lado, el segundo pico observado en la temperatura es propio en la reacción de hidratación del cemento, cuando se produce el agotamiento del yeso debido a la formación de aluminato tricálcio.

Por último, destacar que se ha estudiado el efecto del tamaño de la probeta analizada, o lo que es lo mismo, al volumen de hormigón empleado, existiendo mayores acortamientos por retracción y mayores temperaturas desarrolladas, en aquellas probetas que presentan un mayor tamaño (Figura 2.27).

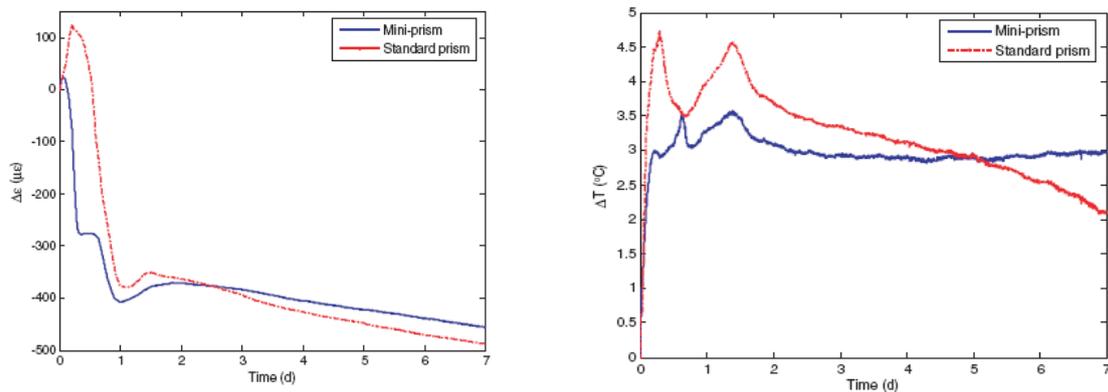


Fig. 2. 27 Comparativa de valores de retracción y temperaturas entre probetas normalizadas y probetas de un tamaño inferior (Allan CL Wong et al. 2007).

2.1.14- Monitorización de la corrosión de armaduras mediante sensores ópticos. (Pérez 2001).

Resulta evidente que debido al avance en el campo de la auscultación, diferentes tipos de sensores de fibra óptica están siendo propuestos para monitorizar parámetros relevantes en una estructura. Se está trabajando en la investigación de sensores capaces de medir PH en el hormigón, humedades, o la presencia de agentes corrosivos químicos. Pero a día de hoy, ningún sensor ha sido capaz de medir y monitorizar la corrosión en estructuras de hormigón.

Es por ello por lo que se está investigado en desarrollar un tipo de sensor Bragg Grating, que sea capaz de detectar este tipo de efecto. El sistema consiste en detectar el aumento de diámetro que sufren las barras de acero, cuándo éstas se ven afectadas por el fenómeno de la corrosión. Para ello, la fibra óptica se coloca de modo perimetral a la armadura, y perpendicular al eje principal de la barra (Figura 2.28).

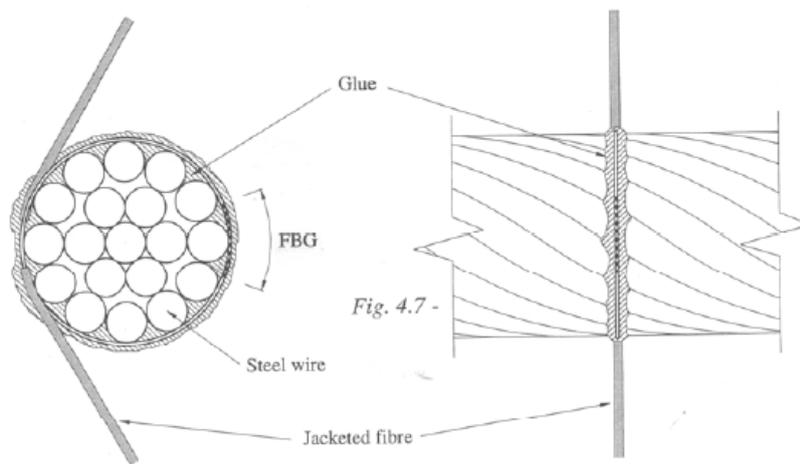


Fig. 2. 28 Detalle de colocación del sensor tipo FBG de modo perimetral en la armadura (Pérez, 2001).

Se han realizado otras pruebas con el objetivo de obtener un sistema capaz de detectar la corrosión en cables y armaduras. Se trata de embeber sensores ópticos longitudinales en la armadura o en el cordón de la estructura de hormigón, y que sea capaz de proporcionarnos información de la deformación del cable.

En caso de producirse un foco de corrosión, se produce un descascarillado de la barra, que supone un aumento de volumen, pero a su vez, una disminución de la sección resistente. Esto implica un aumento importante de la tensión en la barra, y por tanto un aumento considerable de deformación. Esto provoca una redistribuciones de tensiones en los diferentes alambres que forman el cordón (Figura 2.29).

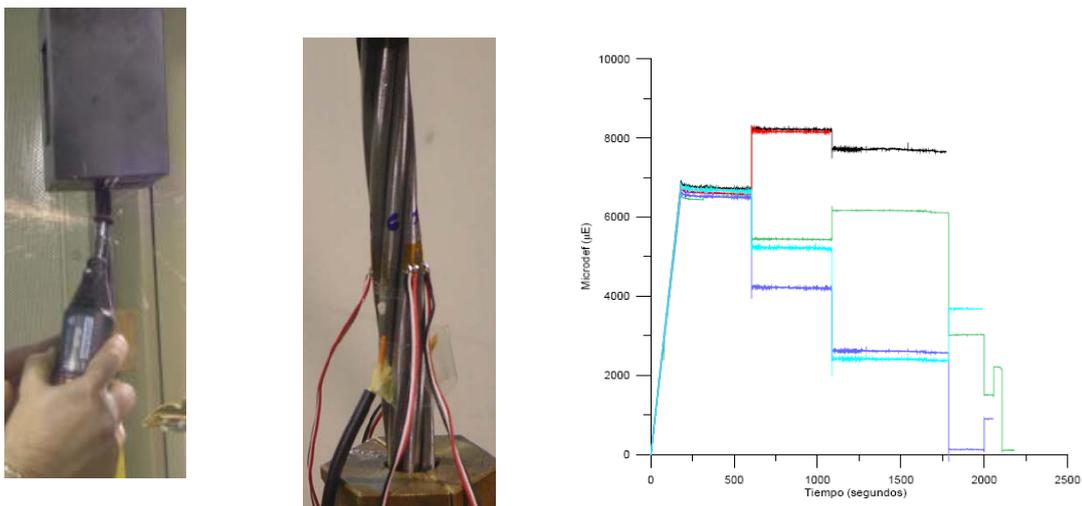


Fig. 2. 29 Instante de la ejecución de la muesca mediante corte con radial (a). Cordón monitorizado mediante galgas (b). Redistribución de tensiones al producirse la rotura de un alambre (c). (Casas, 2002).

2.1.15 - Control de la socavación en pilas de puentes mediante sensores ópticos (Schulz et al. 2002).

Otra de las aplicaciones de los sensores ópticos consiste en el control de las socavaciones en las pilas de los puentes, por efecto del paso del agua. Este hecho afecta a multitud de estructuras y puentes que tienen los cimientos sumergidos bajo el agua en áreas de fuertes corrientes.

Se trata de una medida indirecta, y consiste en dejar sumergida una barra de PVC, cercana al cimiento de la pila de puente (Figura 2.30). Sobre la barra metálica se coloca un sensor óptico, que capta las deformaciones de la barra debido a la corriente de agua que deforma la misma. Esta deformación es mayor a medida que más expuesta se ubica la barra a la corriente.

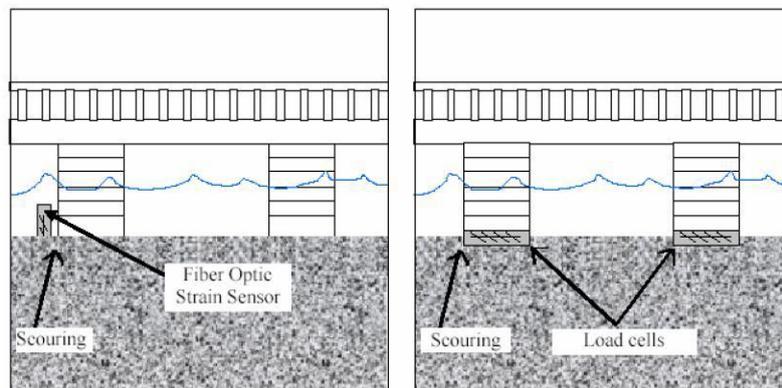


Fig. 2. 30 Monitorización de la socavación y el descentramiento de las pilas del puente debido al paso de la corriente (Schulz et al. 2002).

2.1.16 - Control de la circulación del tráfico mediante sensores ópticos (Schulz et al. 2002).

Las pruebas consisten en embeber sensores bajo de la capa de rodadura de la carretera, del modo indicado en la Figura 2.31. El paso de los vehículos supone fluctuaciones que son registradas por los equipos de medida. Este sistema de medición del tráfico es un procedimiento no invasivo, que no induce ningún tipo de interacción con la circulación, puesto que se encuentra totalmente enterrado. Además, también es posible detectar la velocidad de circulación de los vehículos.

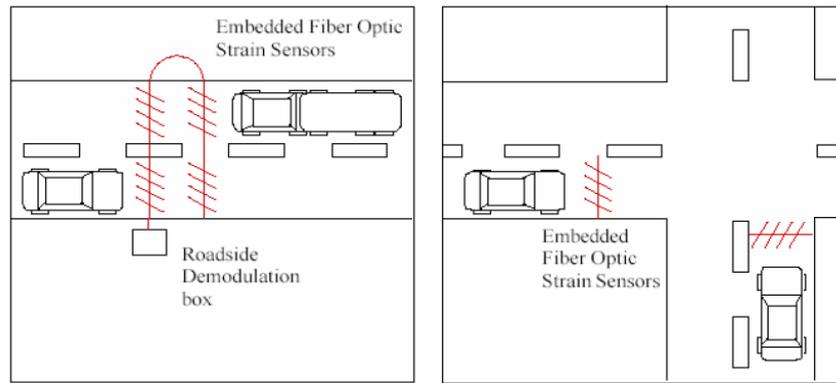


Fig. 2. 31 Sensores ópticos para control de la circulación del tráfico (Schulz et al. 2002).

2.2 - Aportaciones del presente trabajo de investigación y conclusiones relativas al estado del arte.

Cuando surge la necesidad de monitorizar una estructura para controlar ciertos parámetros relevantes de la misma, una de las técnicas empleadas que más importancia está cobrando es la monitorización y gestión mediante sensores basados en la tecnología de la fibra óptica. Es por ello, que el número de investigaciones relacionadas con esta técnica se encuentra en aumento actualmente.

Dentro de las investigaciones desarrolladas sobre la tecnología de la fibra óptica, destacan las de A. del Grosso, Farhad Ansari, Branko Glisic y Danielle Inaudi. Estos investigadores realizaron ensayos en laboratorio en los que empleaban la tecnología óptica, y más tarde, realizaron sus primeras aplicaciones en el campo de las estructuras reales, obteniendo un gran número de publicaciones y artículos.

En los últimos años, y aunque las investigaciones siguen siendo escasas, se ha mostrado cierto interés en investigar un aspecto concreto que engloba a los sensores ópticos y que resulta de especial importancia. Se trata del encapsulado del sensor. En este aspecto destacan las investigaciones realizadas por Yoji Okabe et al. (2002), K.S.C. Kuang et al. (2001) o Rupali Suresh et al. (2009).

Paralelamente con el estudio del encapsulado, se ha investigado en multitud de aplicaciones, ya que, para cada una de ellas es necesario una tipología concreta de encapsulado. Las investigaciones de Schulz et al. (2002), Volker Slowik et al. (2004), Daniele Inaudi & Branko Glisic (2007), A. del Grosso et al. (2007), o Allan C.L. Wong et al. (2007) ponen de manifiesto el avance en diferentes aplicaciones en el campo de la ingeniería, tales como la medida a edades tempranas del hormigón, del pH o de la corrosión de las armaduras.

El presente trabajo de investigación, titulado “Estudio experimental de sensores tipo FBG para medir deformaciones y temperaturas en estructuras”, tiene por objeto desarrollar un sistema integrado de monitorización y control en estructuras de hormigón y acero, así como el desarrollo de un sensor basado en la tecnología de la fibra óptica.

El punto de partida de este estudio es el trabajo de investigación correspondiente al Diploma de Estudios Avanzados (DEA) que con el título “Estudio experimental de sensores tipo FBG para medir deformaciones en estructuras” fue desarrollado por Gasch (2008). En él, se desarrolló un encapsulado de sensores de FO para la medida de deformaciones en probetas de hormigón y acero, pero no se planteó la aplicación de la tecnología a estructuras reales ni se hizo un estudio comparando las prestaciones del sensor desarrollado con las de sensores disponibles comercialmente.

Por ello, se han estudiado diferentes tipologías y configuraciones de encapsulados, y se han obtenido resultados válidos y que en ciertos aspectos, aventajan a otros sensores ópticos comerciales. Para poder afirmarlo, se han adquirido sensores comerciales, y se ha llevado a cabo un estudio comparativo, primero experimental y luego numérico.

Por tanto, llegados a este punto y para conseguir los objetivos de este trabajo se hace necesario plantear los aspectos en los que se ha realizado hincapié y se han obtenido resultados muy satisfactorios. Para ello, el presente trabajo de investigación considera importante aportar la siguiente información:

- Campañas experimentales del sensor patentado por los grupos de investigación ICITECH (Instituto y Ciencia de Tecnología del Hormigón) e ITEAM (Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia).
- Comparación y análisis de resultados obtenidos con el sensor desarrollado por el ICITECH e ITEAM con otros sensores ópticos comerciales.
- Análisis numérico por el MEF (Método de Elementos Finitos), concluyendo la bondad de dicho sensor óptico.
- Estudio paramétrico mediante modelizaciones por el MEF, con el objeto de estudiar la influencia de diversos parámetros en el funcionamiento del sensor óptico.

CAPÍTULO 3. DISEÑO DE UN SISTEMA DE MEDIDA DE DEFORMACIONES Y TEMPERATURAS EN ESTRUCTURAS, MEDIANTE SENSORES DE FIBRA ÓPTICA.

Este capítulo detalla los trabajos realizados por el alumno para el desarrollo de un sistema de medida de deformaciones y temperaturas en estructuras mediante sensores de fibra óptica. Los trabajos se han realizado en el marco de diferentes proyectos de investigación desarrollados por investigadores del ICITECH (Instituto y Ciencia de Tecnología del Hormigón) y del ITEAM (Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia).

El capítulo empieza con una descripción de las principales características de la tecnología de los sensores de fibra óptica aplicados a la monitorización estructural y con una explicación de sus ventajas frente a la extensometría clásica. Uno de los principales problemas de la fibra óptica es la necesidad de un sistema de encapsulado del sensor que permita fijarlo a la estructura auscultada de modo que las deformaciones de ésta se transmitan íntegramente al sensor sin deteriorarlo. Por ello, el apartado 3.7 muestra los ensayos en laboratorio empleados para validar el sensor y el sistema de encapsulado desarrollados. La tercera parte de este capítulo (apartado 3.8) presenta los ensayos numéricos realizados por el alumno con diferentes sistemas de encapsulado y que permitieron desarrollar un sistema de encapsulado eficaz. El apartado 3.9 muestra una descripción del software empleado para la monitorización de las estructuras. Finalmente, el apartado 3.10 muestra los ensayos en estructuras reales empleados para aplicar el sensor y el sistema de encapsulado desarrollados.

3.1 – La fibra óptica.

La fibra óptica es un medio de transmisión empleado habitualmente en redes de datos; un hilo muy fino de material transparente, vidrio o materiales plásticos, por el que se envían ondas o pulsos de luz que representan los datos a transmitir, siendo capaz de guiar una potencia óptica (lumínica), normalmente introducida por un láser o por un LED (Light-Emitting Diode).

La fibra óptica está constituida por tres capas, tal y como puede observarse en la Figura 3.1: núcleo, cubierta y recubrimiento. El núcleo central está hecho de cuarzo puro al que se le añaden pequeñas cantidades de dopantes (óxido de silicio y germanio), tiene un alto índice de refracción y un diámetro de 6 μm . En cambio, la cubierta, hecha de un material similar, presenta un índice de refracción algo menor para satisfacer la *Ley de Snell*, limitando de este modo, la propagación de la luz sólo a lo largo del núcleo. Tiene un diámetro de 125 μm . La última capa exterior del sensor de fibra óptica (FOS), llamada también recubrimiento, está hecha a base de acrilato, para dar a la fibra resistencia mecánica adecuada, protegiéndola frente a posibles daños y humedades. Presenta un diámetro de 250 μm .

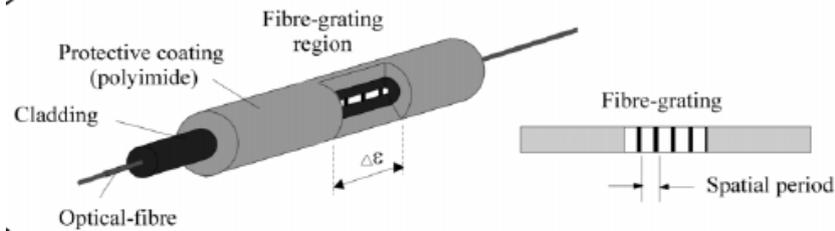


Fig. 3. 1 Vista de las capas de una fibra óptica (K-T Lau et al. 2001)

El índice de refracción de un material es la relación existente entre la velocidad de la luz en el vacío (c) y la velocidad de la luz en ese material (v), por lo que podemos deducir que la luz viaja más lentamente en aquellos medios con índices de refracción elevados. La dirección del rayo de luz va de un material con alto índice de refracción a otro de menor índice, tal y como predijo *Snell* en su *Ley de Refracción*.

Si recordamos el concepto de ángulo crítico, (ángulo de incidencia para el que el ángulo de refracción (r) alcanza los 90°), se puede explicar el funcionamiento de viaje de la luz en la fibra óptica. Si el ángulo de incidencia (i) de la luz es mayor que el ángulo crítico, la luz incidente se refleja totalmente, no existiendo de este modo refracción. De este modo, cuando la cobertura de la fibra óptica tiene un índice de refracción (n) menor que en el núcleo (n') y además el ángulo de la luz incidente es mayor que el ángulo crítico, el rayo de luz queda atrapado dentro del núcleo y es conducido a lo largo de la longitud de cable. Este funcionamiento se presenta en la Figura 3.2.

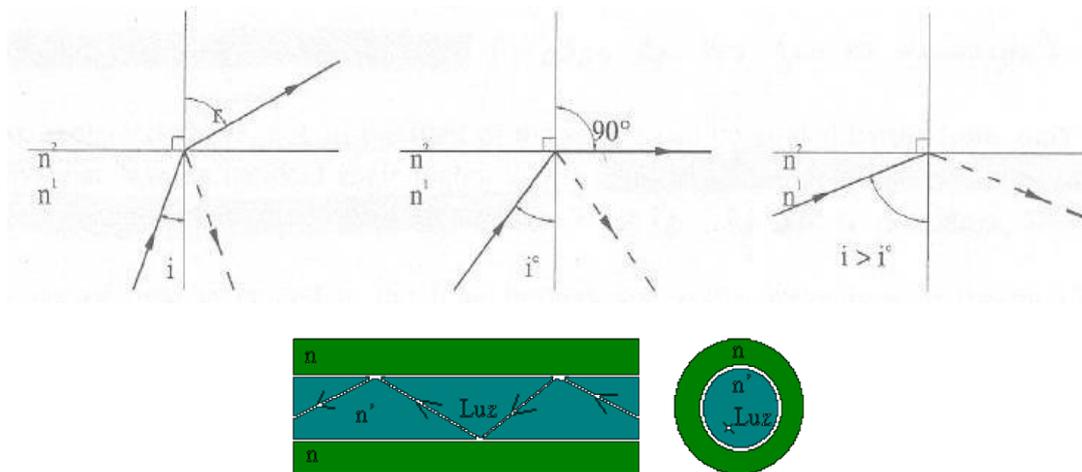


Fig. 3. 2 Ángulo incidente y ángulo crítico. Modo de viaje de la luz a través de la fibra óptica. (www.Wikipedia.es).

3.2 – Redes de Difracción de Bragg.

Antes de explicar el principio de funcionamiento de los sensores ópticos basados en FBG (en inglés, Fiber Bragg Grating), se explicará en qué consiste una Red de Difracción de Bragg (Figura 3.3).

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 Figura 3.3 se puede 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.

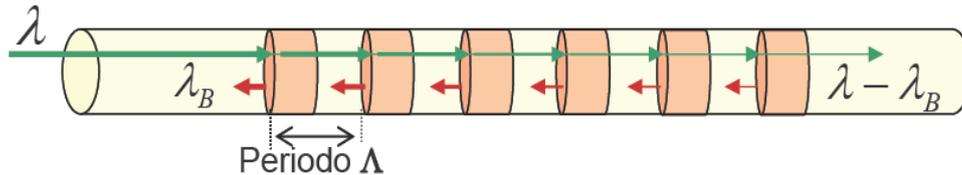


Fig. 3. 3 Esquema de una Red de difracción (Barrera, 2008)

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 , cuyo valor se indicará en el siguiente apartado.

3.3 – Principio de funcionamiento de los sensores de fibra óptica tipo FBG.

Una vez explicado el concepto de Red de Difracción de Bragg, explicaremos en qué consiste una FBG (Fiber Bragg Grating).

Una FBG es en un tipo de reflector, constituido en un breve segmento de fibra óptica, capaz de reflejar diferentes longitudes de onda de la luz. Esto se logra mediante una variación periódica del índice de refracción del material que forma el núcleo de la fibra, que es la que genera una variación de longitud de onda. En definitiva es una línea de filtros ópticos.

Una vez conocido el concepto de FBG, se comenta el principio de funcionamiento de estos sensores ópticos, que se resume en la Figura 3.4.

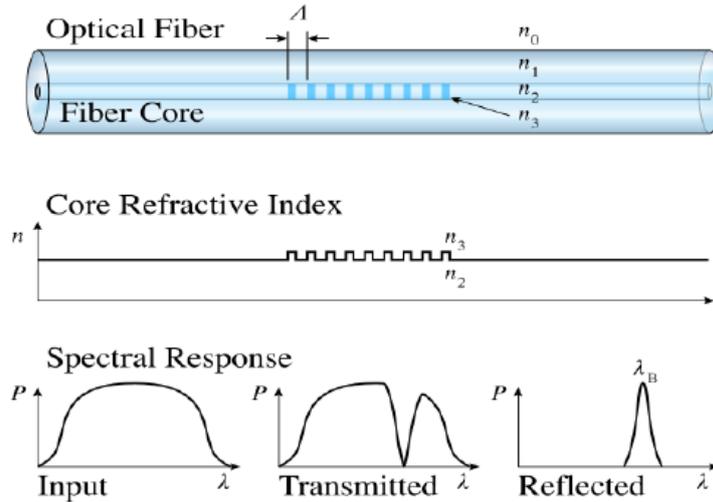


Fig. 3. 4 Principio de funcionamiento de los sensores ópticos basados en FBG (K-T Lau et al. 2001)

Se puede demostrar fácilmente que, en una red de difracción de Bragg, la longitud de onda del máximo de reflectividad, o mínimo de transmisividad (Longitud de onda de Bragg), viene determinada por la siguiente ecuación (Barrera et al., 2007):

$$\lambda_B = 2 n_{ef} \Lambda \quad (3.1)$$

Donde n_{ef} 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:

$$\Delta\lambda_B = K_\epsilon \epsilon + \lambda_B \xi_0 \Delta T \quad (3.2)$$

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.

Analizando la ecuación (3.2), se deduce que la variación de longitud de onda reflejada por la Red de Bragg viene dada por deformaciones y variaciones térmicas de la estructura. Para ello, se debe garantizar una correcta transmisión de deformaciones entre la FBG y la superficie que se pretende monitorizar mediante un sistema similar al de la Figura 3.5.

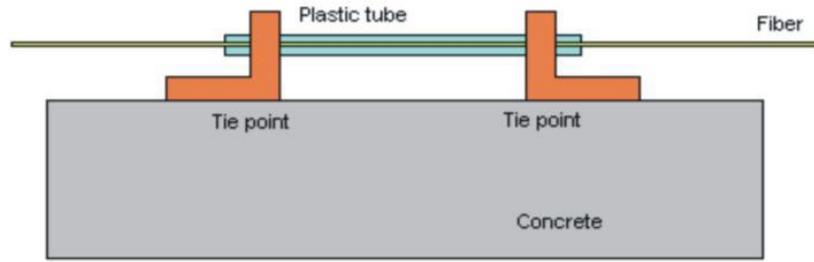


Fig. 3. 5 Instalación de una FBG en la superficie a monitorizar. Transmisión de deformaciones entre la superficie y la FBG (Barrera et al. 2008)

La Figura 3.6 muestra el comportamiento del espectro de luz reflejada frente a las deformaciones que sufre la Red. Aumentos en la variación de la longitud de onda reflejada por el sensor, indican que el periodo de la perturbación aumenta (ver ecuación 3.1), es decir, que la superficie se deforma a tracción. Por el contrario, variaciones decrecientes en la longitud de onda reflejada por el sensor, indican que el periodo de la Red de Bragg disminuye, estando las perturbaciones más próximas. Es decir, la superficie se deforma comprimiéndose. Por tanto, las deformaciones de la estructura se obtienen a partir de la variación de la longitud de onda reflejada por la Red de Bragg.

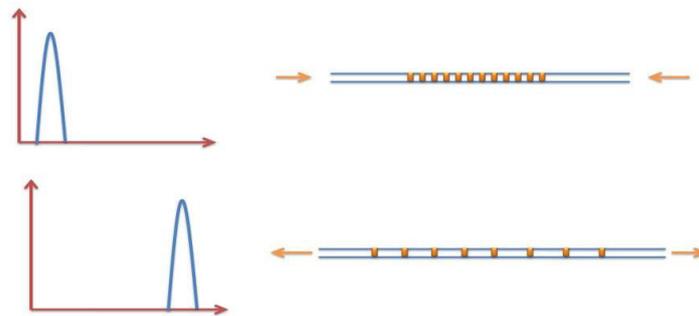


Fig. 3. 6 Variación en la longitud de onda reflejada por la Red de Bragg

Debido a que la *rejilla* (zona de las perturbaciones del índice de refracción) no es perfectamente pura, habrá pequeñas perturbaciones cerca de la onda reflejada. No obstante, esto no supone problema puesto que estas pequeñas perturbaciones son de muy baja potencia reflejada.

Los sensores FBG pueden incluso tener diferentes rejillas de Bragg, o gratings a lo largo de la longitud de la fibra, por lo que con un único cable se pueden obtener datos de puntos separados largas distancias (Figura 3.7). Este es uno de los motivos por el que los sensores FBG son preferidos en muchas aplicaciones de ingeniería civil, y han sido aplicados en grandes obras que requieren una monitorización distribuida en múltiples puntos.

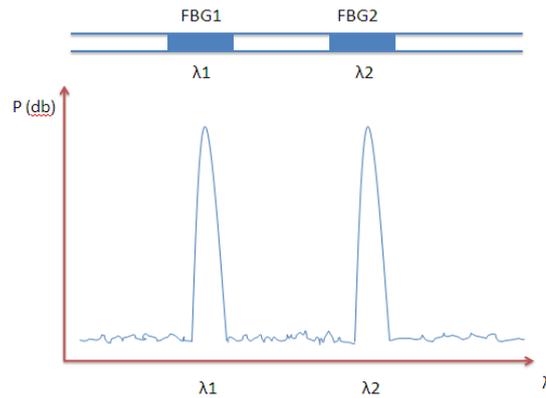


Fig. 3. 7 FBG en serie, sobre un mismo cable de fibra óptica.

3.4 – Elementos que conforman un sistema de monitorización óptico.

Un sistema de monitorización óptico está compuesto por los elementos siguientes (véase también la Figura 3.8):

- Una red o conjunto de sensores y conexiones.
- Un sistema de proceso de datos.
- Una fuente óptica.
- Un circulador.
- Un OSA (Optical Spectrum Analyzer).

Estos elementos se explican brevemente a continuación.

- La red o conjunto de sensores son los elementos encargados de medir los parámetros relevantes de la estructura monitorizada. Se instalan en los puntos de la estructura que se desee conocer información.
- El sistema de proceso de datos, que suele ser un PC, es el encargado de transmitir, adquirir y almacenar los mismos.
- La fuente óptica de luz es la encargada de transmitir las ondas de luz. Dependiendo de la fibra óptica utilizada en el sistema sensitivo se empleará como fuente óptica de luz:
 - Láser: Fuente suministradora de ondas de banda estrecha (luz formada por sólo una longitud de onda específica –luz monocromática-), para fibras ópticas que sólo propagan un modo de onda (fibras tipo monomodo).
 - LED (Light-Emitting Diode): Fuente suministradora de ondas de banda ancha (Luz formada por diferentes longitudes de onda –Luz policromática o luz blanca-), para fibras ópticas tipo multimodo.
- El circulador permite el paso de la luz en un sentido, desde la fuente óptica hacia las estrellas pasivas. A su vez, impide que el espectro de luz reflejado llegue de nuevo a la fuente óptica y sea dirigido hacia el analizador de espectros ópticos (OSA, Optical Spectrum Analyzer).
- El analizador de espectros ópticos (OSA, Optical Spectrum Analyzer) es el encargado de la obtención del espectro de luz y sus variaciones en el tiempo.

Actualmente, y debido a los avances que en los últimos años ha gozado el campo del sentido óptico, la fuente óptica de luz, el circulador y el OSA se engloban en un único elemento que

recibe el nombre de Interrogador, tal y como se muestra en la Figura 3.8. Este elemento es muy cómodo, fácil de transportar y de reducido tamaño, tal y como indica la Figura 3.9.

Todos los componentes del sistema deben estar unidos al cable de fibra óptica, por lo que las fijaciones pueden ser de dos tipos:

- Fijaciones permanentes: Mediante métodos de fusión, entre otros.
- Fijaciones móviles, mediante conectores.

En los puntos de fijación, se deben cuantificar las pérdidas de luz que se producen, aunque normalmente los valores obtenidos son del orden de 0.1 a 1.5 db.

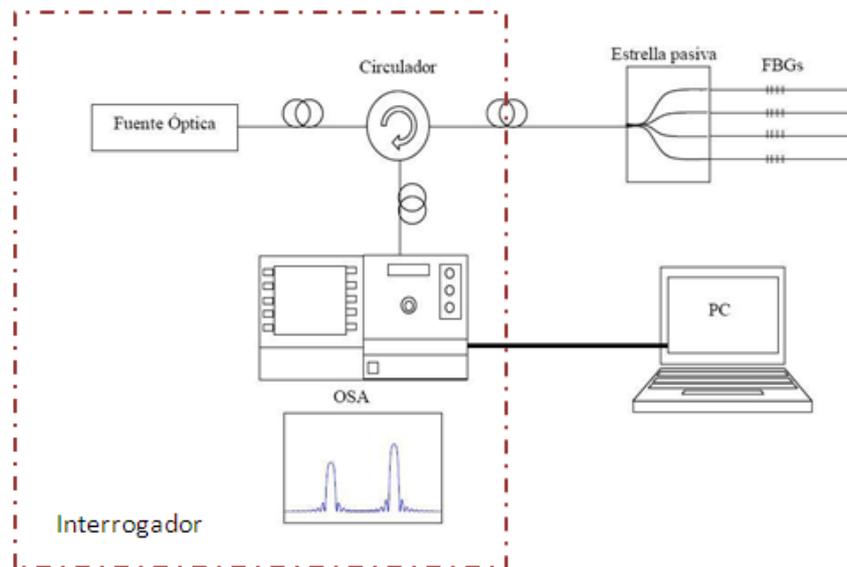


Fig. 3. 8 Elementos que forman un sistema de monitorización óptica basado en FBG (Barrera et al. 2008)

Al medir la reflexión que se produce en las diferentes FBGs, en caso de emplear un número menor de sensores que salidas tiene la estrella pasiva, es necesario introducir aquellas salidas de la estrella pasiva no utilizadas en líquido adaptador o, en su defecto, introducir pérdidas importantes para evitar las reflexiones que enmascaren los espectros de las distintas FBGs.

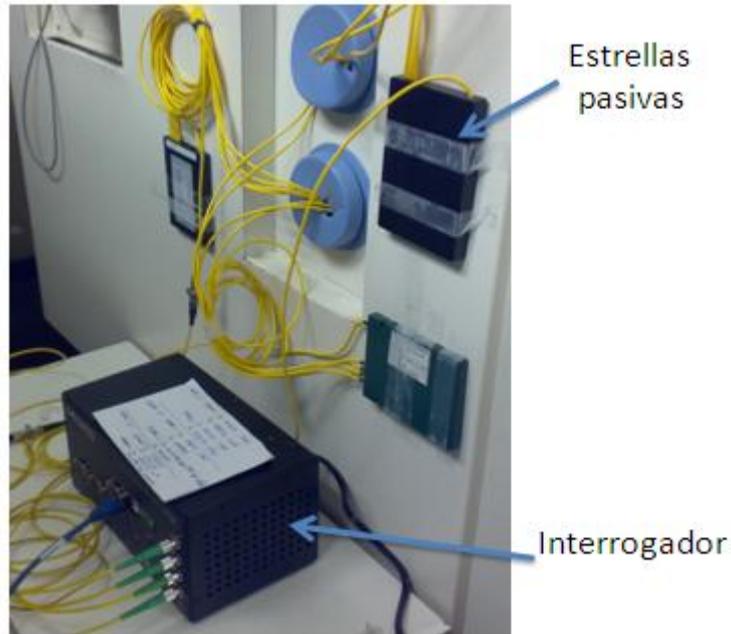


Fig. 3. 9 Montaje durante un ensayo. Estrellas pasivas e interrogador.

3.4.1. Modos de onda.

El rayo de luz emitido es guiado por el cable de fibra óptica a través de las múltiples reflexiones existentes entre el núcleo y su cobertura. Los diferentes rayos de luz que interfieren entre sí mientras que la onda de luz se propaga a lo largo del núcleo de la fibra reciben el nombre de modos de onda.

El número de modos que puede propagarse a través de una fibra óptica viene dado por la siguiente ecuación:

$$M = \frac{2 \pi^2 r_{co}^2}{\lambda_0^2} (n_{co}^2 - n_{c1}^2) \quad (3.3)$$

Siendo:

- r_{co} Radio del núcleo
- λ_0 Longitud de onda de la luz en el vacío.
- n_{co} índice refractivo del núcleo
- n_{c1} índice refractivo de la cobertura.

Dependiendo de los modos de onda que pueden propagarse, existen dos tipos de fibra óptica:

- a) Fibra óptica monomodo, en la que sólo se puede propagar un modo de onda, tal y como indica la Figura 3.10.

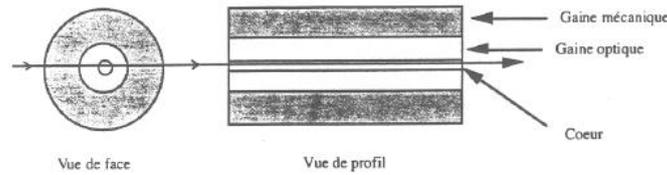


Fig. 3. 10 Fibra monomodo (Barbachi, 1996)

b) Fibra óptica multimodo, en la que pueden ser guiados diferentes modos de onda. A su vez, se distinguen dos tipos:

b.1) “Step-Index”, que se caracteriza por tener un índice de refracción constante en todas las partes del núcleo (Figura 3.11).

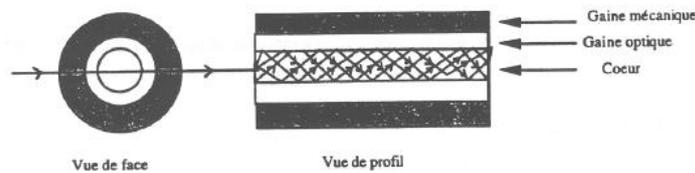


Fig. 3. 11 Fibra multimodo Step-Index (Barbachi, 1996)

b.2) “Gradded- Index”, que se caracteriza por tener un índice de refracción variable. El valor máximo del índice se encuentra en el centro de la fibra óptica, mientras que los valores de las capas exteriores decrecen gradualmente hacia la capa de cobertura (Figura 3.12).

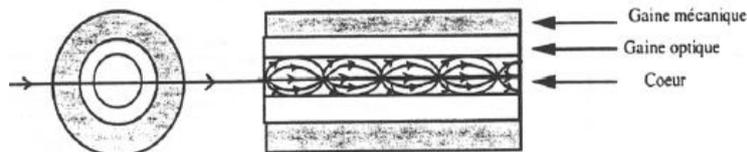


Fig. 3. 12 Fibra Multimodo Gradded-Index (Barbachi, 1996)

Los sensores utilizados en las fibras monomodo, son los denominados Sensores Interferométricos y Sensores Polarimétricos. En cambio, los sensores empleados con las fibras multimodo, son los llamados Sensores de Modulación de Intensidad, y Sensores Espectométricos. En la Figura 3.13 se muestra una tabla resumen con las dimensiones más importantes de estos tipos de fibra.

Tipo de fibra	Diámetro del núcleo	Diámetro de la carcasa
Monomodo	2-8 μm	80- 125 μm
Multimodo Step-Index	80-200 μm	100-250 μm
Multimodo Gradded-Index	50-100 μm	125-150 μm

Fig. 3. 13 Características básicas de las fibras ópticas (Braunstein J. et al. 2002)

3.5 – Extensometría clásica versus Monitorización óptica. Ventajas e inconvenientes.

Desde hace algunos años, la electrónica y la óptica han sido tecnologías que han competido en el campo de los elementos sensitivos. Obviamente, la historia industrial de los sensores eléctricos es bastante más extensa que la historia industrial de los sensores ópticos, puesto que su tecnología, dispositivos y elementos, se han desarrollado durante mucho más tiempo. Los precios son más asequibles, y éste es uno de los motivos por los que su uso es más frecuente.

Sin embargo, en la actualidad, tanto las fibras ópticas como los láseres han alcanzado un gran desarrollo y compiten cada vez más con los sensores eléctricos al tener cada vez unos costes más reducidos.

Los sensores ópticos ofrecen algunas ventajas interesantes frente a los sensores eléctricos, que se detallan a continuación:

- a) El sensor óptico es un elemento pasivo. Esto significa que no requiere energía eléctrica en el punto a medir. Por este motivo, no se genera calor y por tanto, no existe riesgo eléctrico ni peligro de incendio.
- b) El sensor óptico presenta una elevada sensibilidad. Es capaz de detectar variaciones muy pequeñas.
- c) El sensor óptico se caracteriza por su pequeño tamaño y su flexibilidad, por lo que pueden ser instalados en superficies complejas.
- d) Son completamente inmunes frente a las interferencias electromagnéticas y frecuencias de radio (EMI/RFI) puesto que la información no se transfiere como señal eléctrica.
- e) Los sensores ópticos destacan por sus altos rangos de temperatura de trabajo. En caso de que el núcleo de la fibra óptica sea de zafiro, es posible alcanzar valores de 1500°C.
- f) Los sensores ópticos presentan ventajas importantes trabajando en ambientes corrosivos, siendo totalmente fiables frente a estas patologías en las estructuras.
- g) La multiplexación de los sensores permite instalar varios sensores en un único cableado de fibra óptica.
- h) Presentan ciclos de vida largos, soportando cargas elevadas en tracción, con alargamientos de hasta un 5%, es decir, 50.000 $\mu\epsilon$.
- i) Las pérdidas de señal en el cable de fibra óptica son despreciables, hasta un límite de 5 km de longitud.
- j) El sensor óptico presenta la capacidad de ser compensado térmicamente,

Los sensores de fibra óptica también presentan desventajas. Las que deben tratarse con especial precaución se enumeran a continuación:

- a) Los sensores ópticos son elementos débiles y frágiles. Es muy importante extremar las precauciones durante la instalación, para evitar así roturas inesperadas.
- b) En caso de rotura, los sensores de fibra óptica son muy difíciles de reparar, por lo que pueden quedar inservibles.
- c) Frente a los sensores ópticos con su pequeño tamaño, volumen y peso, la obra representa un medio hostil en el que abundan diferentes tajos superpuestos, maquinaria pesada y suciedad. En este aspecto el sensor óptico se ve obligado a convivir junto con los condicionantes que impone la obra. En principio, esto supone una batalla en el que el sensor óptico tiene todas las de perder.

- d) Se debe extremar la precaución con la suciedad. Es importante mantener las conexiones limpias, exentas de polvo. En caso contrario la detección del sensor resulta complicada, llegando incluso a reflejar tan poca potencia debido a pérdidas por suciedad que resulta difícil detectar el mismo (Figura 3.15).
- e) Del mismo modo, se debe extremar la precaución con los dobleces del cableado. Un doblez muy pronunciado como el indicado en la Figura 3.14 impide la transferencia de la luz, y evita la detección del sensor.

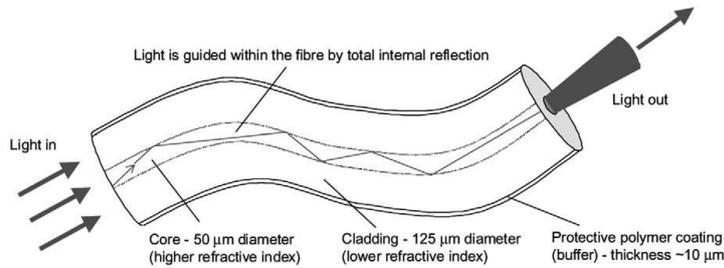


Fig. 3. 14 Dobleces en el cableado de fibra óptica, y dificultad para transmitir la luz. (Gerard F. 2005)

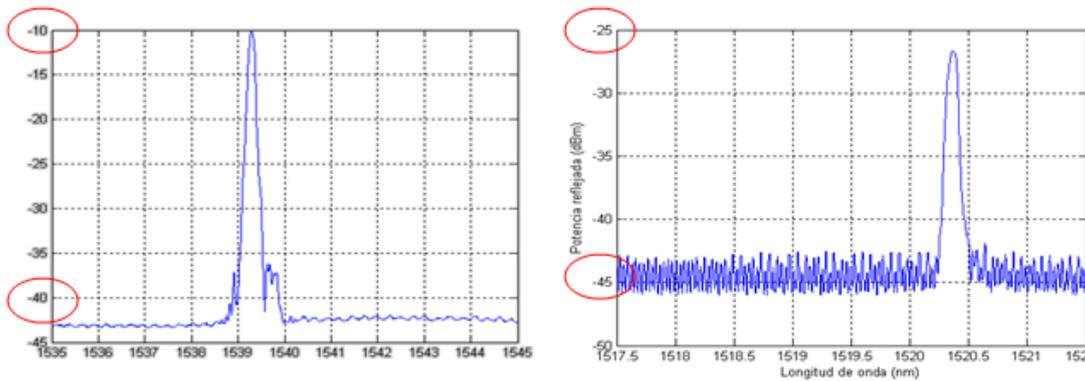


Fig. 3. 15 Pérdida de potencia reflejada debido a un doblez en el cableado.

3.6 – Tipos de sensores de fibra óptica.

Los sensores de fibra óptica se pueden clasificar en función de varios criterios:

3.6.1-Su aplicación:

- a) *Localizados.* Se trata de sensores preparados para realizar medidas puntuales (valor exacto), o medidas extendidas (valor promedio de la región extendida). Hay que conocer previamente los puntos de estudio. Esto puede ser su inconveniente. (Ansari et al 1997; Inaudi et al. 1996 y 1998).
- b) *Distribuidos.* Se trata de sensores preparados para realizar una medida continua a lo largo de una fibra. Por medio del OTDR (Optical Time- Domain Reflectometry), es posible obtener una lectura continua de la medida en función de la posición del sensor. La principal ventaja de su aplicación es que, con un solo cable de fibra óptica, se puede medir en cualquier punto, además de usar sólo una fuente de luz y un sistema de

procesado. No obstante, la precisión y la sensibilidad, son menores que la de los localizados. Sólo los sensores Moduladores de Intensidad pueden ser distribuidos. (Ansari, 1997; Gu et al. 2000).

- c) *Multiplicados o multiplexed*. Su funcionamiento es parecido al de los sensores distribuidos, pero la característica principal de estos sensores, es que sólo miden en puntos específicos de la fibra. Normalmente, se construyen mediante una combinación de varios sensores individuales. (Ansari 1997; Davis et al. 1997; Maaskant et al. 1997). Los sensores ópticos *multiplexed* más empleados son los sensores Bragg-Grating (Figura 3.16) empleados en este trabajo.

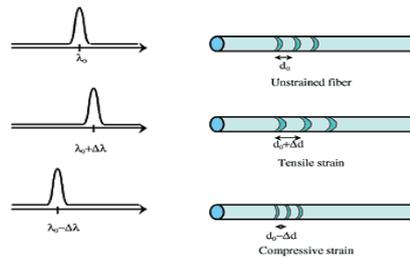


Fig. 3. 16 Sensor tipo Fiber Bragg Grating. Principio de funcionamiento (JS. Leng et al. 2006)

3.6.2 -El medio sensitivo:

- a) *Sensores intrínsecos*. La medida se realiza sobre la fibra óptica, y los cambios que se producen, son sobre las propiedades de la fibra óptica. La fibra es empleada como medio de transporte de la luz, y como medio sensitivo.
- b) *Sensores extrínsecos*. La fibra óptica es usada puramente como medio de transporte, para transportar la luz desde la fuente a la parte sensitiva, y de la parte sensitiva al sistema de modulación (sistema que recibe la luz saliente del sistema y lee las propiedades físicas que se desea). Por lo tanto, la luz no sufre ningún cambio a lo largo de la fibra óptica.

3.6.3 -El parámetro a medir:

Dependiendo de las propiedades de la luz que queramos modular (intensidad, fase, longitud de onda o estado de polarización), éstos se pueden clasificar como:

- a) *Moduladores de intensidad*. Es el tipo de sensor que mide cualquier parámetro que pueda producir pérdidas de intensidad en la luz guiada. Los principales fenómenos que producen atenuación de la luz son microcurvaturas, temperaturas, radiación ionizada... Utilizando este tipo de sensores, se puede llegar a medir parámetros como variación de tensiones, temperatura, radiación y humedad. (Ansari 1997;Merlo et. Al 2000).
- b) *Sensores interferométricos*. La fase de la luz guiada es modificada. El cambio de fase es monitorizado mediante el uso de este tipo de sensores. Son los sensores ópticos más precisos y más sensibles. Los principales parámetros que se pueden medir en estos

sensores son tensiones, temperaturas, vibraciones ultrasónicas y rotaciones. (Ansari, 1997; lee et al. 1997). Los sensores interferométricos más usuales, son los sensores *Fabry-Perot*. Por su importancia se explican con detalle en el apartado 3.6.4.

- c) *Sensores espectrométricos*. Este tipo de sensores controlan los cambios de la longitud de onda de la luz. Una onda de luz de banda estrecha con un rango espectral amplio, se lanza contra el sensor, y éste, retorna un pico de luz, con otro rango espectral menor. Cualquier cambio de las propiedades físicas del sensor (rejillas dentro de la fibra óptica), produce un cambio en la longitud de onda del pico de la luz. Pueden monitorizar tensiones y temperaturas. (Ansari et al. 1997; Housner et al. 1997). Los sensores espectrométricos más usuales son los *Bragg-Grating*. La sensibilidad de los sensores espectrométricos es menor que la sensibilidad de los sensores interferométricos, pero su configuración, instalación y procesado de datos es más simple.
- d) *Sensores polarimétricos*. Sensores basados en la polarización de la luz guiada. Son los que menor sensibilidad presentan.

A continuación se muestra un resumen de lo explicado anteriormente.

CRITERIO	TIPOLOGÍA	APLICACIÓN
Aplicación	Localizados	Medida puntuales
	Distribuidos	Medidas continuas
	Multiplicados	Medidas distribuidas
Medio sensitivo	Intrínsecos	Fibra medio sensitivo
	Extrínsecos	Fibra medio de transporte
Parámetro a medir	Modulador de intensidad	σ , Tº, humedad, radiación
	Interferométricos	σ , Tº, rotaciones, vibraciones
	Espectrométricos	σ , Tº
	Polarimétricos	Uso casi nulo o muy limitado.

Tabla 3. 1 Cuadro resumen con los diferentes tipos de sensores.

3.6.4 – Sensores interferométricos.

Este tipo de sensores ópticos son los que mayor precisión y sensibilidad presentan de cuántos sensores ópticos existen en el mercado. En la actualidad gozan de un uso muy extendido en multitud de instrumentaciones y aplicaciones ingenieriles. Las publicaciones de A. del Grosso (2002), B. Glisic (2001) o M. Enckell (2006), ponen de manifiesto la importancia de esta tipología de sensor óptico. A pesar de todo esto, alguna de sus principales limitaciones (la complejidad de funcionamiento, montaje y compensación térmica) hace que sean otros tipos de sensores ópticos los que en ocasiones sean preferidos en su lugar.

En esta tipología de sensor, se modifica la fase de luz a través de la fibra óptica, por lo que se obtienen variaciones de fase. Como se apuntó anteriormente, las fibras monomodo son las empleadas para modular la posición de la fase, por lo que la fibra óptica debe ser de este tipo, y

por lo tanto, se debe disponer de un Láser como fuente suministradora de ondas de banda estrecha.

La principal ventaja de estos sensores es que son los sensores de fibra óptica más sensibles, pudiendo alcanzar resoluciones de 10^{-9} rad en el cambio de fase, que conduce a resoluciones de desplazamiento de 10^{-12} m (Culshaw, 1982). No obstante, existen desventajas, como por ejemplo, que las variables de tensión y temperatura no pueden separarse, o la complejidad electrónica de su configuración.

3.6.4.1. Principio de funcionamiento.

El funcionamiento es el siguiente: para poder detectar los cambios de fase de la luz guiada, la luz se divide en dos rayos de igual amplitud. Uno de estos rayos, es inyectado dentro de una fibra que ha sido aislada de la zona de medida (fibra de referencia R), mientras que el otro rayo, es introducido en el interior de otra fibra, que es sometida, a los efectos de la medida que se desea realizar (fibra sensitiva S).

Una vez los rayos de luz han pasado a través de las dos fibras, se compara la posición de fase de los dos rayos, y se obtiene su diferencia de fase. La luz que ha viajado por la fibra de referencia no ha sufrido ningún cambio respecto a la posición de fase inicial. En cambio, la luz de la fibra sensitiva si experimenta cambios de fase respecto a la fase inicial, debido a los cambios de longitud o a los cambios del índice de refracción de la fibra sensitiva.

Teniendo en cuenta lo anterior, si las medidas que se quieren efectuar afectan a la longitud o al índice de refracción, es posible establecer una relación entre las medidas y el cambio de fase obtenido. Por tanto, en la salida de las dos fibras ópticas, existirá una diferencia de fase que dependerá del parámetro que se ha deseado medir.

Esta diferencia de fase, se obtiene mediante la siguiente ecuación (3.4) obtenida de la teoría interferométrica:

$$\Delta\phi = \phi_S - \phi_R = \left(\frac{2\pi}{\lambda_0}\right) (n_S Z_S - n_R Z_R) \quad (3.4)$$

Siendo:

- λ_0 Longitud de onda de la luz en el vacío.
- n índice de refracción efectivo del núcleo de la fibra óptica.
- z , longitud de la luz viajada a lo largo de la fibra.
- R, S hacen referencia a la fibra de referencia y sensitiva, respectivamente.

Es importante señalar que el índice de refracción puede ser afectado por diferentes medidas, provocando así problemas de lecturas. Por ejemplo, si el elemento sensitivo es simultáneamente sometido a una tensión axial y a una variación térmica, el cambio de fase resultante es suma de ambos efectos, y por tanto, no es posible identificar los cambios de fase por separado. En estos casos, lo más frecuente es emplear combinaciones de sensores interferométricos y polarimétricos, para identificar los cambios de fase por separado.

3.6.4.2. Interferómetro Fabry- Perot.

En la actualidad, este tipo de sensor interferométrico es el más empleado, en compañía de los sensores Bragg-Grating.

La diferencia principal de los Fabry- Perot con el resto de interferómetros, es que éstos no requieren una fibra de referencia, sino que en su configuración sólo existe una fibra, con dos espejos. Estos espejos son los que producen una señal de interferencia, creando entre ellos la región sensitiva.

Por tanto, una ventaja evidente de este tipo de sensores es la simplicidad de funcionamiento y su elevada sensibilidad. El sensor Fabry-Perot es el más sensible de los sensores ópticos disponibles. Normalmente, se emplea para medir tensión y temperatura. (Quirion & Ballivy, 2000).

Existen dos tipos de interferómetros Fabry-Perot:

- a) Interferómetro Intrínseco Fabry-Perot (IFPI)
- b) Interferómetro Extrínseco Fabry-Perot (EFPI)

3.6.4.2.1- Interferómetro Intrínseco Fabry-Perot (IFPI).

En este caso, la luz siempre viaja en el interior de la fibra óptica. Se forma una cavidad entre los dos espejos reflectores colocados dentro de la fibra (forman parte integral de la longitud continua de la fibra), creando así la zona sensitiva.

Existen dos posibles configuraciones sobre el principio de operación de este tipo de sensores:

- a) Reflexión.

La luz entrante es parcialmente reflejada en el primer espejo (aproximadamente un 95%), siendo éste, el rayo equivalente al rayo de luz de referencia utilizado en otros interferómetros. Mientras, la luz transmitida en la cavidad, es reflejada en el segundo espejo, siendo éste, el equivalente al rayo de luz sensible en otros interferómetros.

Es la configuración más habitual, y esquemáticamente se muestra en la Figura 3.17.



Fig. 3. 17 Reflexión en un IFPI (Quirion et al. 2000)

- b) Transmisión.

La luz entra dentro de la cavidad, y es parcialmente reflejada en el segundo espejo (se refleja el 95%). La luz reflejada, se refleja de nuevo en el primer espejo, escapando finalmente a través

del segundo. Los dos rayos de luz, interfieren fuera de la cavidad, del modo indicado en la Figura 3.18.

El problema es que se pueden dar múltiples reflexiones dentro de la cavidad, provocando interferencias.

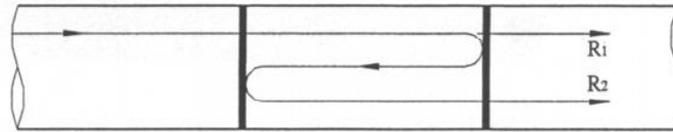


Fig. 3. 18 Transmisión en un IFPI (Quirion et al. 2000)

3.6.4.2.2. Interferómetro extrínseco Fabry-Perot (EFPI).

En este caso, la cavidad Fabry-Perot está formada por una zona de aire creada entre los extremos de dos fibras ópticas alineadas entre sí dentro de un tubo hueco. La primera fibra es una fibra monomodo, mientras que la segunda es una fibra multimodo, y es empleada como reflector.

La luz entrante es parcialmente reflejada (R1) al final de la fibra monomodo, (habitualmente 5% de reflexión), siendo ésta equivalente a la luz de referencia en los otros interferómetros. La luz transmitida se refleja (R2) en la cara de la fibra multimodo, siendo ésta la equivalente a la luz sensitiva en los demás interferómetros (Figura 3.19).

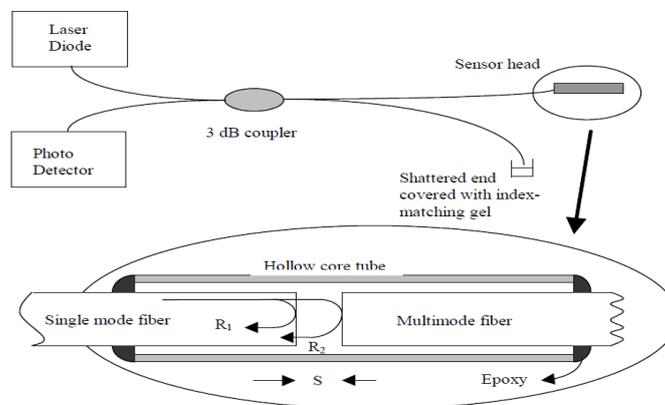


Fig. 3. 19 Interferómetro extrínseco Fabry Perot (Quirion et al. 2000)

3.6.4.3. Interferómetro SOFO.

Uno de los sistemas de instrumentación de estructuras más empleado en la actualidad es el conocido como Sistema SOFO (en francés, Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques). La figura 3.20 muestra el esquema de un sistema de monitorización estructural SOFO, en el que aparece la red de sensores ópticos, el acoplador de sensores, la unidad de lectura SOFO y el sistema de almacenamiento y tratamiento de datos. Este sistema pertenece a la casa Smartec SA.

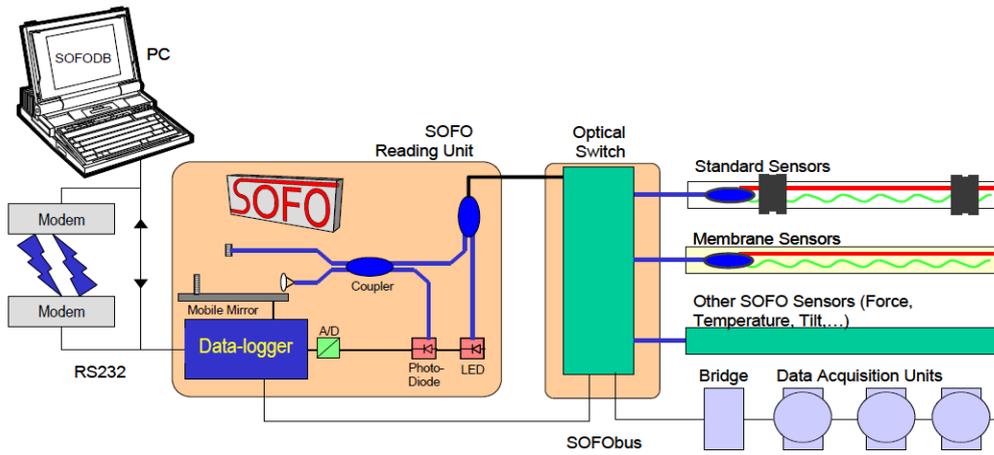


Fig. 3. 20 Sistemas de monitorización de estructuras SOFO (Glisic & Inaudi, 2007)

3.7 – Fase experimental.

3.7.1 – Generalidades.

Con objeto de estudiar la validez y las prestaciones de la fibra óptica como sistema de medida de deformaciones en una estructura, se llevó a cabo una campaña de ensayos experimentales donde se ensayaron probetas a escala real. Estos ensayos se realizaron durante el pasado año 2008 en los laboratorios del ICITECH (Instituto y Ciencia de Tecnología del Hormigón).

Los resultados y conclusiones relativas a estos ensayos pueden consultarse en el Documento de Estudios Avanzados (DEA), titulado “Estudio experimental de sensores tipo FBG para medir deformaciones en estructuras” (Gasch, 2008). Estos estudios han aportado conclusiones relativas a la validez de una fibra FBG (Fibre Bragg Grating) para medir deformaciones en la superficie de hormigón.

Sin embargo, se necesita profundizar en este aspecto. Se hace necesario determinar un encapsulado óptimo, que permita la manipulación del sensor, el pegado, una correcta medición, y buen comportamiento frente a variaciones térmicas. Además es necesario avanzar en otras aplicaciones mediante sensores ópticos, y el desarrollo de un sistema de monitorización en tiempo real.

Para conseguirlo, es necesario realizar campañas experimentales para verificar el comportamiento de los sensores propuestos, y extender la aplicación de los mismos a otros materiales, como acero.

Por otro lado, también se profundiza en el desarrollo de un sensor capaz de medir otros parámetros, como la temperatura y deformaciones en la masa del hormigón, retracción plástica a edades muy tempranas, deformación en la armadura de una estructura de hormigón y un sensor capaz de compensar el efecto térmico.

3.7.1.1 – Estudio experimental.

Tal y como se citó en el apartado 3.7.1., la fase experimental a la que se hace referencia y sirve de punto de partida al presente trabajo fue desarrollada por Gasch (2008).

A continuación se describen los aspectos que se han tenido en cuenta en la realización de las nuevas campañas experimentales que forman este trabajo.

3.7.1.2 – Características de las probetas.

Se ha ensayado en laboratorio un total de 43 probetas. De ellas, 30 probetas fueron de hormigón, mientras que las restantes 13 fueron metálicas.

Las probetas de hormigón son normalizadas, cilíndricas de 30 cm de altura y 15 cm de diámetro. Las probetas metálicas, son puntales cortados en tramos de 30 cm de altura.

Con objeto de conseguir un contacto plano entre las probetas y la prensa, en las probetas de hormigón se realiza un refrentado de azufre en la cara superior de las mismas.

Para las probetas metálicas, se efectúa el corte perpendicular a la directriz del puntal, de modo que el contacto entre la prensa y la superficie del puntal sea plano.

3.7.1.3 – Propiedades de los materiales.

Puesto que las campañas experimentales tienen por objeto llevar a cabo una comparativa entre dos sistemas de medida (Por un lado, galgas extensométricas que sirven de referencia, y por otro, los sensores ópticos a validar), no se le ha exigido ninguna característica especial al hormigón empleado. Tabla 3. 2 Cuadro

La nomenclatura del hormigón empleado es HM-25/B/20/IIIa, y su dosificación para una amasada de 25 litros se muestra en la Tabla 3.1.

Materiales	Cemento	Agua	Arena	Grava	Gravilla
Cantidad 25 l (kg)	8.4	5	25	13.75	13.75
Dosificación (m ³)	336	200	1000	550	550

Tabla 3. 3 Dosificación del hormigón convencional.

Para las probetas metálicas se emplean tramos cortos de 30 cm de puntales de la casa *Ulma* (Figura 3.21).



Fig. 3.21 Probetas metálicas y de hormigón empleadas en las campañas experimentales.

3.7.1.4 – Instrumentación.

Para poder medir los parámetros deseados y tomarlos como valores de referencia, se han empleado galgas extensométricas y termopares. Cada una de las probetas se instrumenta con un número determinado de galgas.

Se emplean en total dos tipos de galgas, una para acero y otra para hormigón.

Las galgas de hormigón son del tipo *50/120 LY 41-3-1M*, mientras que las galgas empleadas para los puntales metálicos son del tipo *6/120 LY 41-3-0.5M*.

El termopar empleado es el incorporado en la cámara frigorífica que se describe en el apartado 3.7.1.5.

3.7.1.5 – Procedimiento de ensayo.

Los ensayos se llevaron a cabo en el laboratorio del ICITECH (Instituto y Ciencia de Tecnología del Hormigón), y en el laboratorio del ITEAM (Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia).

En el laboratorio del ICITECH, los ensayos fueron llevados a cabo en una prensa de la marca *ICON* (Figura 3.22). El sistema de control es manual, y es posible alcanzar una carga máxima de 250 toneladas. La prensa está conectada a un equipo informático que permite almacenar los datos.

El tratamiento de los datos obtenidos de cada ensayo (carga aplicada por la prensa, y deformación de las galgas) se efectúa en tiempo real a través de un ordenador Pentium IV, equipado con el programa *CEAD* y programado en *Labview* por D. Vicente Miguel Sosa. El equipo de adquisición de datos era de la marca *Hewlett Packard* modelo *HP 3852A*.

En esta prensa se llevaron a cabo los ensayos de compresión simple, según la normativa *UNE 12390-3: 2003. Ensayos de hormigón endurecido*, donde las probetas fueron llevadas a rotura a la edad de 7 días.



Fig. 3.22 Prensa empleada para la realización de los ensayos. Laboratorio del ICITECH.

En el laboratorio del ITEAM, los ensayos fueron llevados a cabo en una cámara climática de la marca *FEUTRON*, modelo *KPK 400* (Figura 3.23). El sistema de control es automático, y se

encuentra conectada a un equipo informático que permite almacenar los datos. Esta cámara permite el control simultáneo de la temperatura y de la humedad.



Fig. 3.23 Cámara climática empleada para la realización de los ensayos. Laboratorio del ITEAM.

3.7.2 – Resultados experimentales.

A continuación se indican los ensayos experimentales que se han realizado para este trabajo de investigación, sus resultados y sus conclusiones.

Los ensayos se muestran ordenados por orden cronológico. De este modo, el lector adquiere una idea clara del motivo que impulsa a realizar cada ensayo.

3.7.2.1- Encapsulado del sensor de deformación.

En los ensayos experimentales que propone Gasch (2008), se obtienen resultados satisfactorios para una FBG, como elemento capaz de medir deformaciones en el hormigón (Figura 3.24)

Gasch (2008) propone un encapsulado para el sensor óptico, basado en capas de PVC, tal y como indica la Figura 3.24b. Este encapsulado no ofrece resultados satisfactorios, por lo que en este trabajo se plantean otros encapsulados que ofrezcan resultados aceptables.

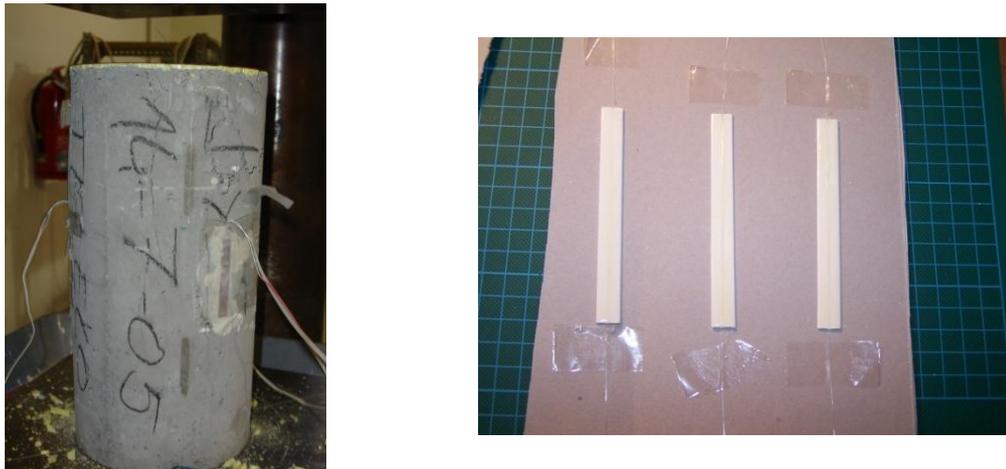


Fig. 3.24 Probeta de hormigón, con una FBG adherida a su superficie (a). Encapsulado a base de capas de PVC (b). (Gasch, 2008)

Así, en el presente trabajo se propone un encapsulado para la FBG a base de fibra de vidrio, tratada con resina de poliéster. El encapsulado que resulta flexible, ligero, de muy poco espesor, pero a la vez resistente frente a golpes y caídas, ha sido patentado por el ICITECH-ITEAM, con el nombre “Sensor óptico para monitorización de estructuras”, nº P200801728.

El encapsulado resulta fácil y rápido de construir. Para conseguir una buena transmisión de deformaciones entre la superficie a monitorizar y la FBG, es importante la proximidad de esos dos elementos. Por ello, la configuración que se propone del sensor presenta el esquema que muestra la Figura 3.25.

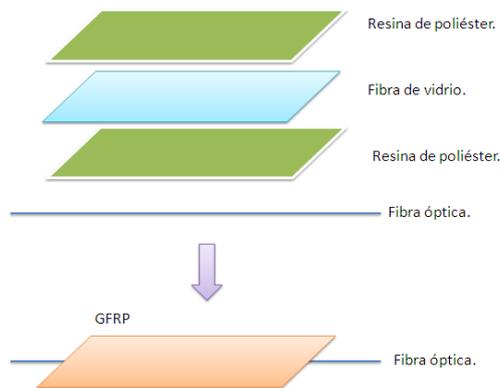


Fig. 3.25 Capas en las que se divide el encapsulado propuesto y patentado por el ICITECH-ITEAM.

Las características de los materiales empleados son las que se indican a continuación:

- a) Fibra de vidrio. La fibra de vidrio empleada es de la tipología *M501-300*. Las características específicas vienen resumidas en la Tabla 3.3.

TECHNICAL DATA (nominal values)				
Product code	Weight g/m ²	Moisture content %	Loss on ignition %	Solubility in styrene sec.
	ISO 3374	ISO 3344	ISO 1887	ISO 2558
M501- 300	300		5,0	
M501- 375	375		4,5	
M501- 450	450	< 0,3	3,7	max. 30
M501- 600	600		3,5	
M501- 900	900		3,2	

Tabla 3. 4 Características técnicas de la fibra de vidrio empleada. (www.fibercomposite.com)

- b) Resina de poliéster. Se ha empleado el modelo designado como *Crystic 446 Palv*.
- c) El catalizador empleado para la reacción de curado de la resina recibe el nombre *P-200*.

Todos los elementos pertenecen a una casa comercial especializada en este tipo de materiales.

3.7.2.2 - Calibración del sensor de deformación. Coeficiente de sensibilidad de la deformación.

Teniendo en cuenta que una *rejilla de Bragg* proporciona variaciones en la longitud de onda reflejada cuando varía el periodo de la perturbación del índice de refracción, se hace necesario obtener un coeficiente, llamado **coeficiente de sensibilidad**, que nos permita obtener la deformación unitaria a partir de la variación en la longitud de onda reflejada.

Esto ha sido obtenido imponiendo una deformación conocida, y registrando las variaciones en la longitud de onda reflejada. Para ello, se empleó un sistema de posicionamiento milimétrico como el indicado en la Figura 3.26.

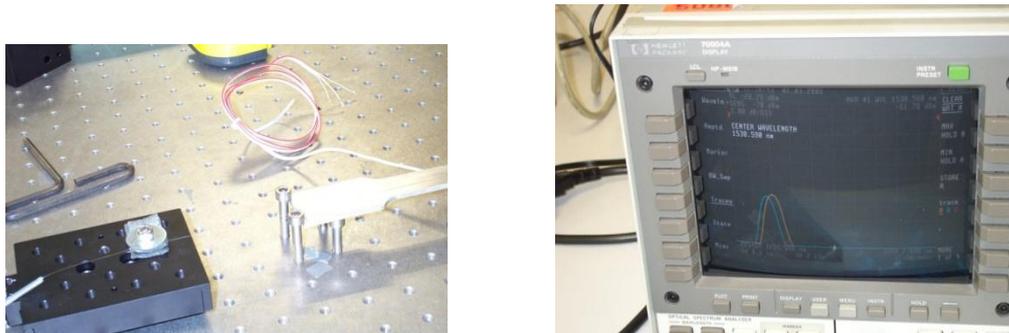


Fig. 3.26 Sistema de posicionamiento milimétrico (a). Variación de longitud de onda reflejada (b).

Con la utilización de estos sistemas de posicionamiento milimétrico, podemos aplicar de forma precisa y continua deformaciones relativas, que posteriormente se asociarán a desplazamientos en la longitud de onda del máximo de reflectividad de la FBG.

De esta forma se obtiene la gráfica de la Figura 3.27, con forma de escalera, donde cada escalón corresponde a incrementos en la deformación de 0.01mm.

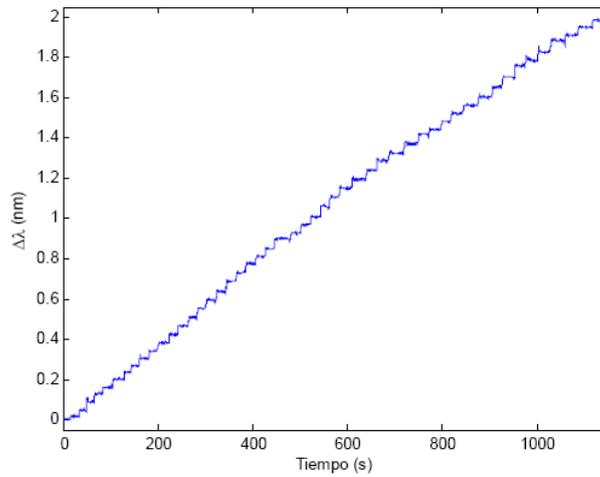


Fig. 3.27 Incremento de la longitud de onda en función del tiempo, para incrementos iguales de deformación en la FBG.

Conociendo la distancia inicial entre los anclajes que mantienen la FBG unida al sistema de posicionamiento milimétrico, y el incremento de las deformaciones aplicadas, podemos conocer la deformación unitaria. De este modo, representamos la curva longitud de onda reflejada con la deformación unitaria impuesta (Figura 3.28).

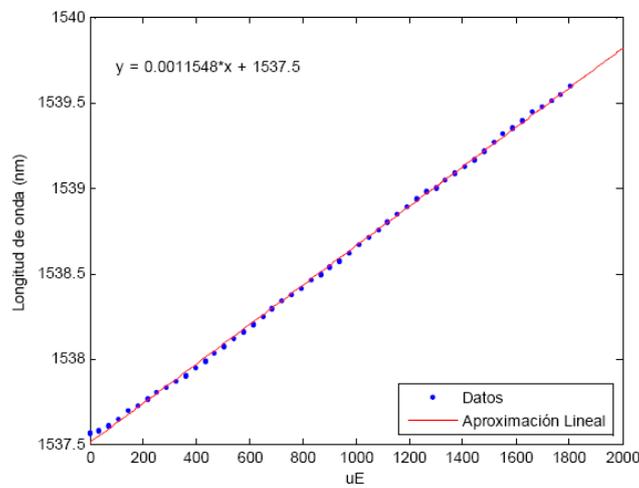


Fig. 3.28 Ajuste de la constante de sensibilidad.

Con todo ello, el coeficiente de sensibilidad de la deformación (pendiente de la recta de ajuste de la Figura 3.28) resulta ser de $1,15 \text{ pm}/\mu\epsilon$.

Conocido los picómetros de variación de longitud de onda reflejada, se puede conocer los microstrain ($1\mu\epsilon = 1 \mu m/m = 1 \cdot 10^{-6} m/m$) de deformación unitaria mediante una sencilla operación, y viceversa.

Si comparamos este valor con los valores que ofrecen catálogos comerciales, se observa que éstos están próximos entre sí (Figura 3.29). Esas variaciones son debidas a la tipología de encapsulado, al tipo de fibra óptica, y a las longitudes de onda empleadas para cada *rejilla de Bragg*.

Performance Properties	
Strain Sensitivity ²	~ 1.4 pm/ $\mu\epsilon$
Gage Length	22 mm
Operating Temperature Range	-40 to 120° C (150° C short-term)
Strain Limits	± 2,500 $\mu\epsilon$

Performance Properties	
Strain Sensitivity ²	~ 1.2 pm/ $\mu\epsilon$
Gage Length	10 mm
Operating Temperature Range ³	-40 to 60°C (80°C Max)
Strain Limits	± 5,000 $\mu\epsilon$
Maximum Drift ⁴	< 50 $\mu\epsilon$

Fig. 3.29 Propiedades de varios sensores ópticos comerciales. Valores del coeficiente de sensibilidad (www.micronoptics.com)

3.7.2.3- Ensayos de compresión.

3.7.2.3.1- Probetas de hormigón

Cada probeta se monitoriza con dos parejas de sensores, diametralmente opuestas (Figura 3.30). La instrumentación con 3 parejas de sensores es más precisa, pero su instalación mucho más compleja.

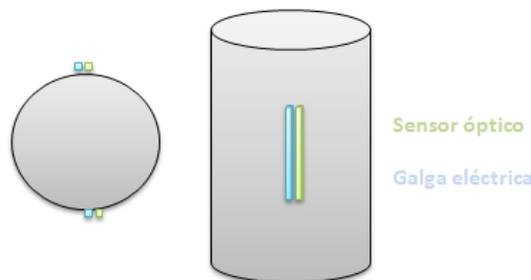


Fig 3.30 Esquema de instalación de los sensores en las probetas de hormigón.

Cada pareja está formada por una galga eléctrica y por un sensor óptico. De este modo, es posible llevar a cabo una comparativa entre las deformaciones de ambos sistemas.

Los ensayos sobre probetas de hormigón son ensayos de compresión simple, donde las probetas se llevan hasta la rotura, tal y como muestra la Figura 3.31.



Fig 3.31 Probeta de hormigón monitorizada, antes (a) y después (b) de la rotura.

Conocido el coeficiente de sensibilidad de la deformación, la obtención de la curva de deformación es inmediata. Para ello, se divide la curva de longitud de onda reflejada por el sensor óptico, entre el coeficiente de sensibilidad, tal y como muestra la Figura 3.32.

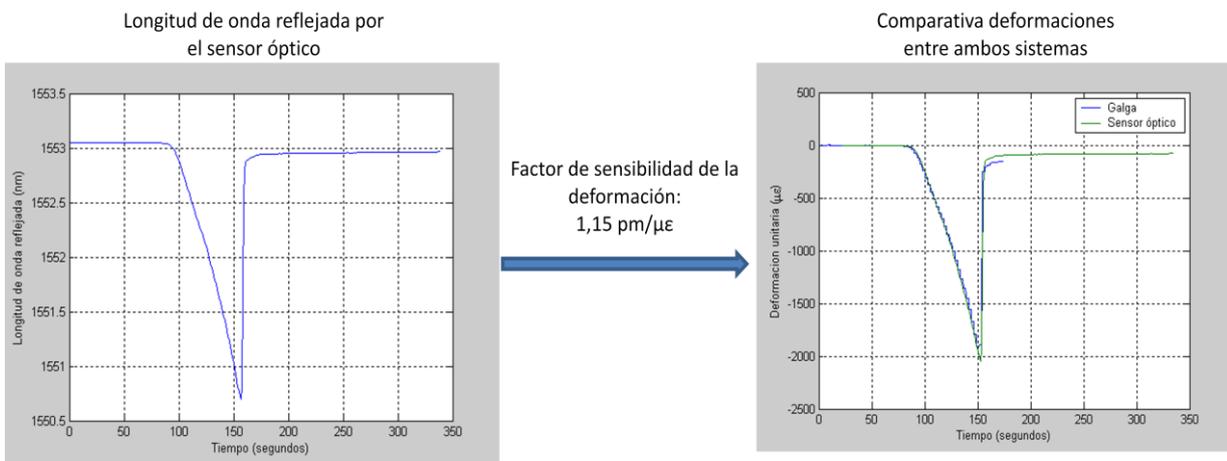


Fig 3.32 Obtención de la curva de deformación a partir de la curva de longitud de onda reflejada.

Las curvas de deformación obtenidas son las que se muestran en la Figura 3.33:

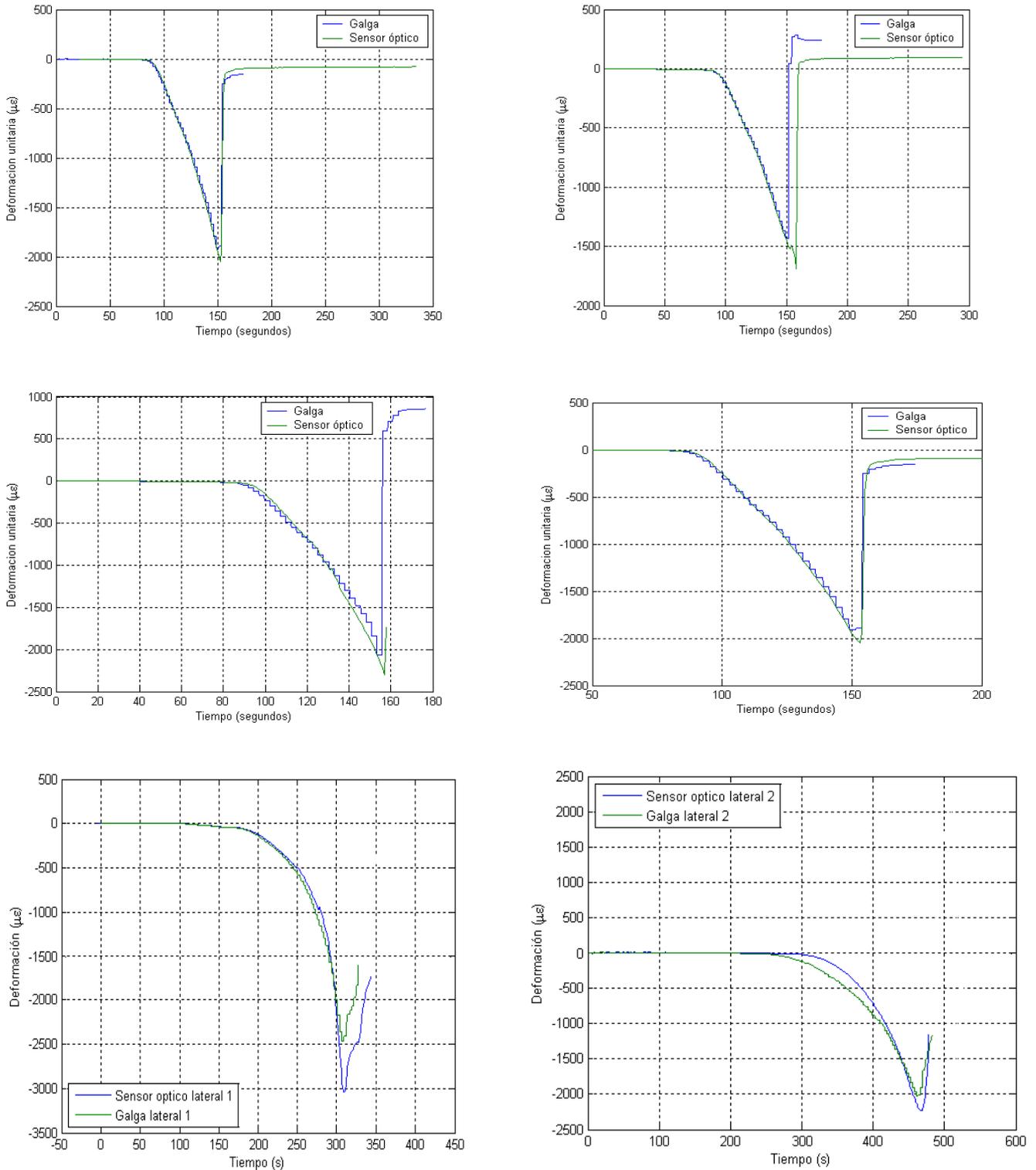


Fig 3.33 Comparativa entre deformaciones de galgas y de sensores ópticos.

Los resultados obtenidos resultan ser muy satisfactorios en las pruebas de compresión simple sobre probetas de hormigón. Las pequeñas diferencias existentes pueden ser debidas a descentramientos de la carga debido a un refrentado no uniforme en la base de la probeta, o a

pequeñas desviaciones en el pegado del sensor, de modo que éste no se encuentra totalmente alineado con la dirección de aplicación de la carga.

Es importante notar que la rotura se está produciendo con valores cercanos a $2000\mu\epsilon$, que corresponde con la deformación teórica de rotura del hormigón a compresión simple del 2 ‰.

3.7.2.3.2- Probetas metálicas

Del mismo modo que para el caso de probetas de hormigón, se procede a ensayar probetas metálicas, sometidas a compresión simple (Figura 3.34). Cada probeta se monitoriza con dos parejas de sensores, diametralmente opuestas, al igual que en el apartado 3.7.2.3.1.



Fig 3.34 Probeta metálica colocada en la prensa.

El procedimiento es similar al realizado en el apartado 3.7.2.3.1: conocida la ley de variación de longitud de onda reflejada por la rejilla de Bragg, se obtiene el cociente entre ésta y el coeficiente de sensibilidad de la deformación (que es constante e independiente del material al que está adherido, de valor $1,15 \text{ } \mu\text{m}/\mu\epsilon$).

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.35.

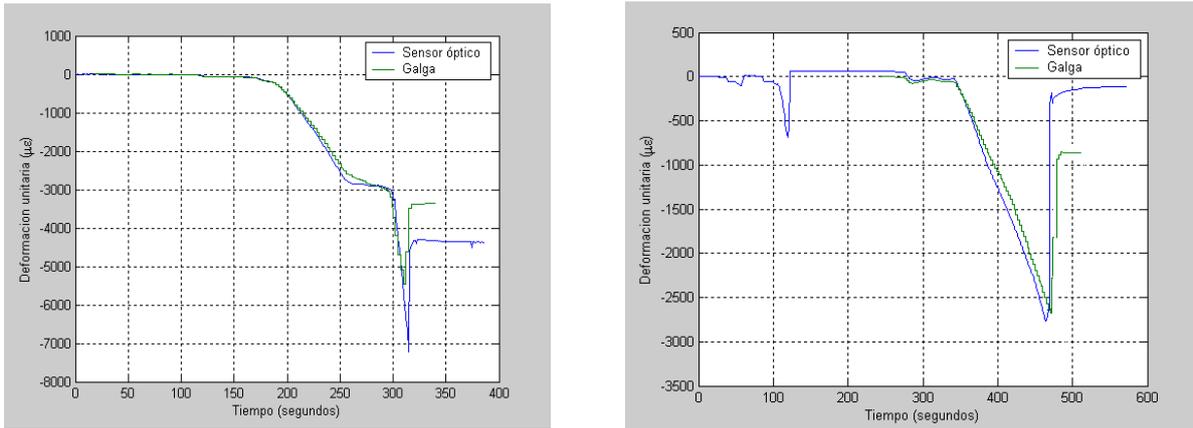


Fig 3.35 Comparativa de resultados entre sensores ópticos y galgas sobre probetas metálicas.

Las leyes de deformaciones representadas por los sensores ópticos muestran la similitud entre los resultados proporcionados por las galgas extensométricas.

3.7.2.3.3- Comparativa con otros sensores ópticos comerciales.

Con el fin de comparar el comportamiento y funcionamiento de otros sensores, se decide adquirir sensores comerciales y del mismo modo, adherirlos a las probetas citadas en los puntos anteriores. La variedad de sensores ópticos existentes es amplia. Existen de varios tipos (Figura 3.38), siendo los más habituales los sensores ópticos de poliamida, los de fibra de carbono y los sensores ópticos soldables.

De los anteriores, se ensayan los de fibra de carbono y los de poliamida. Se lleva a cabo una comparativa mediante galgas extensométricas adheridas próximas entre sí. Los resultados obtenidos no son del todo satisfactorios (Figura 3.37). Ello puede ser debido a la configuración del propio sensor comercial.

La gran mayoría de las configuraciones de los sensores ópticos comerciales responden a un esquema en el que la fibra óptica queda embebida entre dos capas de material, tal y como muestra la Figura 3.36.

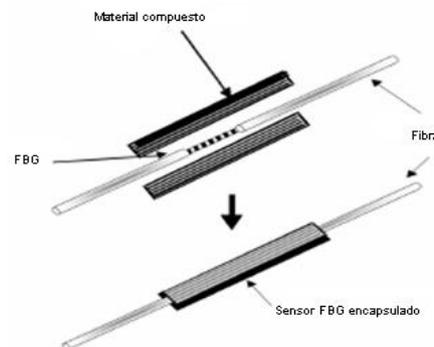


Fig 3.36 Configuración del encapsulado de un sensor comercial (Moyo et al. 2005).

Esta configuración hace que la deformación alcanzada por la fibra óptica difiera de la deformación sufrida por la superficie donde está instalado el sensor, debido a que se crea un gradiente de deformaciones importante entre estos dos elementos. Los resultados que se obtienen en las pruebas experimentales respaldan esta idea. No obstante, es posible que esas diferencias se encuentren aumentadas además, por deficiencias en el pegado o por pequeños descentramientos de carga.

Este aspecto se ha estudiado en el apartado 3.8 (Fase numérica), donde se ha modelado, por un lado el esquema de un encapsulado comercial (Figura 3.36) y por otro, la configuración de un sensor óptico desarrollado por el ICITECH y el ITEAM (Apartado 3.7.2.1). La comparativa entre ambos respalda la idea que aquí se anticipa.

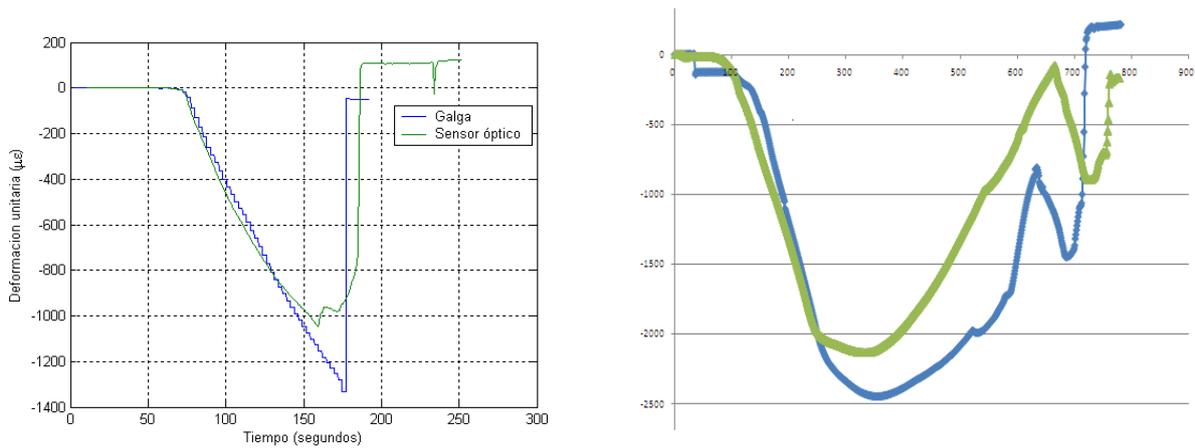


Fig 3.37 Comparativa de las deformaciones entre galgas y sensores ópticos comerciales. Sensor de fibra de carbono (a) y sensor de poliamida (b).

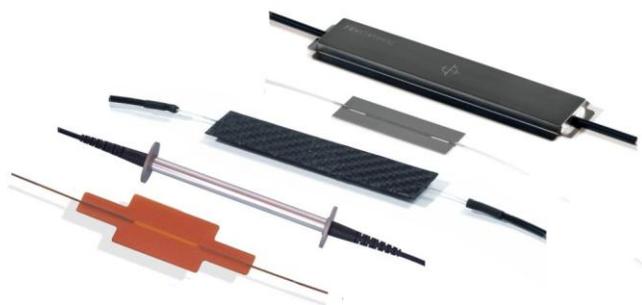


Fig 3.38 Diferentes tipos de sensores ópticos comerciales (www.fibersensing.com)

Este es un resultado de alto valor experimental, puesto que la hipótesis de partida al emplear este sistema de medida es la compatibilidad total de deformaciones entre superficie a monitorizar y elemento de medida, y visto el comportamiento real de ciertos sensores ópticos, no sucede de este modo.

3.7.2.4- Encapsulado del sensor de temperatura.

Puesto que otro de los parámetros relevantes a monitorizar en una estructura es la temperatura, se ha estudiado la configuración de un sensor óptico que sea capaz de medir la evolución de temperatura que se produce en el material que la forma.

Por ello, se propone una configuración de un encapsulado para la fibra, tal y como indica la Figura 3.39.

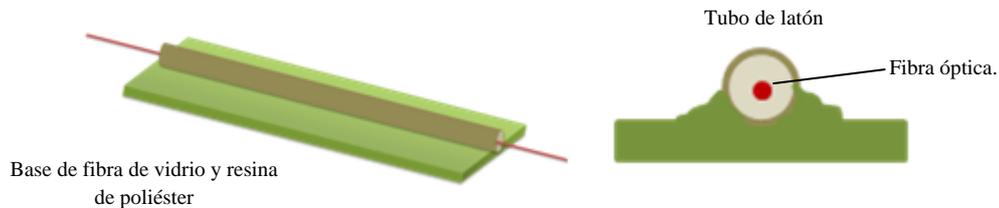


Fig 3.39 Encapsulado del sensor óptico de temperatura.

El encapsulado consiste en una base de fibra de vidrio tratada con resina de poliéster. Sobre ésta, se sitúa un tubo de latón, de muy pequeño diámetro (3000 μm). En su interior, se aloja la fibra óptica, que se encuentra anclada al tubo de latón en un extremo y libre en el otro. De este modo, se consigue que la fibra óptica no sufra modificaciones frente a deformaciones impuestas por la superficie a monitorizar, y sólo se ve afectada frente a variaciones térmicas.

3.7.2.5- Calibración del sensor de temperatura. Coeficiente de sensibilidad de la temperatura.

Del mismo modo que en el sensor de deformación, en este caso es necesario disponer de un coeficiente de sensibilidad para el sensor de temperatura. Este coeficiente de sensibilidad permitirá obtener en función de la variación de longitud de onda reflejada, la variación en $^{\circ}\text{C}$ de la temperatura del punto sobre la que se adhiere.

Se proponen dos tipos de ensayos para lograr este coeficiente de sensibilidad. El primero de ellos es llevar el ensayo a temperatura ambiente, estando los sensores sin adherir a ninguna superficie. El segundo consiste en llevar a cabo los ensayos en la cámara climática mencionada en el apartado 3.7.1.5. estando los sensores adheridos sobre superficies de hormigón y acero

En el primer ensayo, para tomar datos de referencia se emplean termopares. Éstos y los sensores ópticos se colocan muy próximos entre sí, para garantizar que ambos miden la misma temperatura (Figura 3.40).



Fig. 3.40 Termopar y sensor óptico para medida de temperatura.

Los ensayos tienen una duración de tres días. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.41.

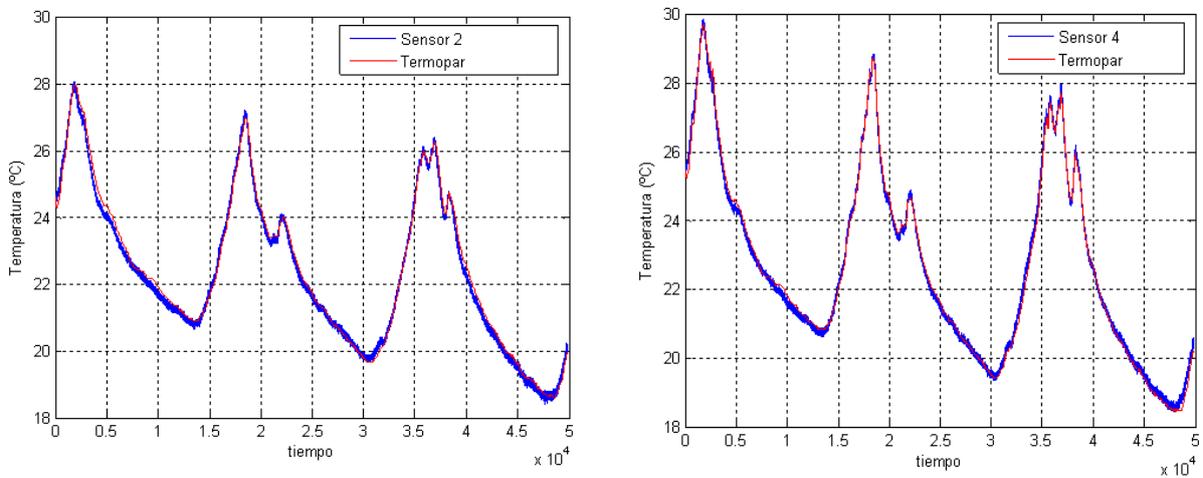


Fig. 3.41 Evolución de la temperatura ambiente, comparación y calibración de los sensores ópticos.

Para ajustar las curvas de longitud de onda reflejada a la de temperatura ambiente dada por el termopar, se obtienen unos coeficientes de sensibilidad de 8.2 y 7.9 $pm/°C$, presentando entre ellos una variación del 3.65%. Los resultados obtenidos son muy satisfactorios y validan el empleo de una FBG para medida de temperatura ambiente.

El segundo de los ensayos consiste en adherir sensores ópticos de temperatura a la superficie de las probetas, y llevar a cabo ciclos térmicos de temperatura en el interior de la cámara climática (Figura 3.42). El objetivo es conocer la temperatura en la superficie del material, que no necesariamente es la misma que la ambiente.



Fig. 3.42 Probetas metálicas y de hormigón en el interior de la cámara climática.

Durante el ensayo se registra la variación en la longitud de onda reflejada por el sensor y la evolución de la temperatura existente en la cámara.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.43.

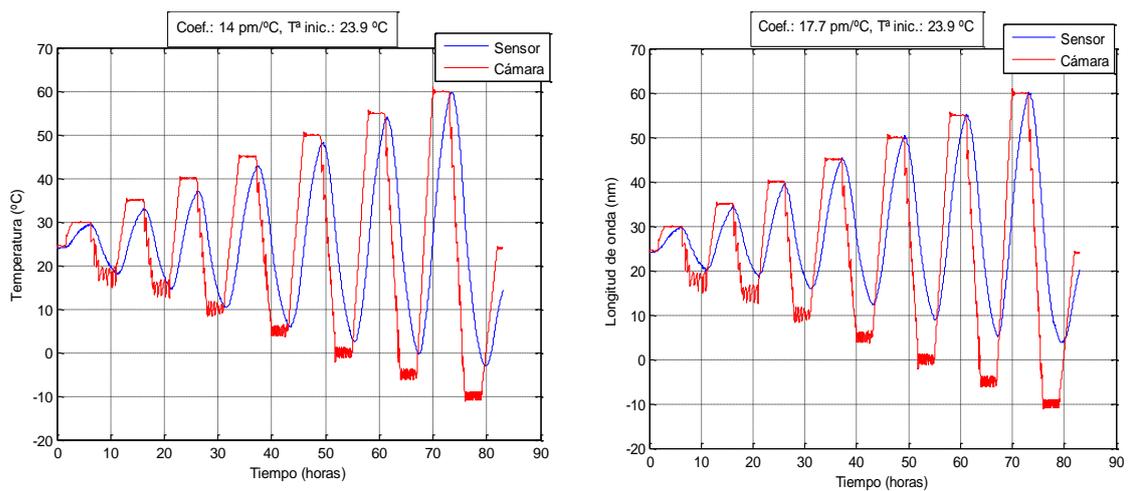


Fig. 3.43 Evolución de temperaturas y calibración del sensor óptico adherido al hormigón.

Los resultados de la Figura 3.43 presentan un inconveniente. Éste deriva de los ciclos propuestos. Debido a la inercia térmica que presenta el hormigón, la temperatura en la superficie del mismo tarda cierto tiempo en alcanzar a la temperatura objetivo de la cámara. Los ciclos que se proponen en este ensayo resultan ser cortos, por lo que el hormigón no dispone de tiempo suficiente para alcanzar la temperatura objetivo de la cámara.

Por este motivo, los coeficientes de sensibilidad obtenidos son erróneos, resultando ser 14 y $17.7 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

Por ello, se repite de nuevo el ensayo proponiendo nuevos ciclos de temperatura largos, de modo que el hormigón alcance la temperatura objetivo, y el ajuste entre curvas sea el correcto. Los nuevos ciclos de temperatura y el ajuste se indica en la Figura 3.44.

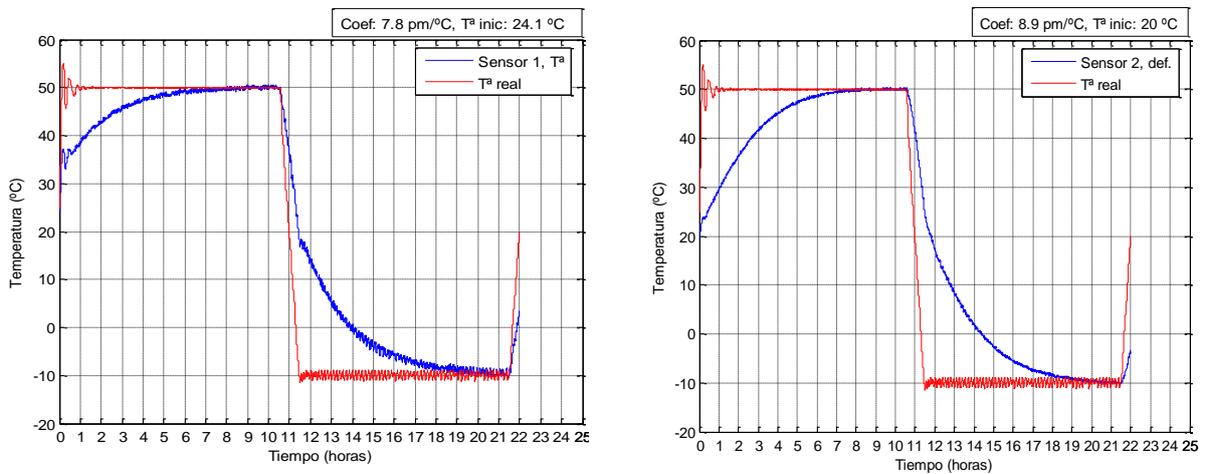


Fig. 3.44 Ajuste del sensor óptico adherido al hormigón, con la temperatura objetivo de la cámara.

En estos casos, se obtuvieron unos coeficientes de sensibilidad de la temperatura de 7.8 y 8.9 $pm/^\circ C$ respectivamente. Estos valores presentan algo más de dispersión, un 12%.

De nuevo, estos ciclos se repiten, manteniendo la precaución de proponer ciclos suficientemente largos. Los resultados se muestran en la Figura 3.45.

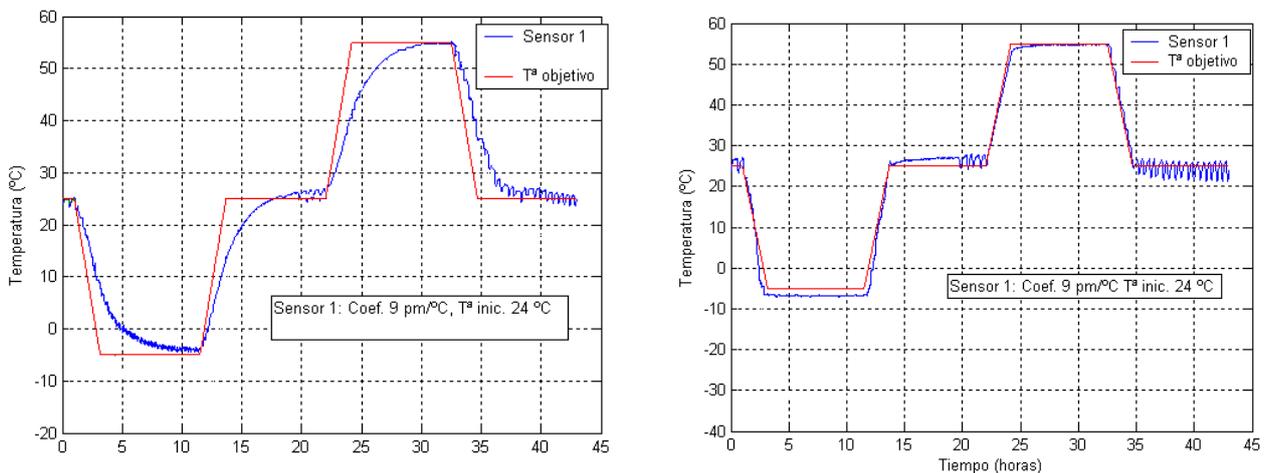


Fig. 3.45 Ajuste para el sensor óptico adherido al hormigón (a), y adherido a la probeta metálica (b), con la temperatura objetivo de la cámara climática.

En los resultados de la Figura 3.45 se observa que el sensor óptico ofrece buenos ajustes tanto a altas como a bajas temperaturas, siendo el coeficiente de sensibilidad obtenido de $9 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$, en ambos materiales.

Como se puede observar, en el caso de la probeta metálica no existe el problema de los ciclos cortos debido a la menor inercia térmica del acero.

3.7.2.6- Calibración del sensor de deformación, frente a variaciones térmicas.

Si recordamos la configuración del sensor de deformación descrito anteriormente, éste consiste en un encapsulado a base de fibra de vidrio tratada con resina de poliéster. Este encapsulado se encuentra sobre la fibra óptica, permitiendo de este modo la máxima proximidad entre ésta y la superficie a monitorizar.

Ahora bien, este sensor adherido a la superficie de un material, no sólo se ve afectado por deformaciones unitarias. También se encuentra afectado por los cambios de temperatura que experimente la superficie. Es decir, el sensor de deformación obtiene suma de dos efectos: deformaciones unitarias y variaciones de temperatura.

Por el contrario, el sensor de temperatura descrito en los apartados 3.7.2.4 y 3.7.2.5, sólo se ve afectado por variaciones térmicas puesto que su configuración es una fibra óptica, libre por uno de sus extremos.

Mediante las dos ecuaciones que proporcionan la variación de longitud de onda en función de la deformación unitaria y de las variaciones térmicas (Ecuaciones 3.5 y 3.6), se puede entender el significado de este apartado.

$$\Delta\lambda_L = C_{T,LIBRE} * \Delta T + C_{\varepsilon,LIBRE} * \Delta\varepsilon \quad (3.5)$$

$$\Delta\lambda_E = C_{T,ENCAP.} * \Delta T + C_{\varepsilon,ENCAP.} * \Delta\varepsilon \quad (3.6)$$

- a) $\Delta\lambda_L$, variación de longitud de onda reflejada por la fibra óptica libre del sensor de temperatura.
- b) $\Delta\lambda_E$, variación de longitud de onda reflejada por la fibra óptica encapsulada del sensor de deformación.
- c) $C_{T,LIBRE}$, coeficiente de sensibilidad de la temperatura. Se ha obtenido un valor aproximado de $8 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$
- d) $C_{\varepsilon,LIBRE}$, coeficiente de sensibilidad de deformación, para el sensor de temperatura. Su valor es 0, y se demuestra en el apartado 3.7.2.8.
- e) $C_{\varepsilon,ENCAP.}$, coeficiente de sensibilidad de la deformación, para el sensor de deformación. Se ha obtenido su valor, igual a $1,15 \text{ pm}/\mu\varepsilon$
- f) $C_{T,ENCAP.}$, coeficiente de sensibilidad de la temperatura, para el sensor de deformación. Su valor es desconocido.

El valor de $C_{T,ENCAP}$. permite conocer el comportamiento del sensor de deformación frente a variaciones térmicas. Se preveé que este valor sea diferente según el material sobre el que esté adherido, debido al diferente coeficiente de dilatación térmica.

Del mismo modo que en el apartado 3.7.2.5. se procede al ajuste entre curvas. Los resultados se indican en la Figura 3.46.

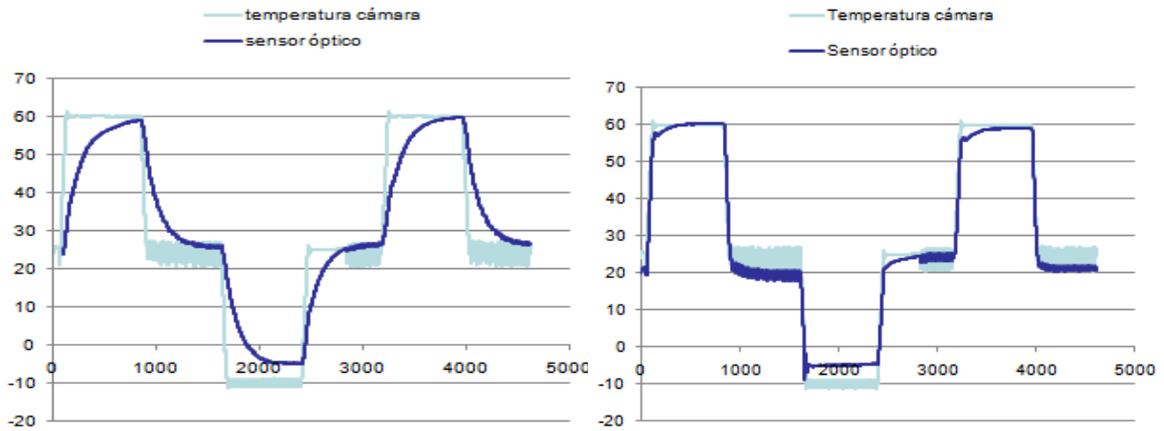


Fig. 3.46 Ajuste del sensor de deformación en probeta de hormigón (a), y probeta metálica (b).

Los resultados arrojan unos coeficientes de sensibilidades de 17 y 20.5 $pm/°C$ para probeta de hormigón y metálica, respectivamente.

Efectivamente, estos coeficientes son diferentes, según la superficie del material sobre la que se adhiera.

Por último, comentar un pequeño rizado que aparece en la temperatura de la cámara climática, y que es debido a un desajuste en el sistema de medición de humedades.

3.7.2.7- Resumen de las sensibilidades de los sensores ópticos.

La Tabla 3.4 muestra un resumen con los coeficientes que han sido obtenidos a lo largo de las campañas experimentales.

Sensor de Fibra de vidrio	Elemento estructural	Coficiente de sensibilidad deformación. $K\epsilon$	Coficiente de sensibilidad temperatura. Kt
Sensor deformación	Hormigón	1,15 $pm/\mu\epsilon$	17 - 17.5 $pm/°C$
	Metálico	1,15 $pm/\mu\epsilon$	20 - 20,5 $pm/°C$
Sensor temperatura	Hormigón	0 $pm/\mu\epsilon$	8.5 - 9 $pm/°C$
	Metálico	0 $pm/\mu\epsilon$	8.5 - 9 $pm/°C$

Tabla 3. 5 Resumen de las sensibilidades calibradas en los sensores ópticos.

Para cada una de las sensibilidades se ha obtenido un margen de valores, que se encuentran todos ellos dentro de un intervalo razonable. Este rango de valores puede ser debido tanto al proceso de fabricación del encapsulado, como al proceso de pegado del sensor a la estructura. Ambas operaciones son completamente manuales y por tanto, se induce un error en la obtención de los resultados. No obstante, estos errores son asumibles, puesto que la variación de éstos en %, es la que se muestra en la Tabla 3.5.

Sensor de Fibra de vidrio	Elemento estructural	Coefficiente de sensibilidad deformación. K_ϵ	Coefficiente de sensibilidad temperatura. K_t
Sensor deformación	Hormigón	0%	2,94%
	Metálico	0%	2,50%
Sensor temperatura	Hormigón	0%	6,250%
	Metálico	0%	6,250%

Tabla 3. 6 Variaciones en los valores de las sensibilidades, en %.

Los márgenes de variación de los valores de las sensibilidades se encuentran muy acotados, por lo que los resultados obtenidos son considerados válidos para el empleo del sensor óptico patentado por el ICITECH y el ITEAM.

3.7.2.8- Sensor doble (Deformación + Temperatura).

Llegados a este punto, se puede introducir el concepto de sensor doble. El sensor doble consiste en un sensor de fibra óptica, que a su vez presenta dos fibras ópticas en su interior. Una de ellas, será la encargada de medir las variaciones debidas a deformación unitaria y variaciones térmicas. La otra, será la encargada de medir únicamente variaciones térmicas (Figura 3.47).

Si recordamos la expresión que nos proporciona el valor de la variación de la longitud de onda reflejada por la rejilla de Bragg, se observa que existen dos sumandos (Ecuación 3.8).

$$\Delta\lambda_B = K_\epsilon \epsilon + K_T \Delta T \tag{3.8}$$

Esto indica que las variaciones en la longitud de onda reflejada son debidas a dos fenómenos. Por un lado, la deformación unitaria ϵ y por otro, variaciones de temperatura en la superficie del material sobre la que se encuentra adherido, ΔT .

El sensor está configurado de modo que, ambas fibras ópticas se encuentran muy próximas entre sí (distancia inferior a 1 cm). De este modo es posible realizar una compensación térmica. Con ello, se consiguen dos objetivos:

- a) Por un lado, se elimina el efecto de la variación del índice de refracción de la fibra debido a la temperatura. De no ser así, las medidas obtenidas con el sensor de deformación son incorrectas.
- b) Por otro lado, se separan efectos, obteniendo por un lado la deformación debida únicamente a cargas, y por otro la debida únicamente a variaciones térmicas.

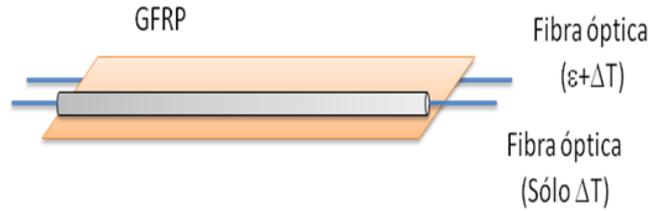


Fig. 3.47 Configuración y disposición del sensor doble.

Esta configuración de sensor se ha adherido a una probeta de hormigón, y ha sido sometida a compresión simple. La Figura 3.48 muestra el valor de la deformación que indica las dos fibras ópticas. La curva de color verde muestra el valor de la deformación de la fibra de compensación térmica. Por este motivo, el valor del coeficiente $C_{\epsilon,LIBRE}$ del apartado 3.7.2.6. es 0.

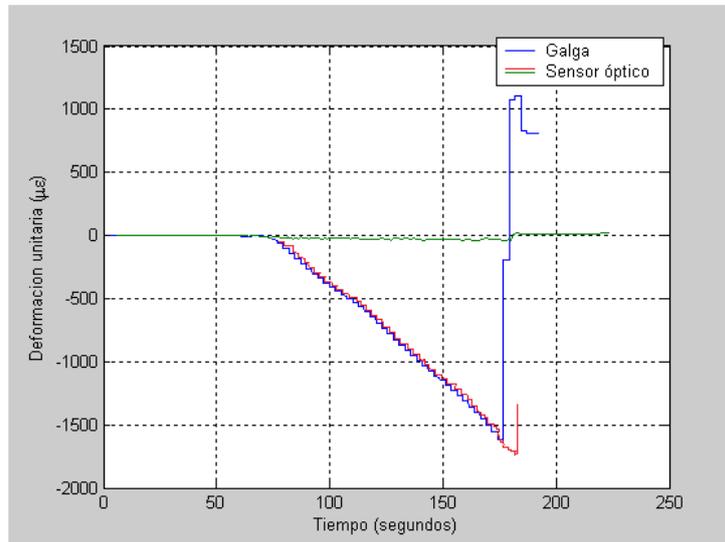


Fig. 3.48 Resultados obtenidos para el sensor óptico doble.

La Figura 3.49. indica un funcionamiento erróneo de esta tipología de sensor. La curva descrita por la fibra óptica de compensación térmica apunta deformaciones importantes. La causa de este comportamiento erróneo es conocida, y se debe a que esta fibra no se encuentra totalmente libre en el interior del tubo de latón, debido a acumulación de resina en la parte inferior del encapsulado.

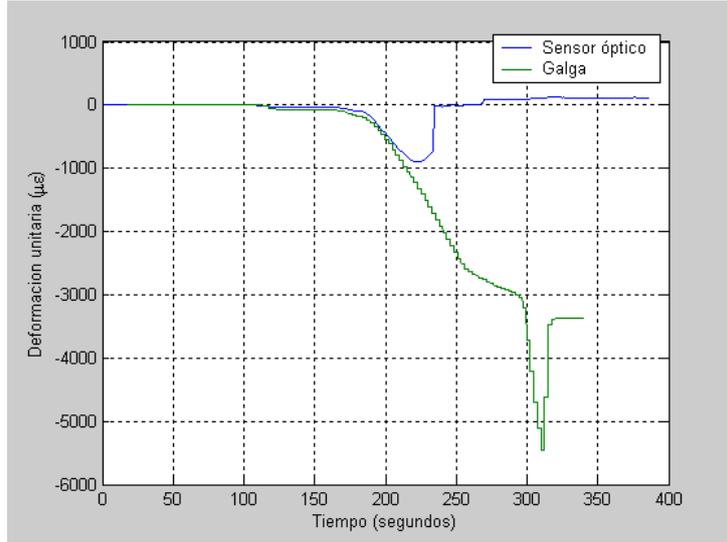


Fig. 3.49 Funcionamiento incorrecto del sensor doble.

3.7.2.9- Compensación térmica de los sensores ópticos.

Como se explicó en capítulos anteriores, la longitud de onda reflejada en una red de difracción de Bragg viene dada por la ecuación 3.9.

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \tag{3.9}$$

Tanto la separación espacial de las perturbaciones, como el índice de refracción efectivo inducido en el núcleo de la fibra óptica dependen a su vez de la temperatura y de la deformación mecánica.

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:

$$\Delta\lambda_B = \frac{\partial\lambda_B}{\partial\varepsilon} \varepsilon + \frac{\partial\lambda_B}{\partial T} \Delta T \tag{3.10}$$

$$\Delta\lambda_B = 2 \left[\left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial\varepsilon} \Lambda + n_{eff} \frac{\partial\Lambda}{\partial\varepsilon} \right) \varepsilon + \left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial T} \Lambda + n_{eff} \frac{\partial\Lambda}{\partial T} \right) \Delta T \right] \tag{3.11}$$

Donde, ε es la deformación unitaria aplicada al sensor, y ΔT es el incremento de temperatura.

Si tenemos en cuenta las ecuaciones constitutivas de Hooke:

$$\Delta n = \frac{n^3}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} - p_{12})] \Delta\varepsilon \tag{3.12}$$

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} (\sigma_{xx} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{zz})) \quad \varepsilon_{xy} = \frac{(1 + \nu)}{E} \sigma_{xy} \tag{3.13}$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} (\sigma_{yy} - \nu(\sigma_{xx} + \sigma_{zz})) \quad \varepsilon_{yz} = \frac{(1 + \nu)}{E} \sigma_{yz} \quad (3.14)$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} (\sigma_{zz} - \nu(\sigma_{yy} + \sigma_{xx})) \quad \varepsilon_{xz} = \frac{(1 + \nu)}{E} \sigma_{xz} \quad (3.15)$$

Se llega a la siguiente ecuación:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B \left\{ \left[1 - \left(\frac{n^2}{2} \right) [p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})] \right] \Delta\varepsilon + \left[\left(\frac{n^2}{2} \right) (p_{11} - 2p_{12}) \alpha + \frac{1}{n} \left(\frac{\partial n}{\partial T} \right) \right] \Delta T \right\} \quad (3.16)$$

Donde α es el coeficiente de expansión térmica y $\left(\frac{\partial n}{\partial T} \right) / n$ representa la variación del índice

de refracción efectivo debido a la variación de temperatura. Finalmente, la ecuación anterior se puede expresar mediante el uso de dos coeficientes de sensibilidad, que son los parámetros que se han obtenido en este trabajo de investigación en los apartados 3.7.2.2., 3.7.2.5. y 3.7.2.6. (Allan C.L. Wong et al.):

$$\Delta\lambda_B / \lambda_B = (1 - p_e) \varepsilon + (K_1 \alpha + \xi) \Delta T. \quad (3.17)$$

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon \Delta\varepsilon + K_T \Delta T \quad (3.18)$$

Siendo p_e el coeficiente fotoelástico, con un valor aproximado de 0.22 para las longitudes de onda y el tipo de fibra óptica empleada, α el coeficiente de dilatación térmica, y ξ la variación del índice de refracción efectivo del material de la fibra.

Observando la ecuación anterior, las variaciones de la longitud de onda reflejada de Bragg responden a cambios de deformación y temperatura. Para poder medirlas, esta respuesta debe ser separada, y para ello es necesario disponer el encapsulado del sensor del modo indicado en el apartado anterior 3.7.2.8.

Si llamamos 1 a la fibra encargada de medir la deformación, y 2 a la fibra que compensa térmicamente a la anterior, se puede escribir las ecuaciones 3.19 y 3.20.

$$\Delta\lambda_{B1} / \lambda_{B1} = K_{\varepsilon 1} \Delta\varepsilon + K_{T1} \Delta T \quad (3.19)$$

$$\Delta\lambda_{B2} / \lambda_{B2} = K_{T2} \Delta T \quad (3.20)$$

Si las ecuaciones anteriores se expresan en modo matricial se obtiene:

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_{B1}/\lambda_{B1} \\ \Delta\lambda_{B2}/\lambda_{B2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_{\varepsilon1} & K_{T1} \\ 0 & K_{T2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} = \mathbf{K} \begin{pmatrix} \Delta\varepsilon \\ \Delta T \end{pmatrix} \quad (3.21)$$

Donde \mathbf{K} es la matriz de sensibilidades de tamaño 2x2. Resolviendo esta ecuación matricial, se obtiene las ecuaciones 3.22. y 3.23.

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{K_{\varepsilon1}} \left(\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} \right) - \frac{K_{T1}}{K_{\varepsilon1} K_{T2}} \left(\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} \right) \quad (3.22)$$

$$\Delta T = \frac{1}{K_{T2}} \left(\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} \right) \quad (3.23)$$

Para la correcta aplicación de la compensación térmica es muy importante que la fibra 2 se encuentre totalmente libre en uno de sus extremos, y a su vez, que ambas fibras se encuentren muy próximas entre sí.

Por último, los coeficientes K_{T1} , K_{T2} , $K_{\varepsilon1}$ han sido obtenidos en los ensayos experimentales de los apartados 3.7.2.2., 3.7.2.5. y 3.7.2.6. Es muy importante su correcta calibración para poder llevar a cabo la compensación térmica que exige el sensado óptico. Un **error muy frecuente** en la aplicación de la compensación térmica, incluso en multitud de artículos e investigaciones realizadas (Ver. Art. Allan CL Wong et al. 2007) es el de considerar $K_{T1} \approx K_{T2}$. Con esta consideración incorrecta, las ecuaciones resultantes son:

$$\Delta\varepsilon = \frac{1}{K_{\varepsilon1}} \left(\frac{\Delta\lambda_{B1}}{\lambda_{B1}} - \frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} \right) \quad (3.24)$$

$$\Delta T = \frac{1}{K_{T2}} \left(\frac{\Delta\lambda_{B2}}{\lambda_{B2}} \right) \quad (3.25)$$

Expresiones empleadas en numerosos artículos e investigaciones, que resultan de realizar una hipótesis incorrecta y por tanto, su aplicación también lo es.

3.7.2.10- Sensor óptico de deformación embebido en el hormigón.

Con el objetivo de conocer las deformaciones internas del hormigón, se realizan pruebas de laboratorio donde se preparan una serie de probetas normalizadas de hormigón. Éstas son instrumentadas mediante sensores ópticos adheridos a su superficie (del mismo modo que en las anteriores pruebas), y embebidos en el interior de la masa del hormigón durante el hormigonado de la probeta.

Para estos ensayos es necesario extremar la precaución durante el hormigonado de la probeta, para evitar roturas del sensor y del cable de fibra óptica. Para ello se empleó un cableado de PVC correctamente sujeto (Figura 3.50)



Fig. 3.50 Sensor óptico embebido en el hormigón una vez llevado a cabo el ensayo (a). Imagen del cableado empleado para una mejor protección (b).

Los resultados obtenidos indican que el sensor óptico embebido proporciona resultados correctos para la medida de deformaciones internas en el hormigón (Figura 3.51).

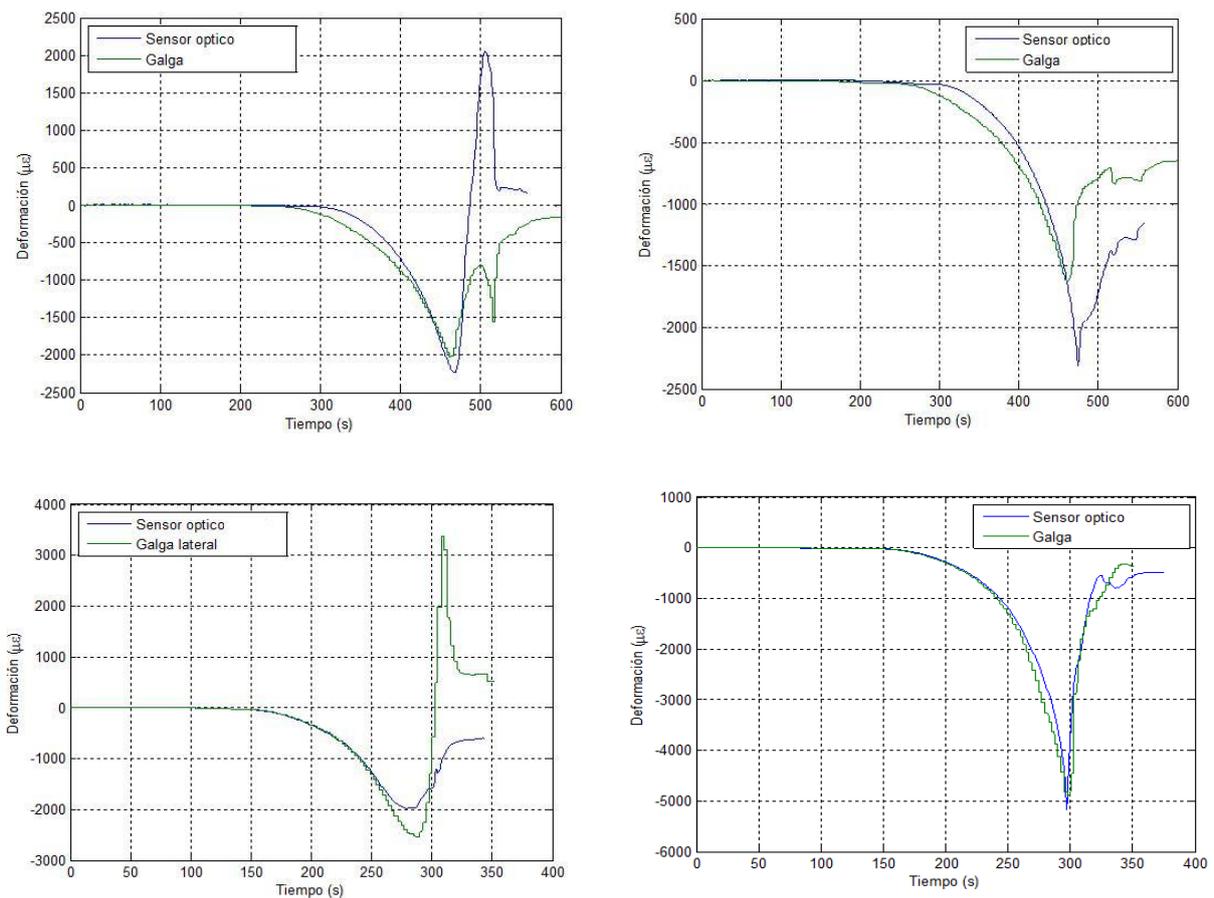


Fig. 3.51 Comparativa de resultados entre sensores ópticos embebidos y laterales de superficie.

A pesar de que los resultados obtenidos fueron satisfactorios, en algunos ensayos se observa que el sensor embebido experimenta una caída de potencia importante (Figura 3.52) cuando el nivel

de deformación en la probeta es elevado (aproximadamente un 70% de la deformación última de rotura).

Ello es debido a que en ese estado, el hormigón que envuelve al sensor óptico tiene una influencia no uniforme sobre el mismo, llegando a distorsionar la red de Bragg de la FBG. Esto puede producir varias consecuencias, entre ellas, la pérdida de potencia reflejada por el sensor, o la aparición de un segundo pico secundario por deformación excesiva del espectro de luz reflejada.

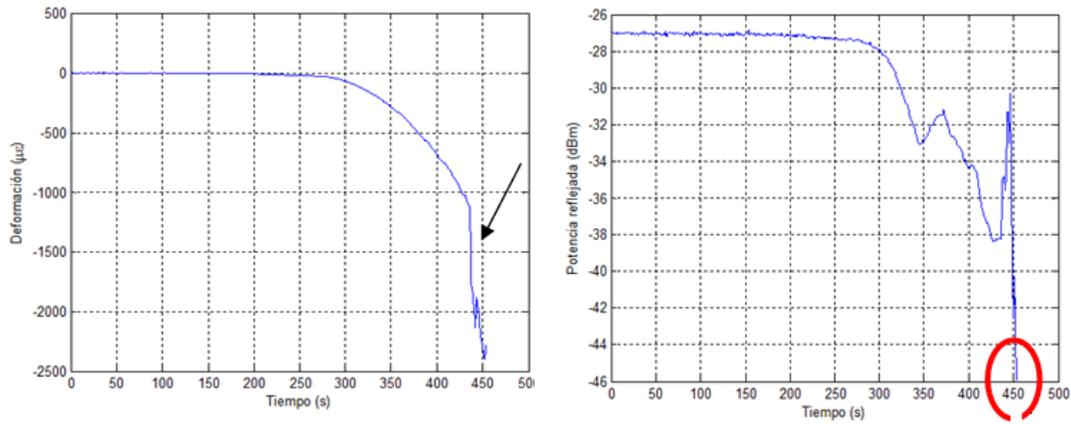


Fig. 3.52 Pérdida de potencia reflejada. Se produce en el segundo 450 desde el comienzo del ensayo

Esto representa un síntoma que ayuda a identificar visualmente el estado de deformaciones en el hormigón: Cuando el espectro del sensor embebido manifieste deformaciones excesivas en su forma, se deduce que nos encontramos con un nivel de deformaciones próximo a la rotura (Figura 3.53).

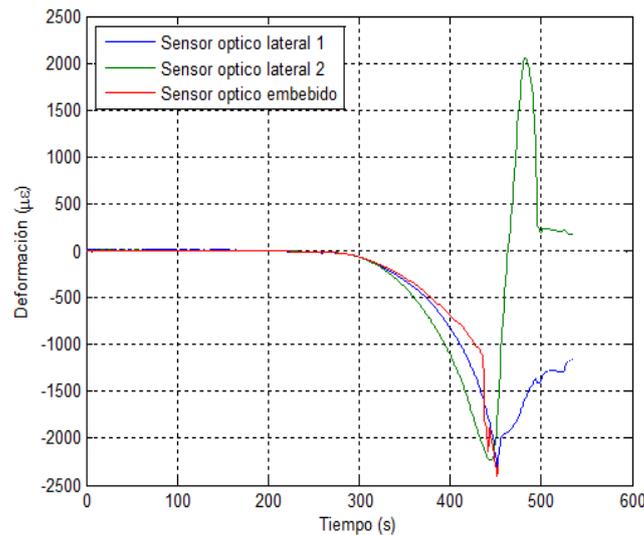


Fig. 3.53 Deformaciones de los sensores laterales y embebidos. Todos ellos indican la rotura en un punto próximo a un nivel de deformación de $2000\mu\epsilon$, que corresponde a un 2 ‰ en compresión simple.

3.7.2.11- Sensor óptico embebido en el hormigón para medida de retracción.

El acortamiento del hormigón a edades muy tempranas y durante su estado plástico, implica la posterior aparición de fisuras que tienen una repercusión directa sobre la durabilidad de la estructura.

Por este motivo, se decide investigar sobre la posibilidad de que un sensor óptico fuera capaz de medir retracciones a corto plazo. En este aspecto, los sensores ópticos presentan multitud de ventajas frente a los sistemas eléctricos convencionales existentes. Éstos últimos presentan un principio de funcionamiento similar a un captador de desplazamiento, en el que un resorte comprimido, da la medida de la deformación cuando éste aumenta su longitud. El inconveniente de los sistemas eléctricos convencionales, es que las primeras horas no pueden ser monitorizadas y es necesario esperar a que el hormigón alcance cierta consistencia para poder apoyar sobre la superficie del hormigón los elementos de medida.

Para realizar el ensayo, se preparan un total de tres probetas de hormigón prismáticas normalizadas, de dimensiones 50*50*10.

En cada una de ellas se embebe un sensor óptico, y se lleva a cabo su monitorización desde el mismo instante de su hormigonado. En dos de las probetas (sensor 1 y sensor 2) se embebe el sensor óptico en el centro de gravedad de la misma (Figura 3.55), mientras que en la tercera (sensor 3), el sensor óptico se coloca próximo a la superficie en contacto con el ambiente.

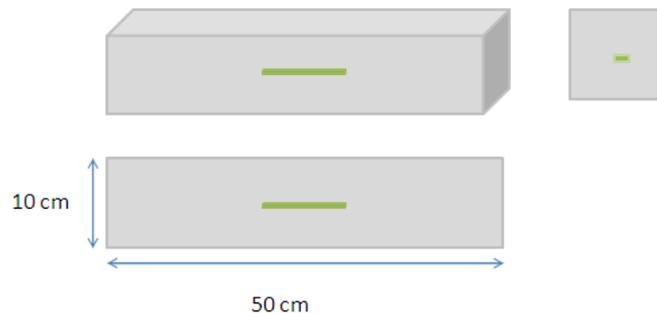


Fig. 3.54 Probeta prismática normalizada y ubicación del sensor óptico. Posición genérica de los sensores en el interior de una probeta.

Además, durante las cinco primeras horas de los ensayos, se llevó a cabo un seguimiento de los espectros de luz reflejados. De este análisis se extraen unas primeras conclusiones:

- El sensor 1, al cabo de la primera hora de ensayo, sufre una pérdida importante de potencia reflejada. No obstante, la forma del espectro no sufre modificación y dado que el nivel de ruido es bajo (-40 db), es posible la detección de la potencia del pico. Con mucha probabilidad, esa pérdida de potencia puede ser debida a dobleces en el cableado de fibra óptica (Figura 3.56a).
- El sensor 3 presenta un espectro deformado desde el inicio del ensayo, y fue debido a un encapsulado deficiente. No obstante, la forma del espectro no varía durante todo el ensayo, por lo que las variaciones de longitud de onda reflejadas han sido captadas correctamente (Figura 3.56c)
- El espectro del sensor 2 no sufre ningún tipo de anomalía (Figura 3.56b).

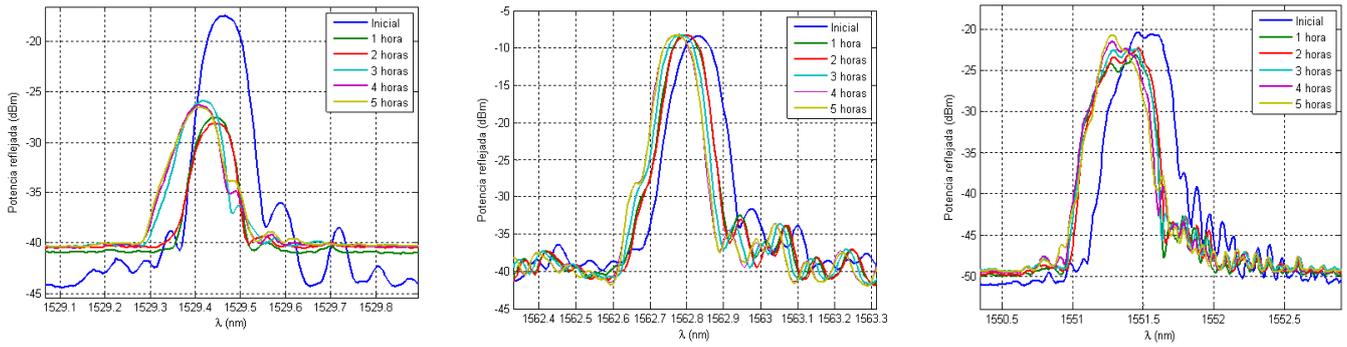


Fig. 3.55 Evolución de los espectros durante las 5 primeras horas del ensayo. Sensor 1 (a), sensor 2 (b), sensor 3 (c)

Los resultados obtenidos de los tres sensores se muestran en la Figura 3.57, de modo que pueden compararse los órdenes de magnitud entre la medición de los tres sensores.

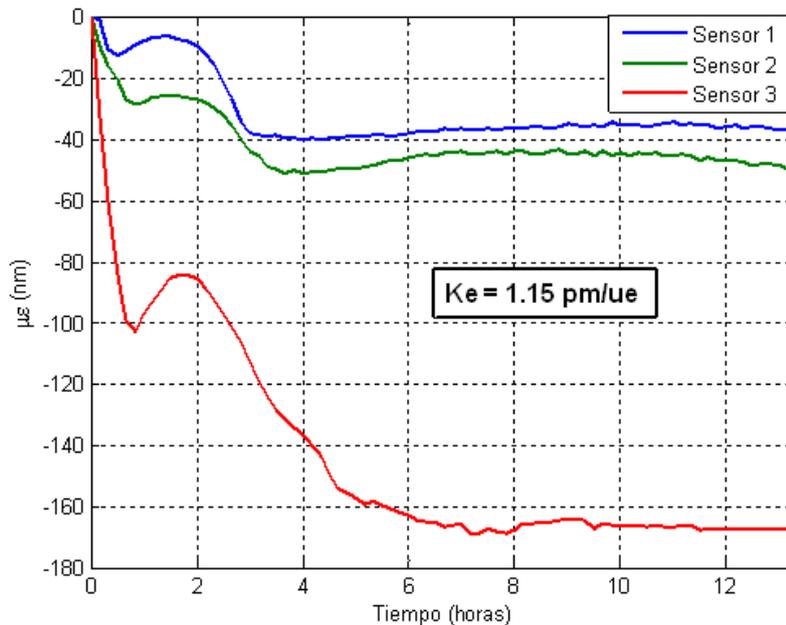


Fig. 3.56 Acortamiento sufrido por las tres probetas de hormigón durante las primeras horas tras el hormigonado.

La retracción que ha medido el sensor 3 ($165\mu\epsilon$) es mayor a la medida por los sensores 1 y 2 (sobre $40\mu\epsilon$). Ello se debe a que el sensor 3 se encuentra situado muy próximo a la cara libre de la probeta, expuesta más directamente a las condiciones ambientales. Las otras dos probetas, cuyos sensores se encuentran situados próximos al centro de gravedad, experimentan deformaciones similares.

Si analizamos los resultados y tras realizarse el hormigonado, el hormigón tiende a retraer por lo que las deformaciones obtenidas son negativas. A partir de la primera hora el hormigón tiende a expandirse, y ello se debe a un aumento de temperatura, propio de la reacción de hidratación del cemento cuando se produce el agotamiento del yeso debido a la formación de aluminato

triccálcico. Este aumento resulta pequeño, y es debido a que el hormigón empieza a ganar plasticidad con el paso del tiempo. Finalmente, las deformaciones negativas siguen aumentando hasta permanecer casi constantes.

Los resultados obtenidos por los sensores ópticos deben ser comparados por un sistema que garantice fiabilidad. Actualmente, se está trabajando para contrastar este tipo de resultados mediante la técnica de la fotogrametría.

3.7.2.12- Sensores ópticos embebidos en el hormigón, para medida de la evolución de la temperatura interna.

Los gradientes térmicos en una estructura de hormigón tras las primeras horas desde su hormigonado, supone la aparición de fisuración debido a la mayor o menor facilidad de diferentes zonas para disipar el calor de hidratación del cemento.

Para controlar estos gradientes térmicos, se decide embeber sensores ópticos de temperatura en el hormigón, y sus resultados son comparados con termopares. Las probetas empleadas en los ensayos son cilíndricas normalizadas de dimensiones 30*15 cm (Figura 3.58). La monitorización se lleva a cabo durante cinco días.



Fig. 3.57 Termopar y sensor óptico que serán embebidos en el hormigón (a). Probetas de hormigón instrumentadas (b).

De las dos probetas analizadas, se produce la rotura inesperada de uno de los conectores que unen el cable con interrogador, por lo que sólo se puede tomar lectura de un sensor óptico.

Los resultados de este primer ensayo se muestran en la Figura 3.59.

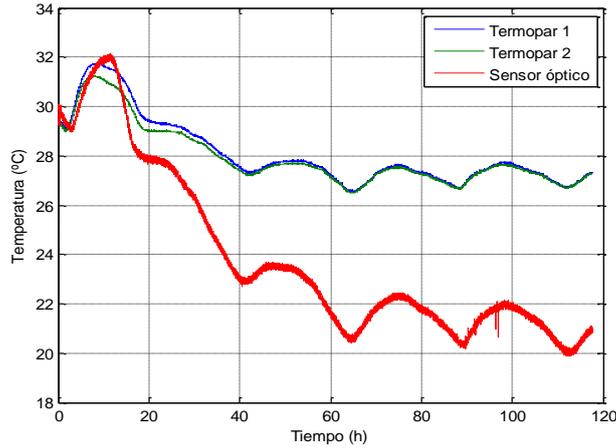


Fig. 3.58 Curvas de evolución de la temperatura del hormigón frente al tiempo, medida por los sensores ópticos y por los termopares.

En la Figura 3.59 se observan diferencias importantes entre los resultados de ambos sistemas de medida, siendo la medida de los sensores ópticos diferente a la que indican los termopares. Este hecho se debe a que la fibra óptica no se encuentra completamente libre en el interior del encapsulado. Esto es provocado debido a la inserción de lechada de cemento en el interior del encapsulado, que asciende por capilaridad.

Por este motivo, los ensayos se repiten tomando las precauciones correspondientes para evitar roturas inesperadas, y asegurarse que la fibra permanezca en todo momento libre en el interior del encapsulado. Los resultados de los nuevos ensayos se presentan en la Figura 3.60.

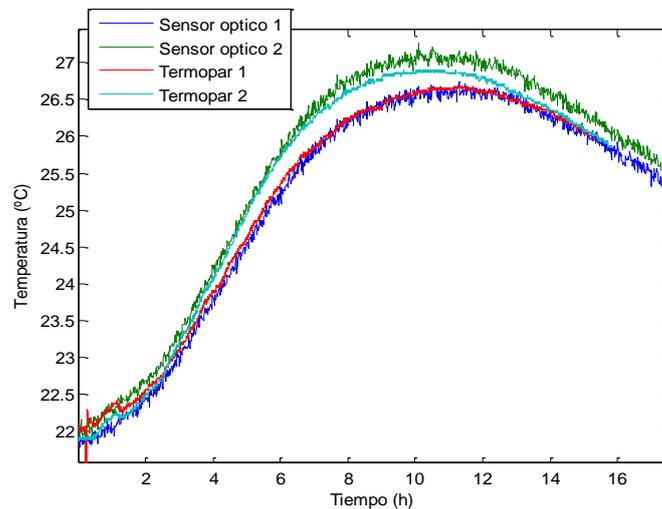


Fig. 3.59 Curvas de temperaturas de sensores ópticos y termopares.

Los nuevos ensayos arrojan resultados muy satisfactorios. Además, es importante señalar que la evolución del espectro de luz reflejada ha sido el correcto durante todo el ensayo (Figura 3.61),

sin distorsiones en cuanto su forma, y sin la aparición de picos secundarios que puedan distorsionar los resultados.

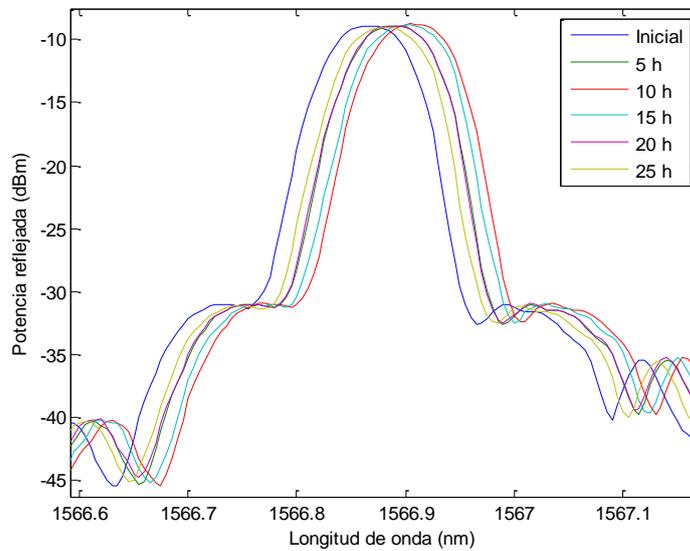


Fig. 3.60 Evolución del espectro del sensor óptico durante el ensayo..

3.7.2.13- Sensor óptico para medir deformaciones en la armadura de una estructura de hormigón.

En ocasiones, el diseño de una estructura de hormigón armado conlleva la plastificación de las armaduras. Por lo tanto, resulta importante conocer la deformación a la que están trabajando estas armaduras y con ello poder conocer su tensión.

Este ha sido el motivo que ha impulsado a proyectar esta tipología de ensayos. Se han colocado sensores ópticos y galgas extensométricas adheridos a las armaduras de una estructura de hormigón armado, del modo indicado en la Figura 3.62. Con ello, se realizará una comparativa entre las deformaciones medidas por los dos sistemas, discutiendo la validez de los resultados obtenidos.

La estructura de hormigón armado empleada en el ensayo consiste en un nudo de hormigón reforzado con presillas y angulares metálicos. Estas probetas son objeto de una investigación que se está realizando en el Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil.

El ensayo se lleva a cabo en un pórtico de carga del departamento del ICITECH, tal y como muestra la Figura 3.63.



Fig. 3.61 Imagen del armado del nudo viga-soporte (a). Galgas y sensores ópticos adheridos sobre la armadura, señalados en rojo (b).

Se colocan 4 sensores ópticos junto con 4 galgas que sirven de referencia para la comparación de resultados. De los 4 sensores ópticos, se produce la rotura de uno de ellos durante la maniobra de hormigonado, debido a un accidente con uno de los operarios que maniobra el cubilete de vertido del hormigón. Por tanto, se dispone durante el ensayo un solo sensor óptico en la cara inferior del nudo, y dos en la cara superior.

El ensayo consiste en colocar la probeta en el pórtico de ensayo (Figura 3.63) y aplicar inicialmente una carga horizontal de 12 toneladas. Tras la aplicación de la carga horizontal, se procede a la aplicación de la carga vertical hasta llevar la probeta a la rotura.



Fig. 3.62 Imagen de la probeta en el pórtico de ensayo.

Las leyes de deformaciones de las armaduras se muestran en la Figura 3.64.

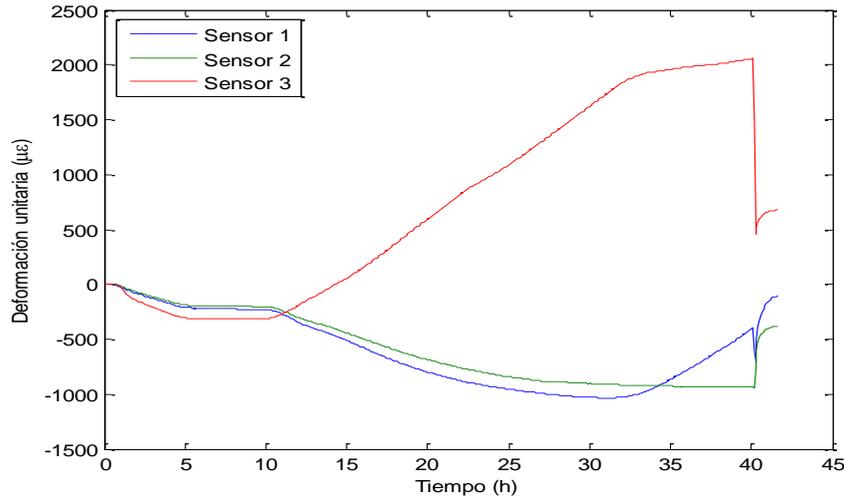


Fig. 3.63 Leyes de deformaciones de los sensores ópticos instalados en las armaduras de la probeta.

Inicialmente y hasta el minuto 10 de comenzado el ensayo, los 3 sensores ópticos indican deformaciones de compresión hasta alcanzar un valor próximo a $350\mu\epsilon$, momento a partir del cual las deformaciones permanecen constantes. Esto corresponde con la aplicación de la carga horizontal.

Una vez se aplica la carga horizontal, se procede a aplicar la carga vertical que aumenta progresivamente hasta la rotura. El sensor instalado en la cara inferior indica tracciones, que alcanzan un valor de $2000\mu\epsilon$, instante en que se alcanza la plastificación de las armaduras. Los sensores ópticos situados en la cara superior indican compresiones, con valores máximos de $1100\mu\epsilon$.

No ha sido posible llevar a cabo la comparativa con los valores obtenidos por las galgas extensométricas, debido a que éstos no han sido captados correctamente, probablemente debido a deficiencias en la conexión de los elementos de medida.

Resulta interesante destacar el comportamiento del sensor en cuanto a la forma del espectro reflejado, manteniendo durante todo el ensayo la misma forma, sin distorsiones ni pérdidas de potencia (Figura 3.65).

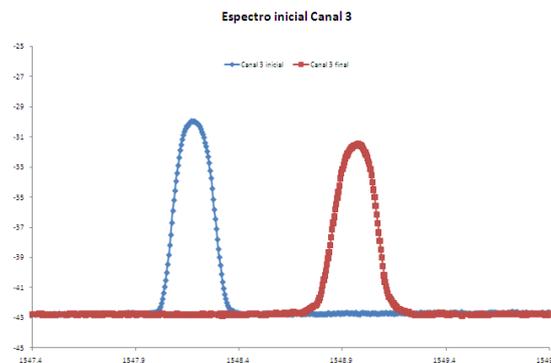


Fig. 3.64 Evolución del espectro, antes y después del ensayo.

Además, es importante resaltar el buen comportamiento de los sensores ópticos frente a las condiciones climatológicas adversas, puesto que desde la instalación de los mismos hasta su monitorización transcurren aproximadamente 90 días, estando los sensores expuestos a la acción directa del sol, lluvia o aire.

3.7.2.14- Inconvenientes del encapsulado del sensor óptico. Posibles soluciones.

Como se indicó en el apartado 3.7.2.1., el sensor óptico empleado en los ensayos pertenece a la tipología de los FBG, y su encapsulado está formado por un conjunto formado por fibra de vidrio, tratada con resina de poliéster. Este encapsulado ha ofrecido resultados muy satisfactorios en las pruebas realizadas en los laboratorios del ICITECH y del ITEAM.

No obstante, existe una cuestión que presenta efectos importantes sobre el comportamiento de este sensor óptico. Esta cuestión viene motivada por las variaciones térmicas que experimenta el sensor cuando no está adherido a ninguna superficie (antes de su instalación y monitorización). El hecho de que existan variaciones térmicas, implica un cambio en la red de Bragg del sensor, y por tanto una variación del espectro de luz reflejado que supone una variación de la longitud de onda.

Si se tratara de una FBG no existiría ningún inconveniente, puesto que se obtendrían las variaciones de temperatura sufridas empleando los coeficientes resumidos en el apartado 3.7.2.7. Pero si se trata del sensor encapsulado, el propio encapsulado supone una afección sobre la red de Bragg con la que está en contacto y en ocasiones, puede llegar a provocar que la modificación de la red no sea uniforme. Esto conlleva deformaciones excesivas en la forma de los espectros, y variaciones en la obtención de la longitud de onda reflejada incorrectas.

Para evitar esa afección, es necesario un encapsulado lo más uniforme posible. Si el encapsulado no es uniforme, la dilatación o contracción del mismo al variar la temperatura se transmite de forma no uniforme a la red de Bragg. Si el encapsulado es lo más uniforme posible, las dilataciones o contracciones que sufre la red de Bragg resultan ser uniformes también, por lo que el espectro no sufre modificación en su forma.

Y para el caso que ocupa este trabajo, el encapsulado propuesto no es uniforme ya que la fibra de vidrio supone una malla de pelos de vidrio, aleatoriamente entrelazados entre sí (Figura 3.66). Al contraer el encapsulado, las fibras de vidrio presentan una afección diferente según la zona de la red de Bragg donde se encuentre, y da lugar a la modificación de la forma del espectro.



Fig. 3.65 Aleatoriedad en los pelos de la fibra de vidrio y afección sobre la red de Bragg.

Este aspecto es de gran importancia en el comportamiento del sensor. La consecuencia de la distorsión que puede experimentar el espectro de luz implica la obtención de longitudes de onda reflejadas incorrectas. Esto supone que las deformaciones medidas por los sensores ópticos no son correctas, y por tanto la obtención de las tensiones de trabajo de la estructura tampoco.

Esta es una cuestión que se encuentra todavía en fase de estudio. Los resultados iniciales obtenidos son muy satisfactorios.

3.7.3 – Conclusiones obtenidas.

Se han llevado a cabo una serie de ensayos con el objeto de validar el empleo de un sensor óptico tipo FBG desarrollado y patentado por el ICITECH e ITEAM. Los resultados de los ensayos han arrojado conclusiones claras:

- a) El proceso de fabricación del sensor óptico desarrollado resulta rápido, sencillo y de fácil manipulación.
- b) Los materiales que lo forman presentan un precio asequible, por lo que la fabricación del sensor óptico no supone un precio excesivo comparado con los precios de los sensores ópticos comerciales existentes (en ocasiones llegan a alcanzar los 200 euros).
- c) El encapsulado propuesto resulta flexible, pero a la vez resistente frente a golpes y caídas. Ello permite instalarlo en superficies que tengan cierta curvatura.
- d) Los ensayos realizados presentan resultados muy satisfactorios, concluyendo la validez del sensor óptico para el empleo en la medida de deformaciones y temperaturas en estructuras.
- e) La sensibilidad de la deformación obtenida para el sensor desarrollado en este trabajo presenta un valor de $1,15 \text{ pm}/\mu\epsilon$. Los sensores ópticos comerciales presentan valores de sensibilidad mayores, del orden de $1,5 \text{ pm}/\mu\epsilon$. (Figura 3.29). Esta diferencia de sensibilidades conlleva una clara conclusión. Los sensores desarrollados por el ITEAM e ICITECH tienen mayor sensibilidad frente a la deformación. Si existe una variación de longitud de onda reflejada de 1500 pm, las deformaciones arrojadas por los sensores viene dada en la Tabla 3.6.

Tipo de sensor óptico.	Sensor ICITECH-ITEAM	Sensor óptico comercial.
Sensibilidad ($\text{pm}/\mu\epsilon$)	1,15	1,5
Deformación ($\mu\epsilon$)	1304	1000

Tabla 3. 7 Sensibilidades y deformaciones medidas por los sensores ópticos.

Como puede observarse, el sensor ICITECH-ITEAM tiene mayor sensibilidad para la obtención de la deformación.

- f) Es necesario comparar con un sistema fiable los resultados obtenidos en los apartados 3.7.2.11 y 3.7.2.13. Actualmente se está trabajando en esa dirección.
- g) La propia configuración del sensor óptico, en el que la fibra óptica se encuentra prácticamente en contacto con la superficie a monitorizar, es una de las virtudes más importantes del sensor óptico. Este aspecto se analiza más en detalle en el apartado 3.8.
- h) Uno de los inconvenientes de esta configuración era la disposición de las capas, lo que le daba al sensor un carácter asimétrico. Debido a esto, se produjeron las anomalías explicadas en el apartado 3.7.2.14, y que actualmente están en fase de ser solucionadas.
- i) El proceso de pegado del sensor sobre la estructura es crítico. Se debe asegurar un espesor de adhesivo lo suficientemente pequeño para la correcta transferencia de deformaciones. En este sentido, el apartado 3.8 presenta soluciones numéricas, que siguen mostrando la robustez y bondad de este sensor óptico.
- j) Este tipo de sensor pertenece a la tipología de los espectométricos, cuyo punto más importante consiste en mantener la forma del espectro de luz, y medir variaciones que experimenta el máximo de reflectividad. Este aspecto ha sido conseguido, y es importante destacar el buen comportamiento que ha ofrecido el sensor, incluso estando sometido a la acción directa de agentes climatológicos como son el agua, sol o viento.

3.8 - Fase numérica.

3.8.1 - Generalidades.

A través de las campañas experimentales que se han citado en el apartado 3.7, se ha mostrado el buen comportamiento que ofrece el sensor óptico patentado por el ICITECH e ITEAM para determinar deformaciones y temperaturas sobre una estructura. Para conseguir un correcto funcionamiento del sensor es necesario tomar precauciones durante la manipulación y operación de pegado a la estructura, puesto que se trata de un proceso manual. Esto implica que existen un número de parámetros que pueden afectar sobre la correcta medición que ofrece el sensor:

- a) Espesor de adhesivo empleado.
- b) Propiedades mecánicas del adhesivo.
- c) Propiedades mecánicas del material que forma el encapsulado

Mediante un estudio experimental exhaustivo, sería posible analizar la influencia de estos parámetros sobre los resultados que ofrece el sensor. Ahora bien, en este caso se requeriría una inversión de tiempo considerable, ya que el control de estos parámetros en laboratorio supondría una tarea que no resultaría fácil.

Una herramienta potente que nos permite estudiar el comportamiento del sensor al variar estos parámetros consiste en un modelo numérico por el MEF (Método de Elementos Finitos). El objetivo de modelar numéricamente el sensor es analizar cómo afecta la variación de ciertos parámetros sobre la transferencia de deformaciones desde la superficie a medir hasta la fibra óptica. Así, es posible comprender mejor el funcionamiento y la interacción de este sensor óptico con la superficie que se desea monitorizar.

Para llevar a cabo el modelo numérico, se plantea un análisis tridimensional por el MEF de un sensor tipo ensayado en laboratorio. Se impone una deformación conocida en la superficie a monitorizar, y se estudia la transferencia de deformación que se produce a través de la capa de adhesivo. Además, se lleva a cabo una comparativa entre la configuración del sensor desarrollado por el ICITECH e ITEAM, y otros sensores comerciales, cuya configuración habitual responde a una fibra embebida entre dos capas de material. El análisis es elástico y lineal, y se realiza mediante el programa LUSAS V.14.

Antes de desarrollar el modelo numérico es necesario conocer las propiedades de los materiales que forman el sensor óptico. En algún caso se han realizado ensayos de laboratorio para poder conocer alguno de estos valores, mientras que en otros, se han adoptado valores planteados por otros autores.

3.8.1.1 - Propiedades de los materiales empleados.

- Encapsulado a base de fibra de vidrio tratado con resina de poliéster.

El encapsulado del sensor está formado por una base de fibra de vidrio tratada con resina de poliéster. La fibra de vidrio es del tipo M501-300 y tiene un gramaje de 300 g/m^2 . La resina de

poliéster recibe el nombre Crystic 446 Palv. El catalizador empleado es el P-200 y se utiliza para producir la reacción de curado de la resina. Los tres productos pertenecen a una casa comercial especializada en este tipo de materiales.

El producto final se obtiene mediante la mezcla de estos elementos con las dosificaciones adecuadas, tal y como indica la figura 3.66. El material resultante es rígido y resistente, pero cuyas propiedades mecánicas se desconocen. Por este motivo, se llevan a cabo los ensayos de laboratorio propuestos.

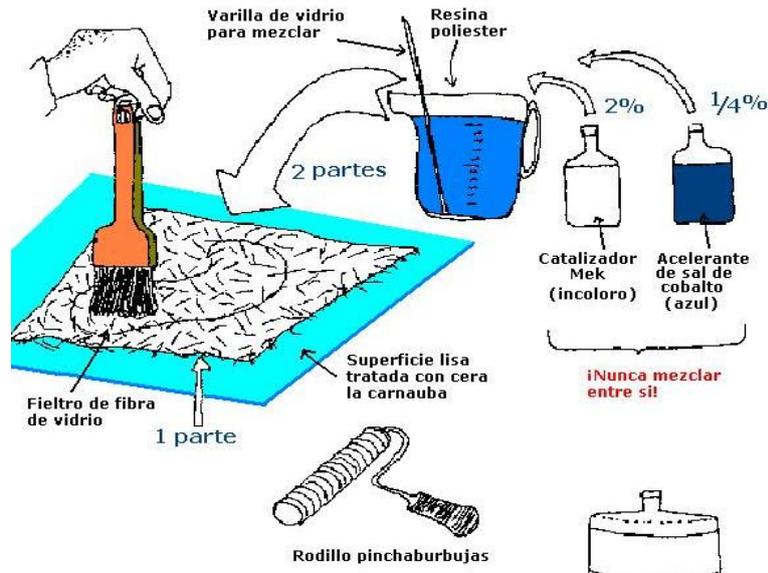


Fig. 3.66 Esquema de mezclado de la fibra de vidrio y la resina de poliéster, con las proporciones adecuadas (www.glaspol.net)

Existe bibliografía al respecto en la que se ha estudiado el comportamiento de los materiales compuestos. Las propiedades mecánicas de estos tipos de materiales son función de la proporción existente de resina y fibra de vidrio.

Para conocer las propiedades mecánicas de este material se han llevado a cabo ensayos en el laboratorio del ICITECH, en los que se han ensayado a tracción unas probetas como las representadas en la Figura 3.67. Se registró la carga aplicada sobre las mismas, así como deformaciones mediante galgas extensométricas.



Fig. 3.67. Imagen de las probetas durante la fabricación (a). Instante del ensayo (b).

El área de la probeta se ha medido mediante el empleo de un microscopio facilitado por la Unidad Docente de Química de los Materiales, del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de Valencia.

En la Figura 3.68 (a), se muestra una sección longitudinal del encapsulado adherido a la superficie a monitorizar. En esta imagen es posible observar el espesor de encapsulado y de adhesivo empleado. En la Figura 3.68 (b) se observa uno de los trabajos con el microscopio.



Fig. 3.68 Sección transversal del encapsulado, adhesivo y superficie a monitorizar (a). Trabajo con el microscopio durante una medición (b).

La disposición de las galgas es, como se observa en la Figura 3.69, perpendiculares entre sí. De este modo se puede obtener el módulo de elasticidad del material que forma la probeta y el coeficiente de Poisson.

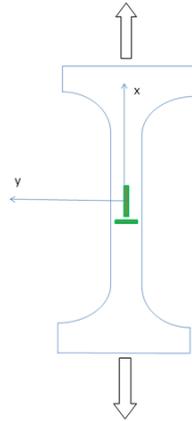


Fig. 3.69 Probeta instrumentada con galgas, y dirección de aplicación de la carga en el ensayo.

Con la galga orientada según el eje x se obtiene la curva tensión deformación (Figura 3.70), cuya pendiente del tramo elástico y lineal proporciona el valor del módulo de elasticidad. Por otro lado, el coeficiente de Poisson puede obtenerse según la siguiente ecuación de Hooke, y teniendo en cuenta que $\sigma_y = \sigma_z = 0$:

Se ensayaron un total de 6 probetas, obteniendo en todas ellas resultados similares entre sí, como los indicados en la Figura 3.75.

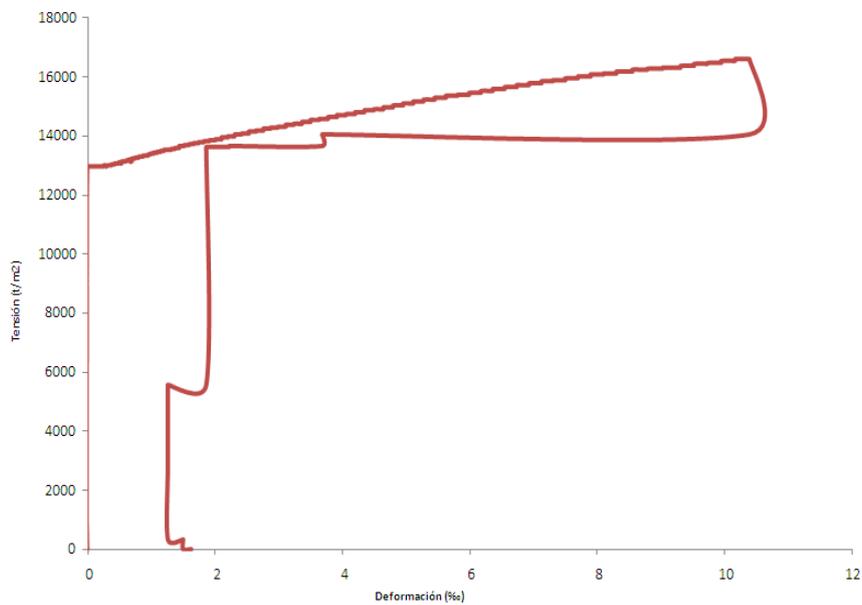


Fig. 3.70 Curva tensión-deformación de una de las probetas de fibra de vidrio tratada con resina de poliéster.

Para obtener el módulo de elasticidad del material, se ha representado el primer tramo de la curva (Figura 3.71). Éste no resulta ser lineal, probablemente debido a los ajustes iniciales de las mordazas de la prensa, puesto que no se trata de mordazas específicas para su ensayo con materiales compuestos. No obstante, como el punto de plastificación está claramente identificado en la curva tensión-deformación, es posible obtener el módulo de elasticidad

trazando una recta que una este punto con el origen de coordenadas. La pendiente de esta recta es el módulo de elasticidad del material.

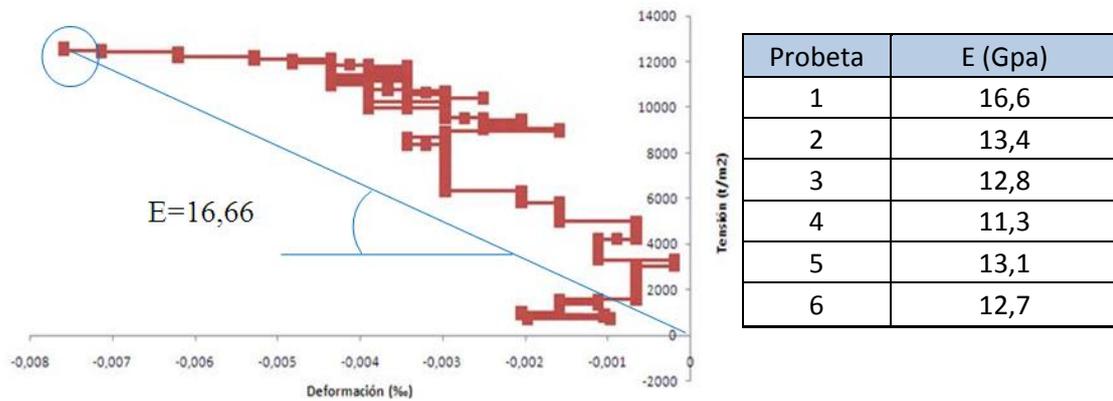


Fig. 3.71 Tramo inicial de la curva tensión-deformación, y ajuste para obtener el módulo de elasticidad del material compuesto (a). Resumen de los módulos de elasticidad obtenido en las 6 probetas ensayadas.

Algunos autores proponen valores del módulo de elasticidad de ciertos materiales compuestos. En la Figura 3.72 se muestran algunos de ellos. El valor propuesto es del mismo orden de magnitud a los obtenidos en los ensayos de laboratorio presentados con anterioridad.

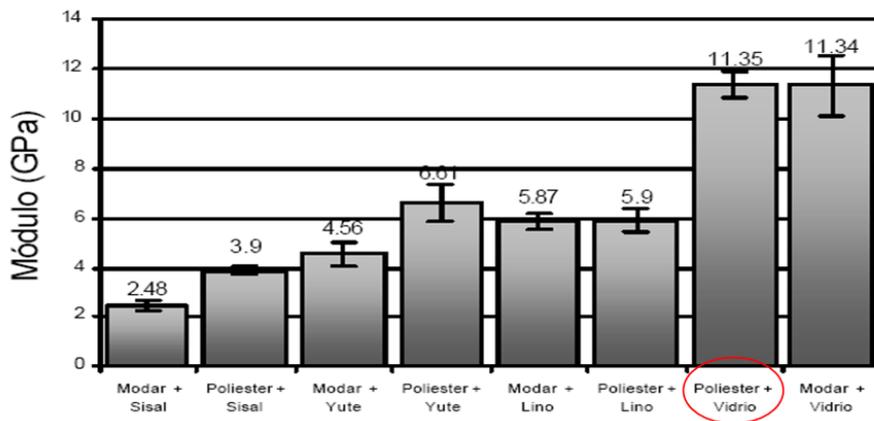


Fig. 3.72 Valores del módulo de elasticidad en diferentes materiales compuestos. (Exequiel Rodríguez, 2003).

El coeficiente de Poisson se obtiene según la ecuación de Hooke (3.26), y teniendo en cuenta que $\sigma_y = \sigma_z = 0$ (3.27). La figura 3.73 muestra el rango de valores en que se encuentra este coeficiente obtenido tras ensayar las 6 probetas.

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} (\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)) \tag{3.26}$$

$$\nu = -\frac{\epsilon_y}{\epsilon_x} \tag{3.27}$$

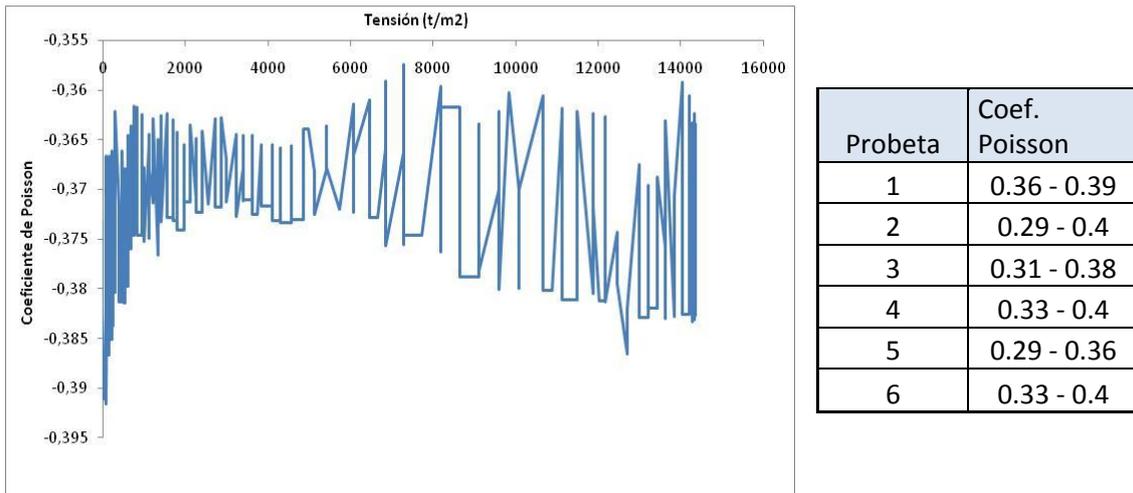


Fig. 3.73 Variación del coeficiente de Poisson con la carga en una de las probetas ensayadas (a). Resumen de los diferentes Coeficientes de Poisson en las diferentes probetas (b)

- Fibra óptica.

La fibra óptica empleada pertenece a la casa comercial FibreCore. Presenta tres capas en su sección transversal con los diámetros indicados en la Figura 3.74. El material que la forma es vidrio de sílice.

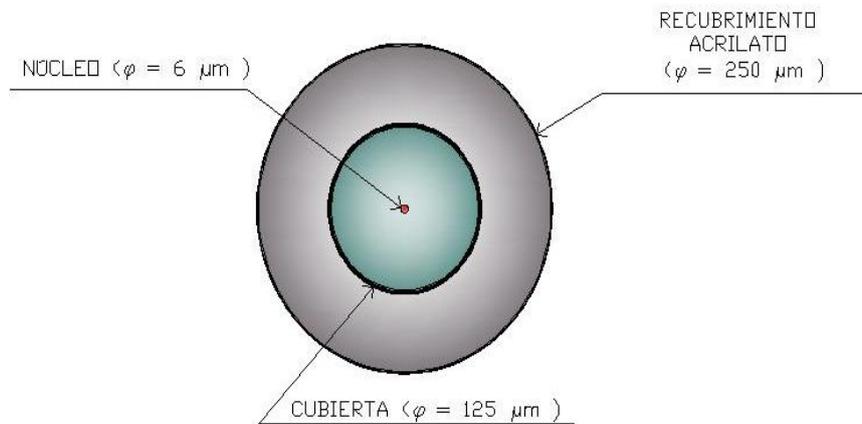


Fig. 3.74 Sección transversal de una fibra óptica empleada.

Las propiedades mecánicas del vidrio de sílice están publicadas y tabuladas por diferentes autores. Se adoptan los valores que muestra la Figura 3.75.

PROPIEDADES ELASTICAS DE MATERIALES REPRESENTATIVOS A TEMPERATURA ORDINARIA			
MATERIAL	MÓDULO YOUNG E, 10 ¹⁰ N/M ²	RELACION DE POISSON V	RIGIDEZ ESPECIFICA E/P 10 ⁶ N.M/KG.
GRAFITO	100		5000
CRISTALES DE AL ₂ O ₃ (ZAFIRO)			
[1010]	230		580
[1120]	125		310
[0001]	48		120
BORO	45	0.21	190
CARBURO SINTERIZADO (WC)	65	0.20	46
VÍTREO - CERÁMICO	10	0.25	38
VIDRIO DE SÍLICE	8	0.24	32
ALEACIONES DE ALUMINIO	7	0.33	26
ACERO	20	0.28	25
TUNGSTENO	41	0.28	21
MADERA (TÍPICA):			
LONGITUDINAL	1	~0.04	16
RADIAL	0.07	~0.3	1
TANGENCIAL	0.06	~0.5	1
ALEACIONES DE COBRE	12	0.35	13
NILON (NYLON)	0.3	0.48	3
POLIETILENO	0.04	0.3	0.4

Fig. 3.75 Valores del módulo de elasticidad y del coeficiente de Poisson de distintos materiales (www.materiales.eia.edu)

- Adhesivo.

El adhesivo empleado pertenece a la casa comercial HBM. Se trata del bicomponente X60, y en su hoja de especificaciones técnicas se indica como valor del módulo de elasticidad $E = 13000 \text{ N/mm}^2$. El valor del coeficiente de Poisson no está incluido en la información disponible, por lo que es importante llevar a cabo un estudio de sensibilidad de este parámetro.

El espesor de adhesivo empleado es variable, puesto que la operación de pegado es un proceso totalmente manual. Para saber el orden de magnitud del espesor que se emplea, se ha llevado a cabo un estudio mediante el microscopio de la Figura 3.68. Para una operación de pegado con un control de ejecución normal, se obtiene que el valor del adhesivo empleado es de 400 μm , como muestra la Figura 3.76.



Fig. 3.76 Imágenes del microscopio, donde se observa el espesor del adhesivo con la escala.

La Tabla 3.7 y Figura 3.77 muestran un resumen con las dimensiones y formas de cada elemento, su módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson a emplear en el modelo numérico.

Material	Dimensiones	E (GPa)	ν
GFRP	En planta 10*1 cm Espesor 500 μ m	Estudio de sensibilidad. (E_{\min}, E_{\max})= (10,16)	Estudio de sensibilidad. (ν_{\min}, ν_{\max})= (0,29, 0,4)
Fibra óptica	L=10cm Φ =250 μ m	80	0,24
Adhesivo HBM	En planta 10*1 cm Espesor variable	13	Estudio de sensibilidad. (ν_{\min}, ν_{\max})= (0,1, 0,4)

Tabla 3.7 Resumen de las propiedades de los materiales a emplear.

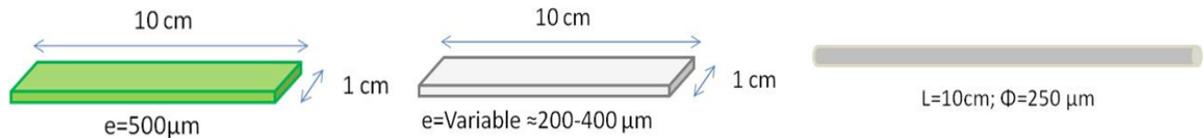


Fig. 3.77 Dimensiones y formas del encapsulado, del adhesivo y de la fibra óptica.

3.8.2 - Tipos de elementos finitos y mallado empleado.

Existen tres elementos a modelizar dentro del modelo numérico:

- La fibra óptica.
- El adhesivo comercial HBM.
- El encapsulado a base de fibra de vidrio y resina de poliéster.

La fibra de vidrio que forma el sensor óptico se modeliza mediante elementos lineales tipo BRS3 (Figura 3.78), el cual está formado por tres nodos, con 3 grados de libertad por nodo (traslaciones en X, Y, Z).

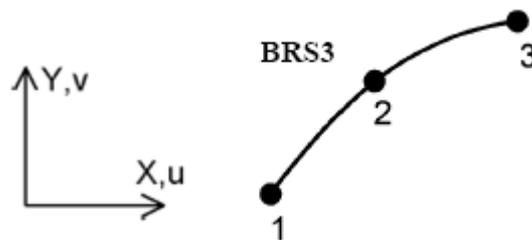


Fig. 3.78 Elemento BRS3 (Elemente Reference Manual. Lusas Version 14. Issue 2).

El adhesivo comercial HBM y el encapsulado de resina de poliéster con fibra de vidrio están modelizados mediante elementos sólidos 3D HX20 (Figura 3.79), el cual está formado por 20 nodos, con 3 grados de libertad por nodo (traslaciones en X, Y, Z).

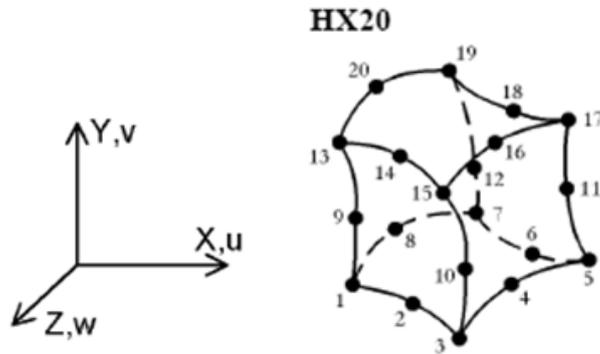


Fig. 3.79 Elemento HX20. (Elemente Reference Manual. Lusas Version 14. Issue 2).

Los tres elementos (fibra óptica, adhesivo HBM, y encapsulado) mallados hacen coincidir los nodos de un elemento con el contiguo, para que exista compatibilidad de deformaciones en los nodos. Las Figuras 3.80 y 3.81 muestran la malla empleada en los tres elementos.

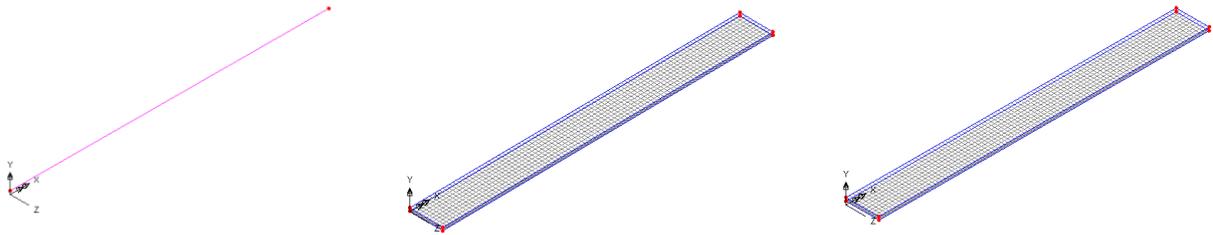


Fig. 3.80 Mallado de la fibra óptica (a), del adhesivo comercial HBM (b) y del encapsulado (c).

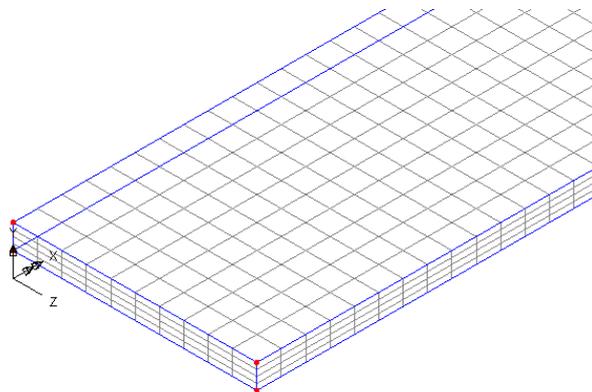


Fig 3.81 Imagen del mallado empleado para el adhesivo comercial HBM y el encapsulado, mediante elementos HX20.

Para la modelización de los elementos existe también la posibilidad de considerar un elemento con menor número de nodos, y por tanto, con mayor simplicidad de cálculo. No obstante, debido al reducido espesor de los mismos, es aconsejable adoptar un elemento con mayor número de nodos a pesar del mayor coste computacional que ello origina.

Para garantizar el correcto funcionamiento del programa es necesario que cada elemento finito cumpla un ratio de sus dimensiones. En este caso, se exige a cada elemento finito que el cociente entre dos de sus lados sea inferior a 10 (Figura 3.82).

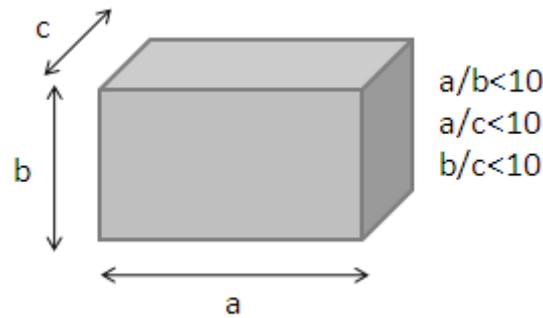


Fig 3.82 Ratio entre los lados del elemento finito para garantizar el correcto funcionamiento del programa.

El contacto entre la superficie del encapsulado y la superficie del adhesivo se modeliza como contacto fijo, es decir con compatibilidad de movimientos entre los elementos que une. Esta hipótesis, se corresponde con lo observado en el laboratorio, en el que no se producía despegue en esa zona.

3.8.3 - Condiciones de contorno y aplicación de carga.

3.8.3.1 – Condiciones de contorno.

Los sensores patentados por el ICITECH e ITEAM presentan dos planos de simetría. Por este motivo y a efectos de la modelización numérica, se considera únicamente ¼ del encapsulado, aplicando condiciones de simetría en los planos que muestra la Figura 3.83. De esta manera se reduce considerablemente el coste computacional que requiere el cálculo de cada modelo. Por lo tanto, se impone como condiciones de contorno los planos de simetría XY y ZY, respectivamente (Figura 3.84).

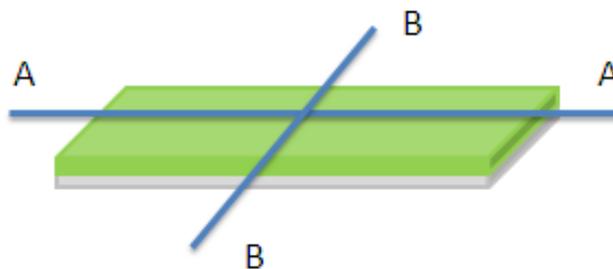


Fig 3.83 Planos de simetría del conjunto encapsulado, fibra óptica y adhesivo.

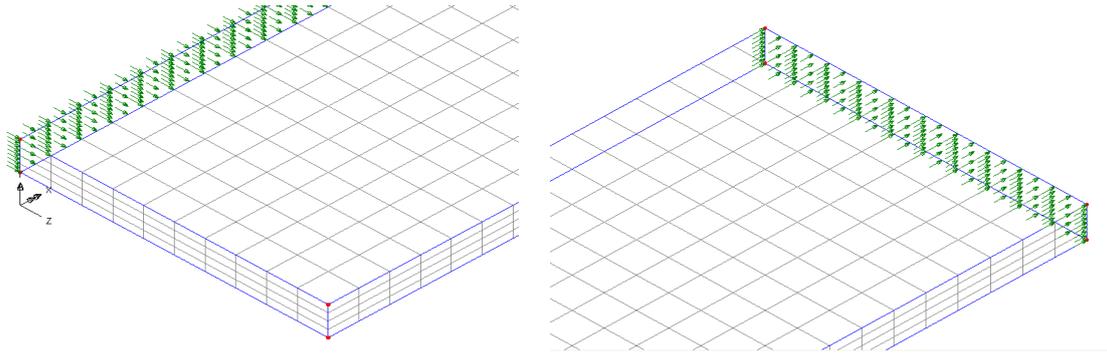


Fig 3.84 Planos de simetría, XY, ZY.

El movimiento vertical de la base del adhesivo y de la base del encapsulado queda restringido imponiendo una coacción al desplazamiento en el eje y, tal y como indica la Figura 3.85.

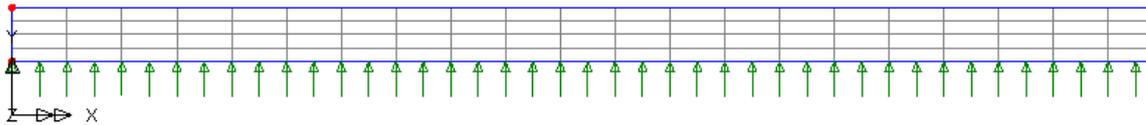


Fig 3.85 Plano inferior, movimiento restringido según el eje Y.

3.8.3.2 – Condiciones de carga.

En cuanto a las condiciones de carga, se impone una deformación en el plano inferior del adhesivo comercial. Una de las dificultades existentes para la imposición de un valor de deformación, es que LUSAS V.14 no dispone de una opción que permita este paso.

Para solucionar esto, se impone un incremento de temperatura en el plano que conforma la base del adhesivo, equivalente a una deformación impuesta según la ecuación:

$$\varepsilon = \alpha \Delta T \quad (3.28)$$

Siendo α el coeficiente de dilatación térmica del material.

Para que la deformación impuesta afecte solo en la dirección longitudinal del sensor, se considera el encapsulado como un material ortótropo. Se mantiene el mismo módulo de elasticidad en ambas direcciones de ortotropía, y sólo dispone coeficiente de dilatación térmica en la dirección longitudinal X, tal y como muestra la Figura 3.86.

	Value
Young's modulus x	13e6
Young's modulus y	13e6
Shear modulus xy	0
Poisson's ratio xy	0.2
Angle of orthotropy	0
Mass density	20
Coefficient of thermal expansion x	0.035e-4
Coefficient of thermal expansion y	0
Coefficient of thermal expansion xy	0

Fig 3.86 Cuadro con las propiedades del adhesivo empleadas en el modelo teórico.

Se impone una temperatura en la base del adhesivo de 7.5°C, por lo que la deformación impuesta en este caso vale $\varepsilon = 0,026 \cdot 10^{-3}$

3.8.4 - Resultados obtenidos.

Una vez se ha llevado a cabo el análisis numérico, se ha obtenido la deformada de la malla de elementos finitos, y las leyes de deformaciones a lo largo del conjunto que forma el adhesivo, la fibra óptica, y el encapsulado.

3.8.4.1 - Pauta de comportamiento.

Para todos los modelos procesados, la deformada sigue el mismo patrón de comportamiento. Se produce un gradiente de deformaciones entre el plano inferior y superior que forma el adhesivo. Este gradiente es mayor a medida que aumenta el espesor del mismo, tal y como puede compararse en las Figuras 3.87 y 3.88.

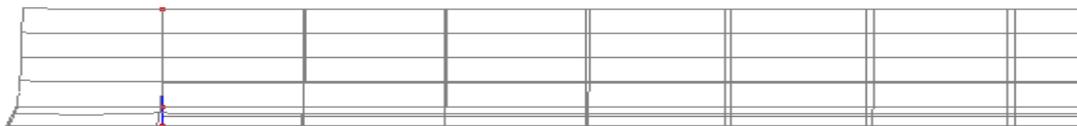


Fig 3.87 Malla deformada del conjunto que integra el modelo. Espesor de adhesivo de 100µm.

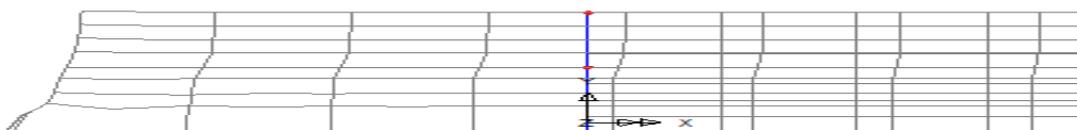


Fig 3.88 Malla deformada del conjunto que integra el modelo. Espesor de adhesivo de 600µm

El gradiente de deformaciones que se produce en el adhesivo se evalúa a partir del error, en %, definido como la diferencia entre las deformaciones del plano inferior del encapsulado, y la deformación que absorbe la fibra óptica, tal y como indica la ecuación 3.29.

$$Error (\%) = \frac{\varepsilon_p - \varepsilon_f}{\varepsilon_p} * 100 \quad (3.29)$$

Siendo ε_p y ε_f la deformación del plano y de la fibra, respectivamente.

En la Figura 3.89 se muestran las deformaciones del plano inferior del encapsulado (a) y la deformación absorbida por la fibra óptica (b). Entre ellas existe una diferencia, que se traduce en el error calculado en la ecuación 3.30.

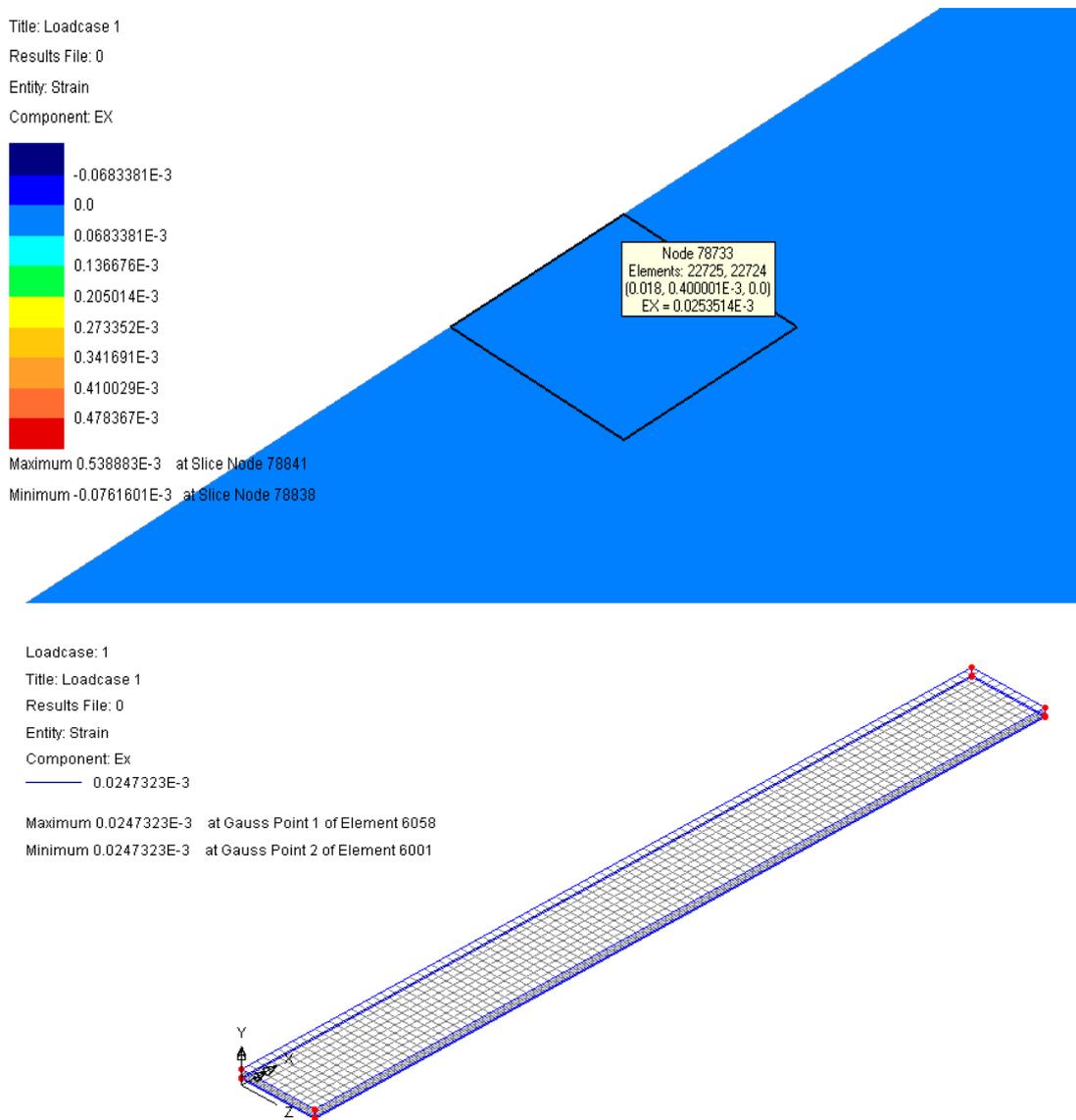


Fig 3.89 Comparativa de las deformaciones del plano (a), y de la fibra óptica (b).

$$Error (\%) = \frac{(0.02535 * 10^{-3} - 0.02473 * 10^{-3})}{0.02535 * 10^{-3}} * 100 = 2.44\% \quad (3.30)$$

La primera conclusión importante que se deduce del análisis de las deformadas es que el espesor de adhesivo debe ser mínimo para conseguir una correcta transferencia de deformaciones entre la superficie del elemento a monitorizar, y la fibra óptica.

3.8.4.2 - Estudio de sensibilidad. Espesor de adhesivo empleado.

Como se apuntó en el apartado 3.8.1, se hace necesario llevar a cabo un estudio de sensibilidad de ciertos parámetros que intervienen en el modelo numérico. En este apartado se obtiene el error en la medición ante variaciones del espesor del adhesivo empleado.

El error viene provocado por el gradiente de deformaciones que se da al imponer una deformación en la cara inferior del adhesivo, tal y como podemos observar en la figura 3.90.



Fig. 3.90 Gradiente de deformaciones que se produce en la base inferior del sensor óptico. Sección transversal del encapsulado.

Los resultados obtenidos siguen una ley lineal. La Figura 3.91 muestra los resultados obtenidos, expresando el error (%) que se obtiene para cada valor de espesor de adhesivo (μm).

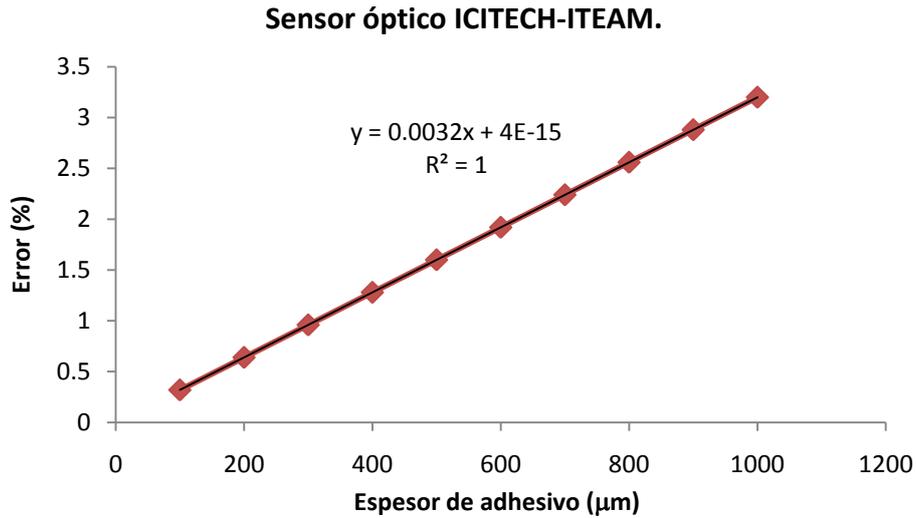


Fig. 3.91 Ley de error en función del espesor de adhesivo empleado, para un valor $\nu=0.2$

Del análisis de la Figura 3.91 se deduce lo que ya se adelantó en el apartado 3.8.4.1. El espesor de adhesivo resulta fundamental en el correcto comportamiento del sensor óptico patentado por el ICITECH y el ITEAM. No obstante, hay que destacar la fiabilidad de este sensor óptico en este aspecto: A grandes espesores de adhesivo, el error que se obtiene no sobrepasa en ningún momento el valor de 3.5%. Ello se debe a la configuración adoptada en este nuevo sensor, en el que la fibra óptica se encuentra lo más próxima posible a la superficie a monitorizar.

Además, los espesores que habitualmente se emplean en las operaciones de pegado, con un control de ejecución normal, están aproximadamente en 400 µm, tal y como muestra la Figura 3.92. Para estos valores, el error que se obtiene no sobrepasa el valor de 1.5 %. Valores de espesor de adhesivo superiores a 1000 µm indican una operación de pegado deficiente. En estos casos, es preferible la retirada del sensor y la nueva colocación.

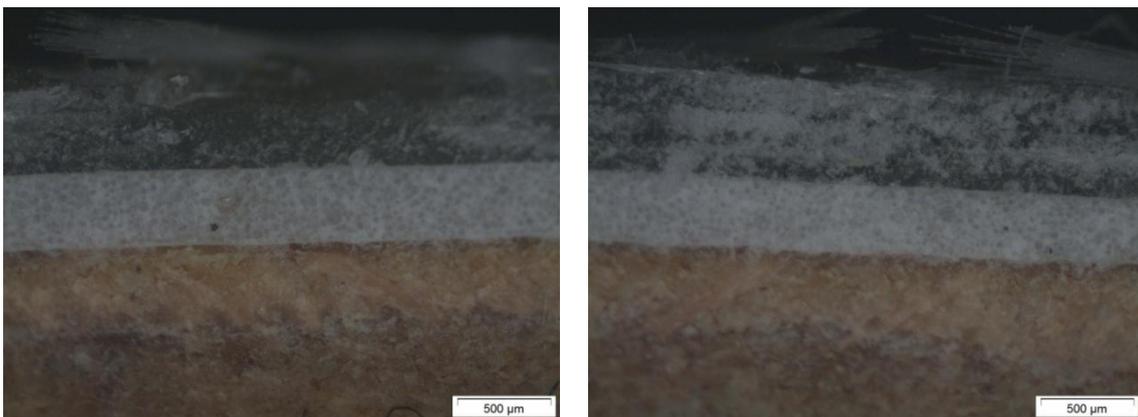


Fig. 3.92 Espesor de adhesivo empleado normalmente en las operaciones de pegado. Las imágenes son captadas por un microscopio.

El análisis de este apartado permite acotar el error que se produce al emplear el sensor óptico patentado por el ICITECH e ITEAM para la medida de deformaciones en una estructura.

3.8.4.3 - Estudio de sensibilidad. Coeficiente de Poisson del adhesivo X60.

La Figura 3.93 indica las características técnicas del adhesivo comercial X60 empleado. Como se observa, no se dispone de ningún dato relativo al coeficiente de Poisson. Esto obliga a efectuar un estudio de sensibilidad de esta variable.

8 Specifications		
Thermal expansion coefficient, α	1/K	$35...40 \cdot 10^{-6}$
Thermal conductivity	kcal	0.17 (with 0...50 °C)
Modulus of elasticity after hardening, approx.	N/mm ²	13 000
Resistance	Ω	$> 10^{15}$
Shrinkage during curing, depend. on ratio of mixture		
1:4	%	4.0
1:2		6.6
1:1		10.0
Temperature limits for strain measurem.		
for zero-point related measurements	°C [°F]	-200...+60 [-328...+140]
for non zero-point related measurements	°C [°F]	-200...+80 [-328...+176]

Fig. 3.93 Especificaciones técnicas del adhesivo comercial HBM. No existen datos relativos al valor del coeficiente de Poisson (www.hbm.com).

Se ha considerado un rango de variación del valor del parámetro comprendido entre 0.1 y 0.4. La Figura 3.94 muestra el error que se obtiene al variar el coeficiente de Poisson del adhesivo. La curva descrita puede aproximarse a una ley exponencial.

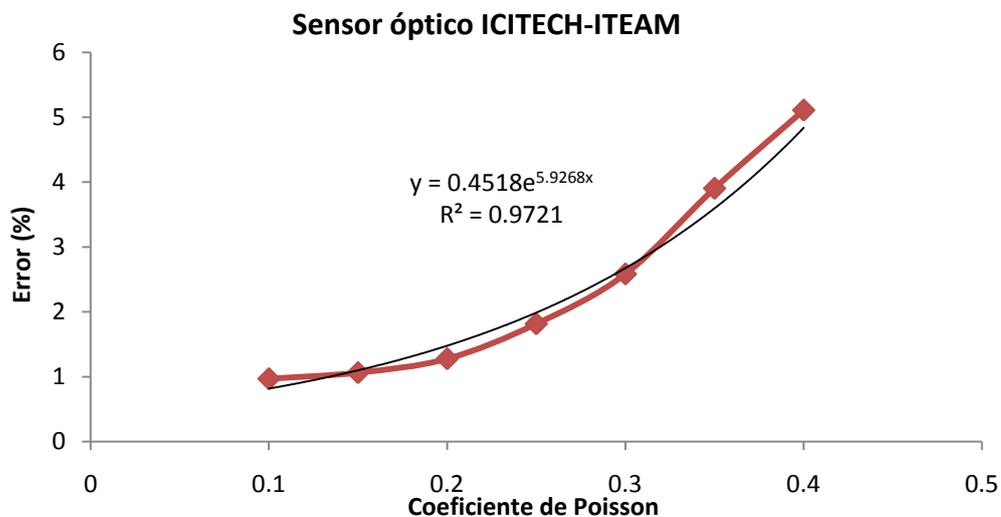


Fig. 3.94 Ley de error en función del coeficiente de Poisson adoptado.

El error aumenta a medida que lo hace el valor del Coeficiente de Poisson. Esto se debe a que a medida que aumenta éste, disminuye el valor del Coeficiente de Rigidez Transversal G, y que viene dado por la ecuación:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \tag{3.31}$$

A mayor rigidez del adhesivo, se produce una mejor transferencia de deformaciones entre los elementos de estudio, y por tanto, un menor error.

La Figura 3.94 ofrece una idea del comportamiento del sensor frente variaciones en el coeficiente de Poisson, pero esto no es suficiente para caracterizar su comportamiento. Por ello, la Figura 3.95 muestra el error obtenido, para diferentes valores de Poisson y diferentes valores de espesor de adhesivo, justificando que a mayores coeficientes de Poisson, el error obtenido es mayor. No obstante, la variación de este parámetro no juega un papel fundamental en el comportamiento del sensor: mediante el empleo de los espesores descritos en la Figura 3.97 (para un control de ejecución normal) el error obtenido en el caso más desfavorable ($\nu=0.4$) no supera el 3%.

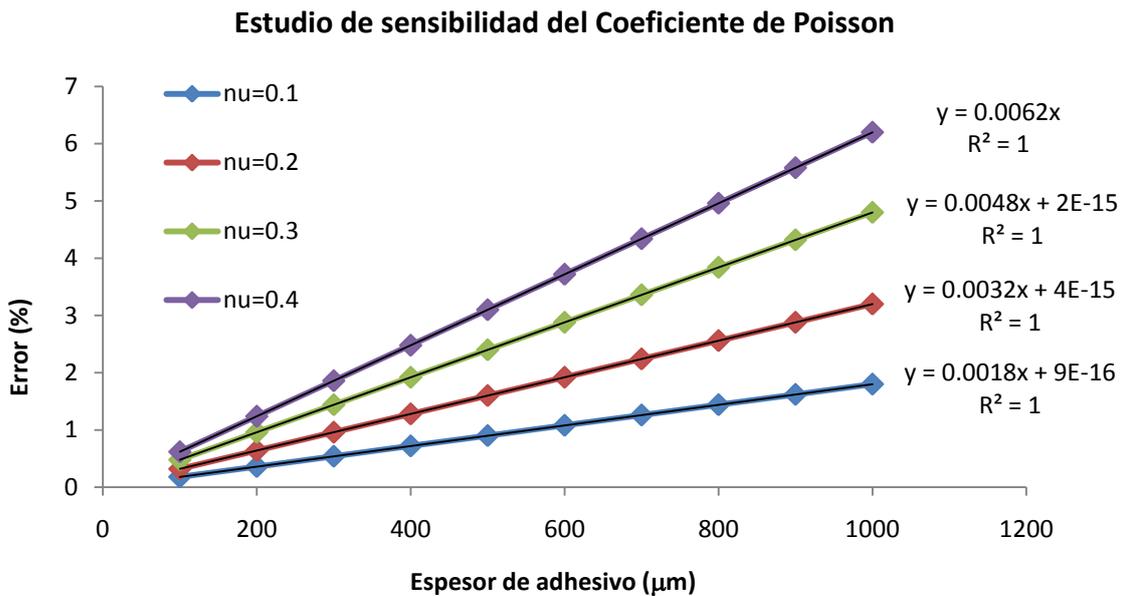


Fig. 3.95 Ley de error en función del Coeficiente de Poisson

3.8.4.4 - Estudio de sensibilidad. Módulo de Elasticidad del material del encapsulado.

Como se apuntó en el apartado 3.8.1, las propiedades mecánicas del material que forma el encapsulado es otra variable que interviene en el modelo teórico formulado. Los resultados obtenidos en el apartado 3.8.1.1 ofrecen unos valores máximos (16.6 GPa) y mínimos (11.3 GPa) entre los que se encuentra el valor del módulo de elasticidad.

La Figura 3.96 muestra el error que se obtiene al variar el módulo de elasticidad del material del encapsulado, para un espesor de adhesivo de 400 μm , y un coeficiente de Poisson de 0.2. La curva obtenida sigue una ley lineal.

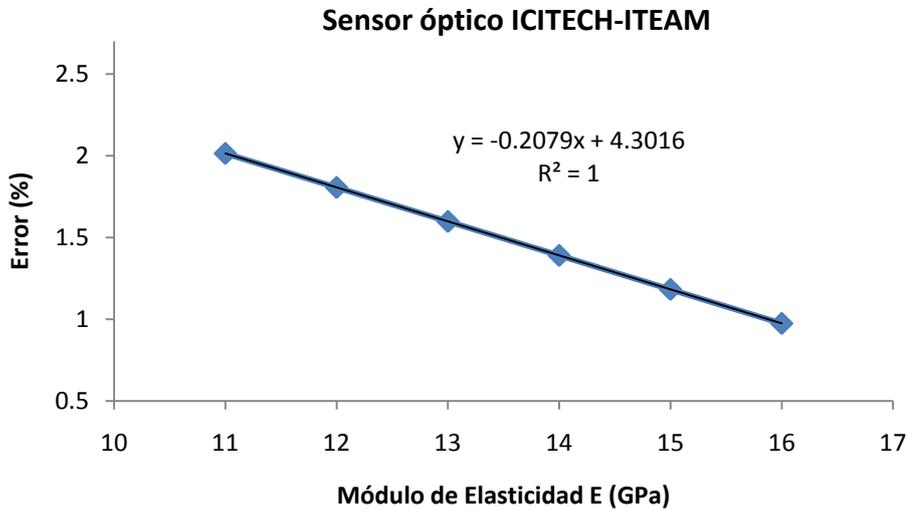


Fig. 3.96 Ley de error en función del módulo de elasticidad del material de encapsulado.

Para cuantificar el error que se produce en la situación más desfavorable, se muestra la Figura 3.97 donde se obtiene el error para diferentes valores de espesor de adhesivo, empleando el módulo de elasticidad mínimo obtenido $E=11.3\text{GPa}$ y el Coeficiente de Poisson máximo $\nu=0.4$.

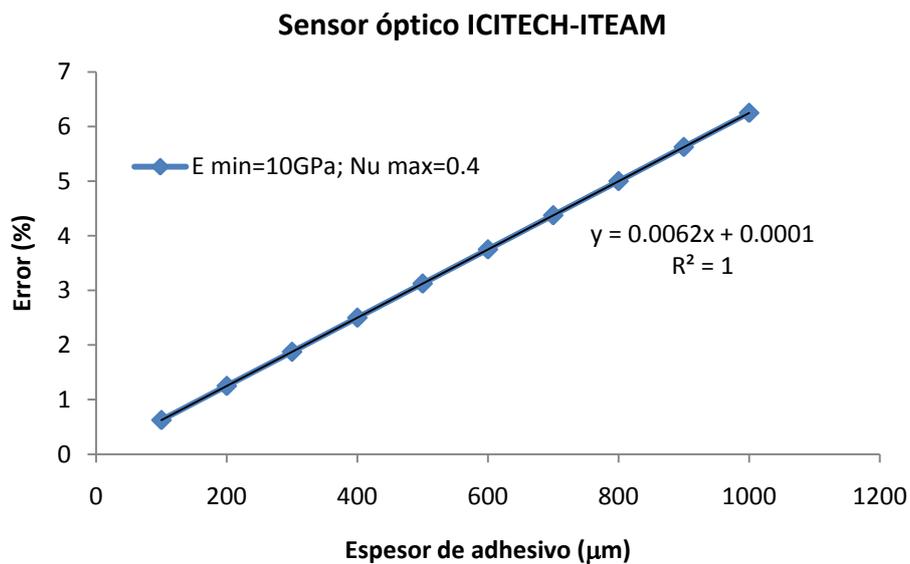


Fig. 3.97 Ley de error en función del adhesivo, para un módulo de Elasticidad de 11.3 GPa (Valor mínimo) y para un Coeficiente de Poisson de 0.4 (Valor máximo).

3.8.4.5 - Comparativa con otros encapsulados comerciales.

La existencia de sensores ópticos comerciales ha obligado a llevar a cabo un estudio de los mismos. El objetivo es establecer una comparativa con los sensores patentados por el ICITECH e ITEAM, y profundizar y mejorar en los aspectos necesarios.

En el apartado 3.7.2.3.3. se muestra los resultados obtenidos de la fase experimental. Esta parte se ha llevado a cabo en los laboratorios del ICITECH y del ITEAM, ensayando probetas de hormigón y metálicas instrumentadas con sensores ópticos comerciales y comparando sus resultados con sensores ópticos del ICITECH e ITEAM.

Los resultados obtenidos indican diferencias con los sensores de referencia (Ver ap. 3.7.2.3.3.), por lo que el siguiente paso fue llevar a cabo una inspección visual del sensor óptico y su encapsulado.

Alguno de estos sensores ópticos comerciales presentan la fibra embebida entre dos capas de material, de modo que el encapsulado empleado presentaba una disposición tipo *sandwich*. Esto es uno de los motivos que propician la diferencia entre los resultados obtenidos.

Para llevar a cabo una comparativa, se modela un sensor tipo comercial, que responde a una disposición como la indicada en las Figuras 3.98 y 3.99. De este modo, se compara el orden de magnitud del error que se produce al emplear esta disposición y el error obtenido con la disposición del encapsulado del ICITECH y del ITEAM.

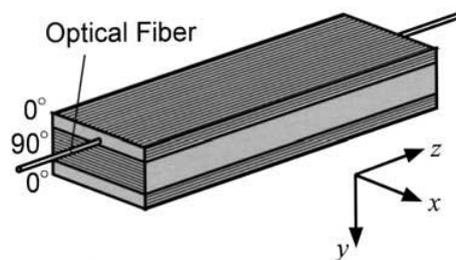


Fig. 3.98 Esquema de algunos encapsulados de sensores ópticos comerciales (Okabe et al. 2002).

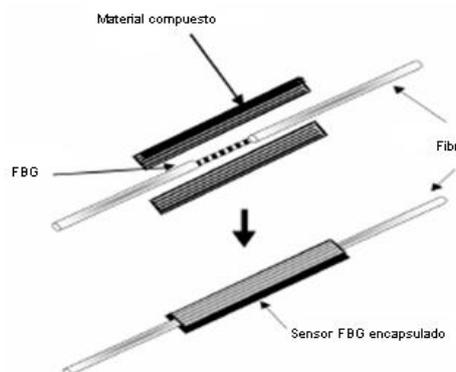


Fig. 3.99 Esquema de algunos encapsulados de sensores ópticos comerciales (Moyo et al. 2005).

Los resultados obtenidos muestran que los errores que se producen son muy superiores a los obtenidos con el modelo del sensor patentado por el ICITECH e ITEAM (Ap. 2.8.4.2). Por tanto, queda justificada la diferencia de resultados que se obtuvo durante las campañas experimentales (Ver Capítulo 3, apartado 3.7.2.3.3.). Ello es debido a que la existencia de una capa inferior de encapsulado supone un incremento en el gradiente de deformaciones generado. En este aspecto, supone una especial importancia el espesor de esta nueva capa.

La Figura 3.100 muestra el mallado empleado para modelizar el prototipo de un sensor óptico comercial.

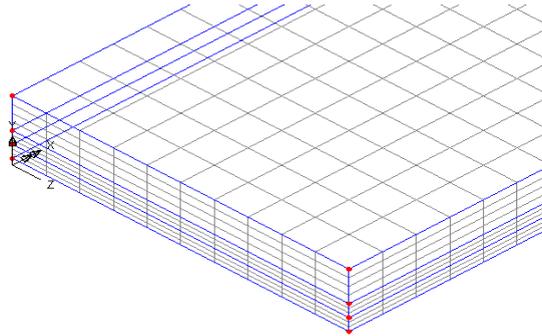


Fig. 3.100 Mallado empleado para modelizar un sensor óptico comercial.

La Figura 3.101 muestra el gradiente de deformaciones que se genera entre la superficie a monitorizar y la fibra óptica. Este gradiente es muy superior al obtenido mediante el sensor óptico ICITECH-ITEAM.

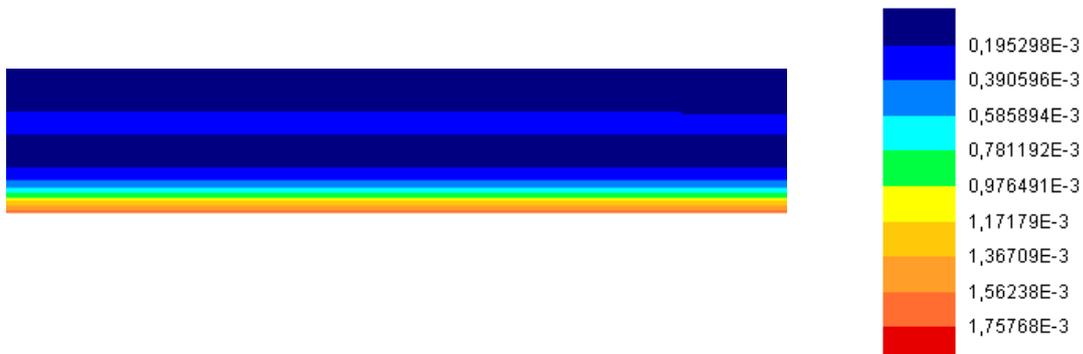


Fig. 3.101 Gradiente de deformaciones que se produce en la base inferior del sensor óptico comercial.
Sección transversal del encapsulado

En la Figura 3.102 se presenta el resultado obtenido. La comparativa entre los tipos de sensores indica un mejor comportamiento del sensor patentado por el ICITECH e ITEAM, frente a un sensor óptico comercial. El comportamiento del sensor óptico comercial se ha obtenido para un espesor de encapsulado inferior igual a 600 μm . Este parámetro resulta fundamental en el correcto comportamiento de los sensores ópticos comerciales, y por ello, se estudian diferentes espesores del mismo.

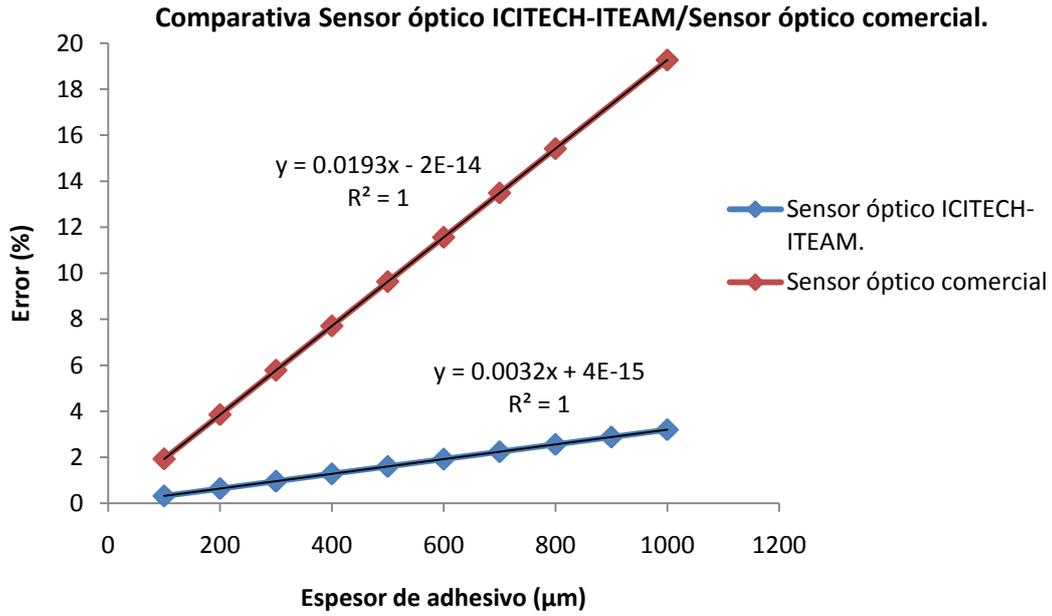


Fig. 3.102 Comparativa de la ley de errores de los sensores ópticos comerciales y el sensor óptico ICITECH-ITEAM. ($\nu=0.2$).

A medida que aumenta el espesor de la capa inferior del encapsulado el error crece considerablemente. Por este motivo, la capa inferior del encapsulado que se dispone en ciertos sensores comerciales suele ser de un espesor muy reducido. A pesar de ello, la existencia de esa capa inferior de encapsulado supone un aumento considerable del error, como se observa en las Figuras 3.102 y 3.103. En el caso del sensor óptico patentado por ICITECH e ITEAM, esta capa inferior es inexistente.

Comparativa y afección de la capa inferior de encapsulado.

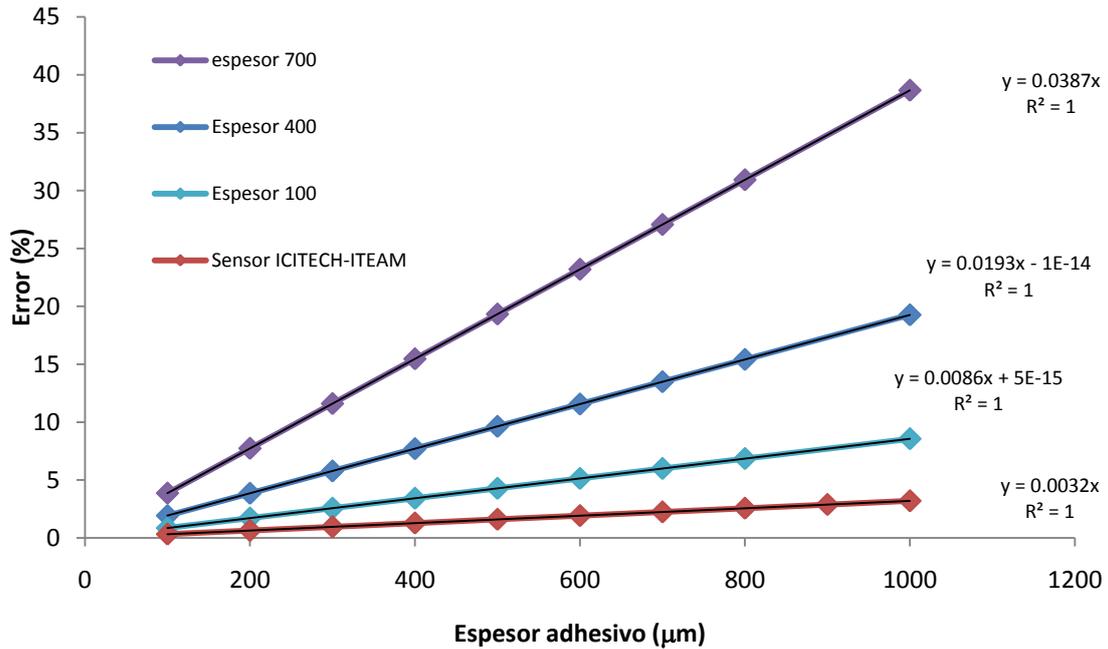


Fig. 3.103 Comparativa de la ley de errores de los sensores ópticos comerciales, con diferentes espesores de la capa inferior de encapsulado y el sensor óptico ICITECH-ITEAM

3.8.4.6 - Conclusiones relativas al modelo numérico.

Del modelo numérico procesado se han obtenido una serie de conclusiones claras:

- a) El sensor óptico patentado por el ICITECH e ITEAM presenta un buen comportamiento en cuanto a transferencia de deformaciones entre la superficie a monitorizar y la fibra óptica, elemento empleado como medio sensitivo. Esto se debe a la configuración adoptada del propio sensor. El error máximo que puede darse en la situación más desfavorable no supera un valor del 4%.
- b) Uno de los parámetros que juega un papel fundamental en el correcto funcionamiento del sensor óptico patentado por el ICITECH e ITEAM es el espesor de adhesivo empleado en el pegado del sensor. No obstante, se ha demostrado la robustez que presenta este sensor, puesto que para los espesores de adhesivo empleados con un control de ejecución normal, (400 μe aproximadamente), el error que se obtiene entre la deformación real de la superficie y de la fibra óptica es inferior a un 2%.
- c) En caso de darse un pegado deficiente, en el que el espesor de adhesivo resultara elevado, el error que se obtendría en cualquier caso resultaría ser inferior a un valor de 3,5%. En este caso, sería necesario alcanzarse un espesor de adhesivo de 1000 μm, tal y como indica la Figura 3.96. Este valor resulta muy elevado en este tipo de operaciones.
- d) El coeficiente de Poisson del material del adhesivo es otro parámetro que afecta a la correcta transferencia de deformaciones. Valores pequeños en este parámetro (del orden de 0,1) mejoran la transferencia de deformaciones, debido a que el valor del módulo de rigidez transversal G es superior. Por el contrario, a medida que aumenta el valor de este parámetro, disminuye el valor del coeficiente G de rigidez transversal, existiendo

- mayores errores en la transferencia de deformaciones, En la situación más desfavorable, el error máximo que puede alcanzarse no supera el valor de un 6.5%.
- e) El módulo de elasticidad del material que conforma el encapsulado, en principio no resulta un factor relevante en cuanto a la transferencia de deformaciones. Su influencia es relativamente baja, llegándose a alcanzar, dentro del rango de valores estimado, errores máximos de un 2%.
 - f) Los sensores ópticos comerciales que presentan una configuración como la de las Figura 3.98 y 3.99, ofrecen una peor transferencia de deformaciones entre el elemento a monitorizar y la fibra óptica. El error alcanzado depende fuertemente del espesor de adhesivo, pero sobre todo del espesor de la capa inferior de encapsulado, tal y como indica la Figura 3.102.
 - g) Se observa claramente una incidencia negativa de esta capa inferior del encapsulado, que es capaz de provocar errores de hasta un 15%, cuando los espesores de esta capa son del orden de 400 μm , como se observa en la Figura 3.103.

3.9 – Diseño de un sistema de monitorización y control de estructuras. Desarrollo de un software para la interrogación de sensores.

El Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITEAM) y el Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón (ICITECH) han desarrollado una aplicación para la interrogación de los sensores basados en FBG. El programa se ejecuta en un PC, estableciendo comunicación con un interrogador de sensores ópticos comercial y con un módem GSM.

El objetivo del programa es monitorizar los diferentes sensores ópticos que forman un sistema de sensores instalados en una estructura, entre las muchas posibilidades que nos ofrece el campo de la construcción.

Para ello, se ha dotado al programa de varias funciones que resultan interesantes para el control de los datos:

- a) Guardado automático de los datos que nos proporcionan los sensores a lo largo del tiempo.
- b) Visualización de esos datos en una gráfica temporal y visualización del espectro que generan estos sensores.
- c) Conversión a unidades monitorizadas: grados centígrados (para la temperatura) o microstrains (para la deformación).
- d) Posibilidad de definir unos umbrales que delimiten el correcto funcionamiento de la estructura.
- e) Envío de mensajes SMS cuando se dispare una alarma por superar estos umbrales.

La Figura 3.104 muestra una captura de la pantalla principal del programa, donde es posible definir los parámetros para detección del sensor, y otros valores que controlen la toma de datos.

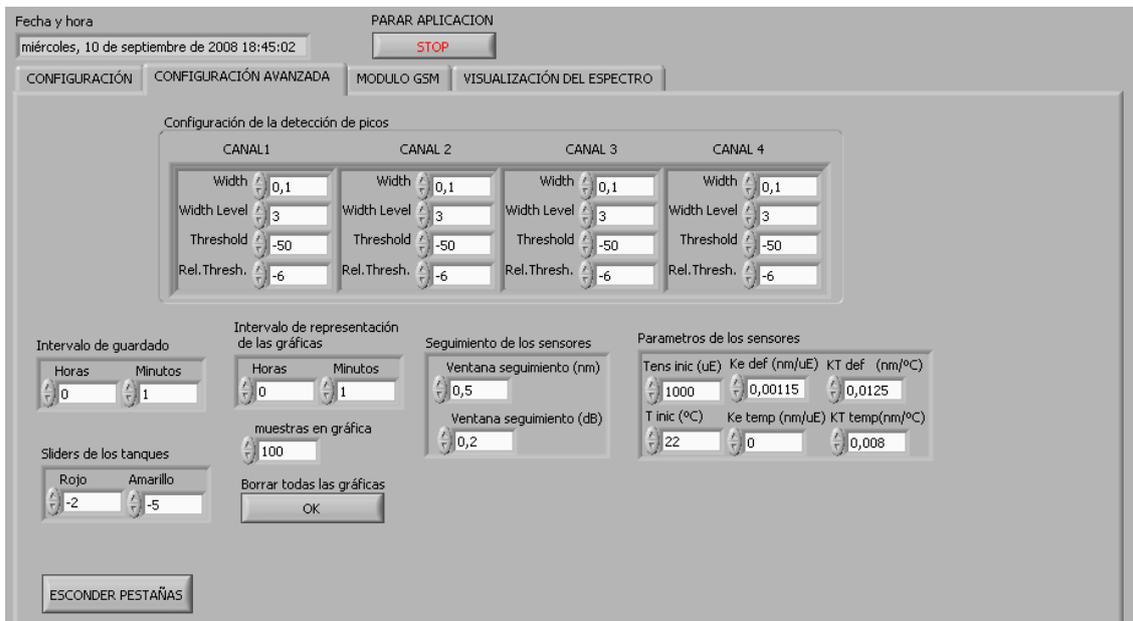


Fig. 3.104 Pantalla del software para programar la captura de datos.

La Figura 3.105 muestra la pantalla de visualización de los espectros en tiempo real.

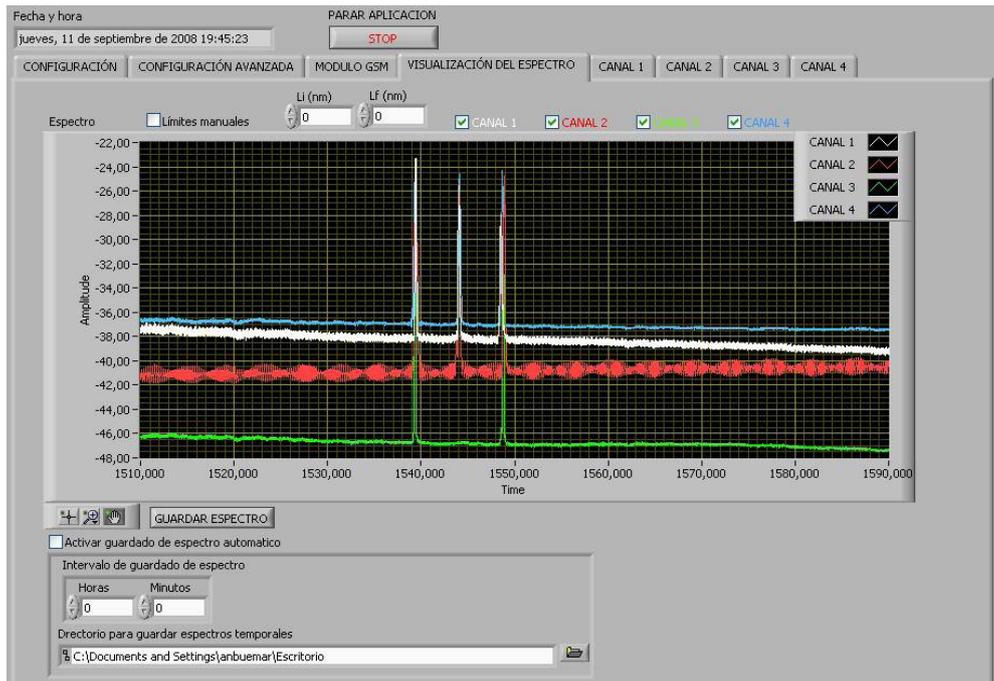


Fig. 3.105 Pantalla de visualización de los espectros en tiempo real..

La Figura 3.106 nos muestra la pantalla de deformaciones y temperaturas, donde es posible seguir la evolución del parámetro monitorizado, y observar en tiempo real si se supera algún umbral que marca el límite de funcionamiento correcto de la estructura.

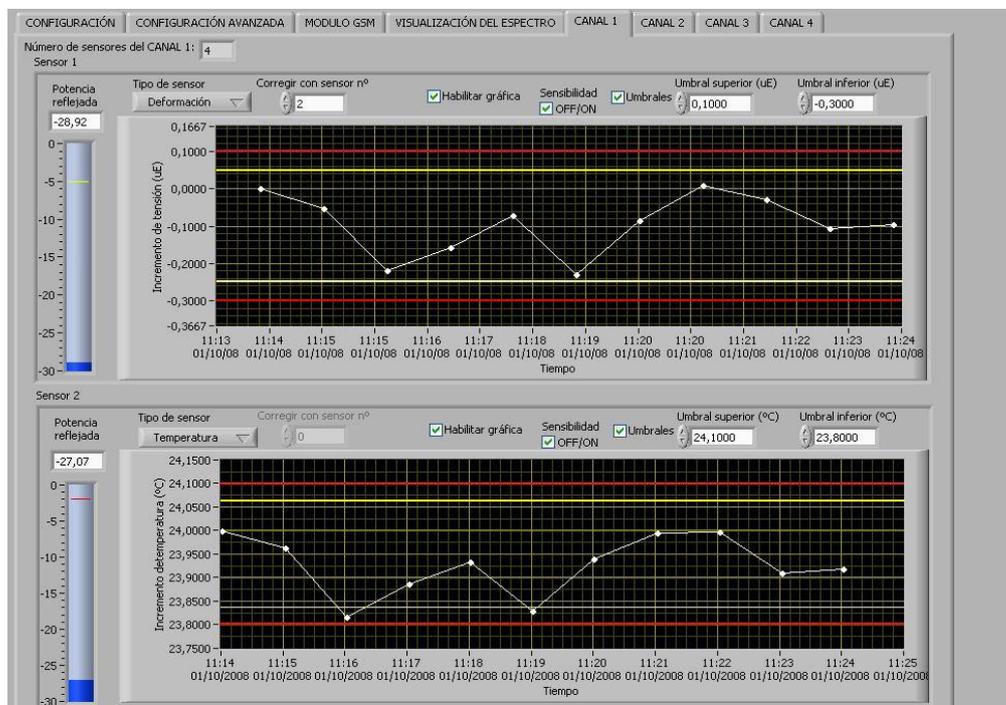


Fig. 3.106 Pantalla donde se observa el valor de las deformaciones y temperaturas, con los umbrales límites de funcionamiento.

3.10 - Aplicación a obras reales.

En el siguiente apartado se muestran las diferentes aplicaciones de los sensores ópticos que los Institutos ICITECH-ITEAM han llevado a cabo en diversas obras pertenecientes a la empresa constructora Sacyr-Vallehermoso. Estas aplicaciones se han llevado a cabo dentro del marco del proyecto de investigación “Desarrollo de sensores ópticos aplicados a la instrumentación de estructuras para conocimiento de su comportamiento en tiempo real”.

3.10.1-Medida de las deformaciones en las losas postesas que forman las terminales de pasajeros del nuevo aeropuerto de Murcia.

Las estructuras que forman las terminales de pasajeros del nuevo aeropuerto de Murcia consisten en losas postesas de hormigón armado con tesado bidireccional, apoyadas sobre una serie de pilares, que arrancan de una losa de cimentación. La estructura presenta dos pisos de altura. Una imagen de una de las losas se muestra en la Figura 3.107.



Fig. 3.107 Imagen de una de las losas postesas en el Aeropuerto de Murcia.

Los sensores ópticos fueron instalados en las caras superiores e inferiores de estas losas (Figura 3.108). La ubicación de los mismos en la cara superior fue en ejes de pilares, mientras que en la cara inferior los sensores se instalaron en los puntos medios entre pilares. El objetivo de la instalación de los sensores ópticos era controlar las deformaciones que sufre la losa durante la operación de tesado.

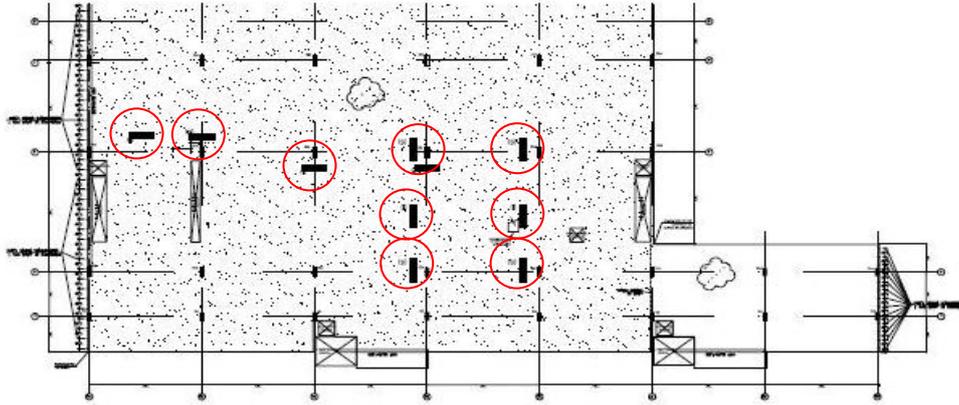


Fig. 3.108 Plano de ubicación de algunos sensores ópticos en la losa postesa.

En la instalación fue necesaria la protección de los sensores (Figura 3.109), dada la elevada probabilidad de rotura de los mismos, debido a la existencia de un gran número de tajos superpuestos.



Fig. 3.109 Protecciones adoptadas para el sensor óptico.

La monitorización se llevó a cabo durante los días 17, 18, 19 de Noviembre de 2008, y durante los días 16, 17 y 18 de Marzo. Los resultados obtenidos muestran las deformaciones que sufre el hormigón durante la operación de tesado, que se produce en ambas direcciones.

La monitorización se llevó a cabo ininterrumpidamente durante los 6 días de maniobra. Las Figuras 3.110 y 3.111 indican las leyes de deformaciones que se producen en los sensores. El comportamiento general que indican son compresiones en los sensores, y muy pequeñas tracciones en alguno de los sensores. Existen zonas que durante la acción del gato no sufren deformaciones, puesto que el área tributaria de acción de los gatos no les influye (Figura 3.112)

Los resultados vuelven a poner de manifiesto que las losas postesas pueden estar totalmente comprimidas o sufrir pequeñas tracciones. Las tracciones vienen originadas en puntos cercanos a la acción del gato hidráulico de tesar, y en dirección ortogonal al mismo. Las compresiones tienen lugar normalmente, en puntos donde los sensores llevan la misma dirección que el gato de tesar.

Los resultados indican que el hormigón de las losas se encuentra trabajando en su régimen elástico y lineal, con deformaciones muy inferiores a la máxima de rotura.

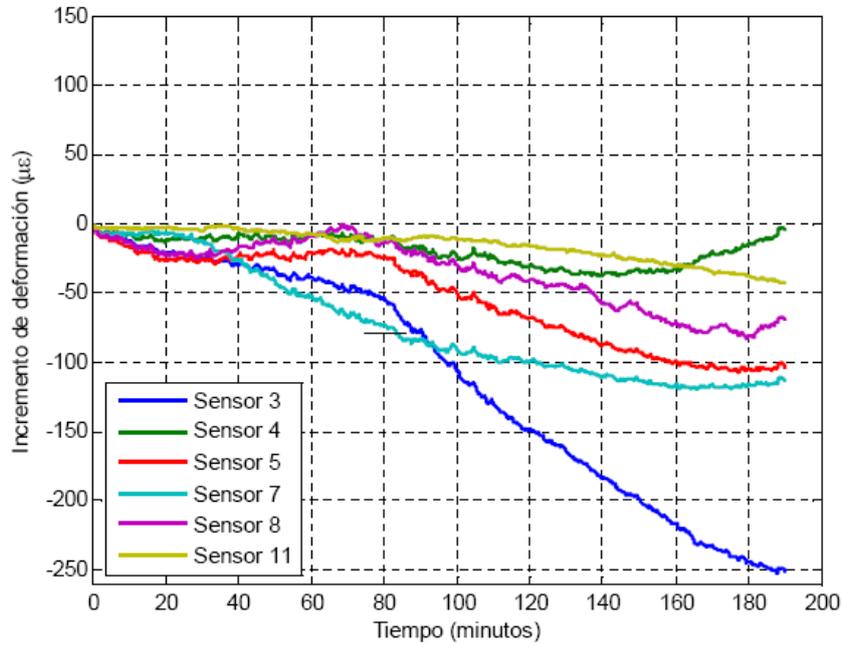


Fig. 3.100 Leyes de deformaciones en función del tiempo de los sensores ópticos.

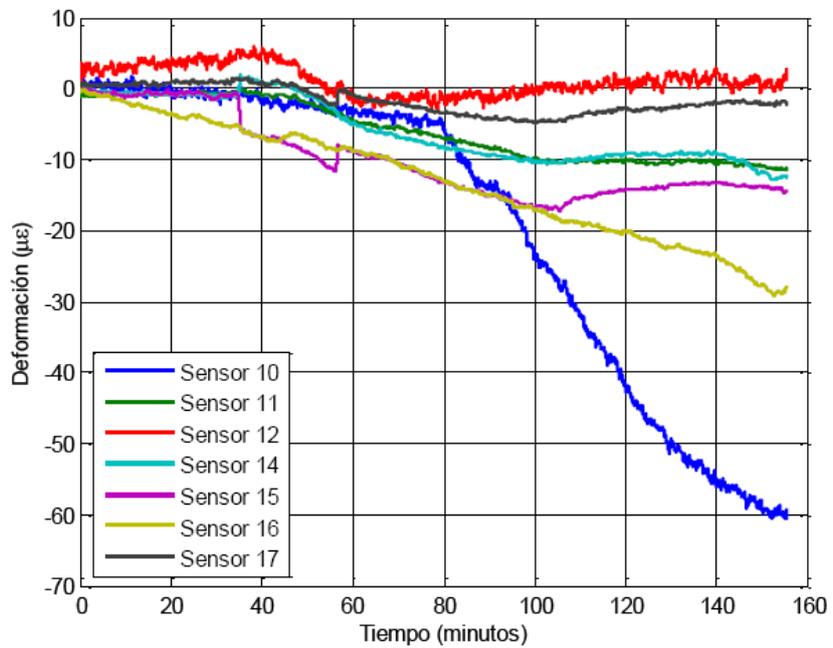


Fig. 3.111 Leyes de deformaciones en función del tiempo de los sensores ópticos.

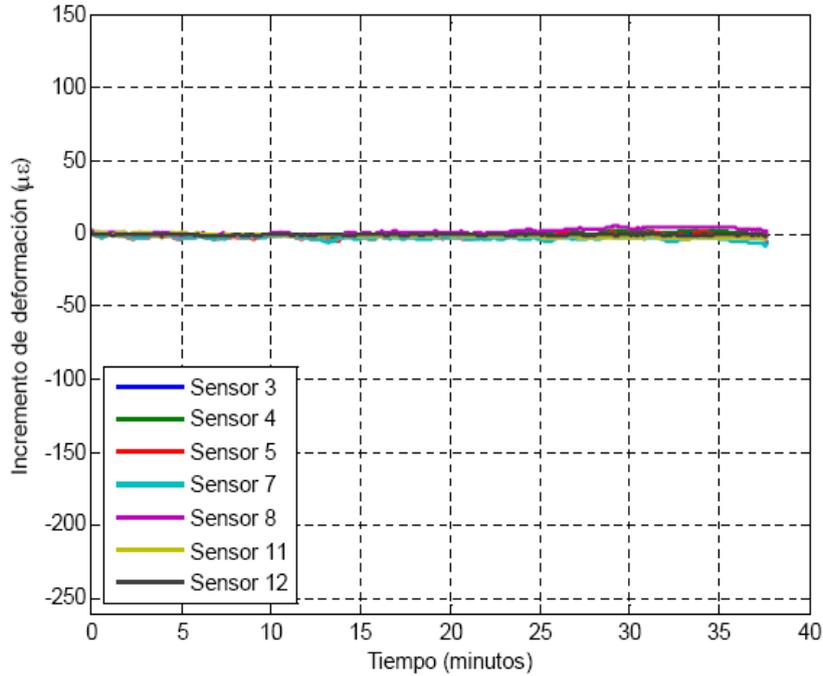


Fig. 3.112 Leyes de deformaciones en función del tiempo de los sensores ópticos.

3.10.2-Medida de la evolución de temperaturas en un encepado de un puente atirantado en la Ronda Sur de Talavera de la Reina (Toledo).

Con el objeto de controlar la fisuración debida a gradientes térmicos elevados, se lleva a cabo la instalación de sensores ópticos embebidos en el hormigón de un encepado de pilotes, que sustenta una de las pila de un puente.

El encepado tiene forma cúbica, con unas dimensiones en planta de 11 por 7 metros y un canto de 3 metros. Se instalan dos sensores ópticos en su interior, y un tercero en el exterior para medir la evolución de la temperatura ambiente (Figura 3.113). Los sensores embebidos en el hormigón se colocan en el centro de gravedad del encepado, y a 15 cm de uno de los paramentos laterales, que permanece encofrado.

La monitorización se inicia en el mismo instante que la operación de hormigonado, y se prolonga durante los próximos 3 días. Los resultados de los sensores ópticos son comparados con un sistema eléctrico convencional conocido como CHARI (Control de Hormigonado de Alta Resistencia Inicial).



Fig. 3.113 Imágenes de los sensores ópticos instalados en el interior del encepado (a) y encargado de medir la temperatura ambiente (3).

Los resultados obtenidos de la temperatura interna y la comparativa con el sistema eléctrico convencional CHARI se muestran en la Figura 3.114.

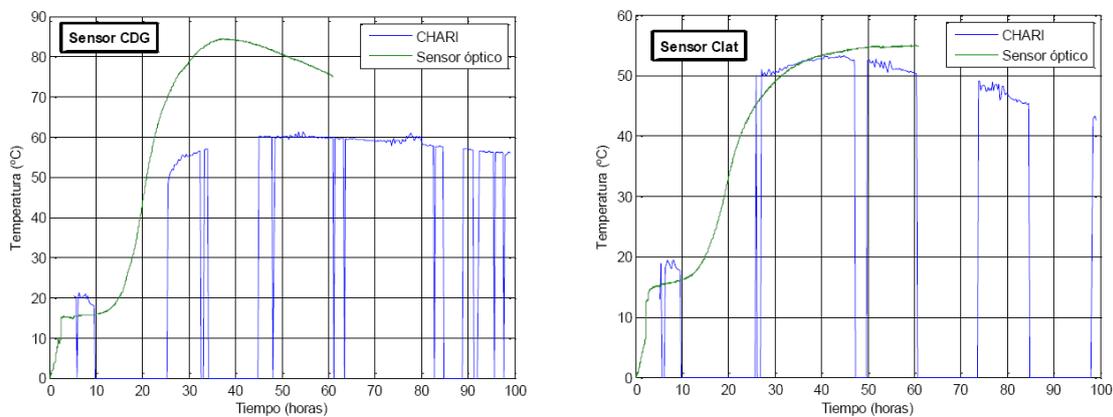


Fig. 3.114 Comparativa de la evolución de la temperatura Sensor óptico-Chari en el centro de gravedad y en el lateral del encepado.

Se observa una importante pérdida de datos (saltos bruscos y repentinos en la evolución de la curva azul) por parte del sistema CHARI. Esta pérdida de datos dificulta la interpretación de la evolución de la temperatura en el interior del encepado de hormigón, además de poner en duda la fiabilidad del sistema que en un momento determinado, deja de proporcionar datos (Figuras 3.114 y 3.115).

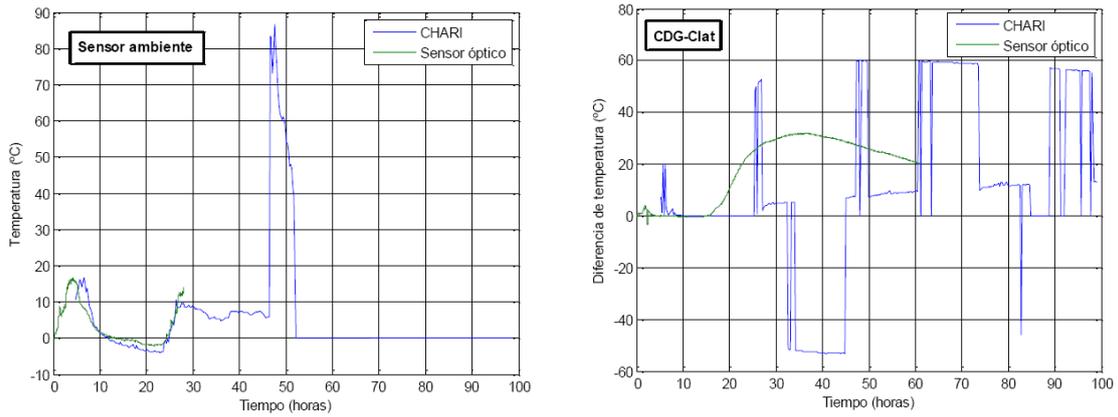


Fig. 3.115 Evolución de la temperatura ambiente y gradiente existente entre el centro de gravedad y el paramento lateral.

Sin embargo, los resultados de los sensores ópticos describen curvas limpias, sin interrupciones y con valores similares a otros resultados que se han obtenido en obras similares (Figuras 3.116 y 3.117).

Estas figuras muestran la evolución de temperaturas en el hormigón que forman las losas de dos obras diferentes. Las curvas describen una tendencia similar en todas ellas, en las que la temperatura sufre un incremento importante durante las primeras 24 horas. Las temperaturas máximas alcanzadas son próximas a 90°C, y se alcanzan a las 24 horas de comenzada la monitorización aproximadamente. A las 72 horas aproximadamente, las temperaturas tienden a un mismo valor próximo a los 50°C.

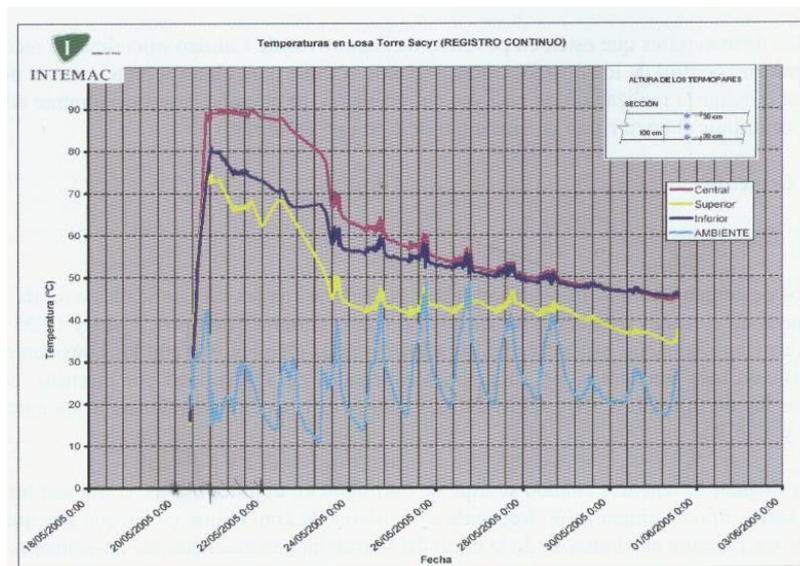


Fig. 3.116 Evolución de temperaturas en una losa de la Torre Sacyr Vallehermoso durante su construcción. (Hermoso et al.2008)

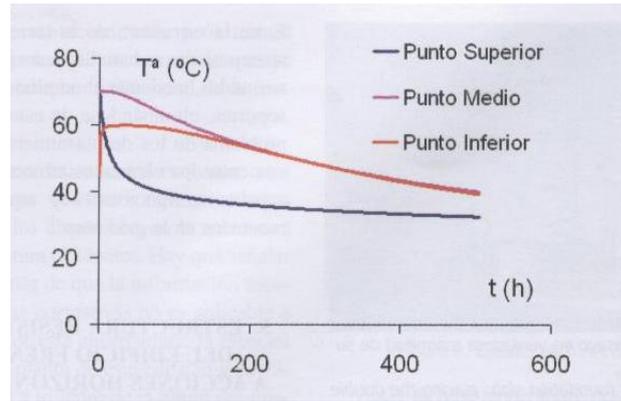


Fig. 3.117 Evolución de temperaturas en una losa de hormigón. Torre Espacio (Calzón et al 1008)

3.10.3-Medida de las deformaciones en el cajón metálico de la variante Sur metropolitana de Alonsotegui (Bilbao).

El objeto de este trabajo es el de monitorizar las deformaciones que se producen en las diferentes secciones de un cajón metálico que forma la variante sur metropolitana a su paso por Alonsotegui (Figura 3.118) durante su lanzamiento.

La instalación de los sensores ópticos se lleva a cabo en 5 secciones transversales diferentes, multiplexando los sensores dentro de una misma sección transversal, de modo que con un único cable de fibra óptica es posible la instrumentación de los diferentes sensores (Figura 3.119).



Fig. 3.118 Vista del cajón metálico que formará la variante Sur Metropolitana de Bilbao.

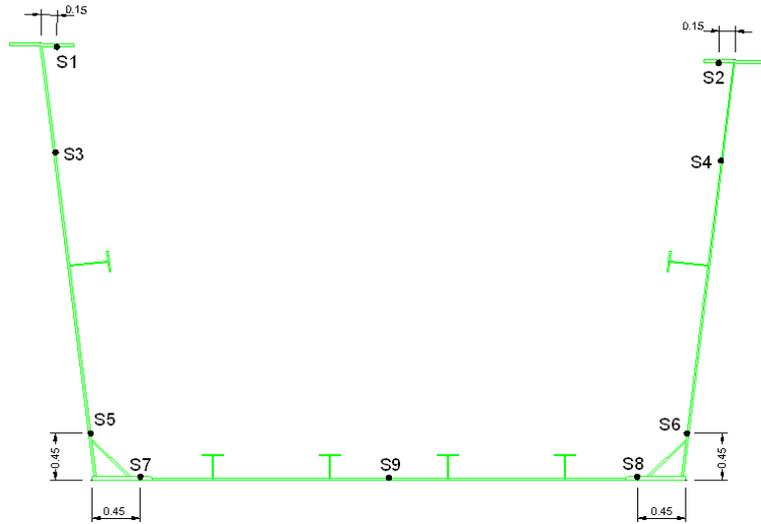


Fig. 3.119 Ubicación de los sensores ópticos dentro de la sección transversal del cajón.

La monitorización se lleva a cabo durante el mes de Agosto de 2009, ininterrumpidamente durante todo el lanzamiento del cajón metálico (Figura 3.120).

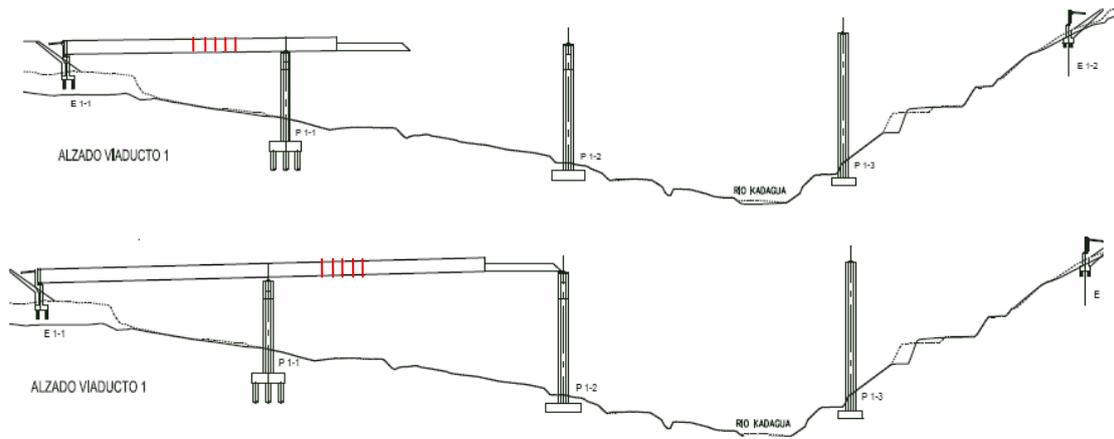


Fig. 3.120 Lanzamiento del cajón metálico, hasta apoyo de la nariz en la pila. En color se muestran las secciones instrumentadas.

Se obtienen las leyes de deformaciones de las secciones donde se han instalado los sensores ópticos (Figura 3.121).

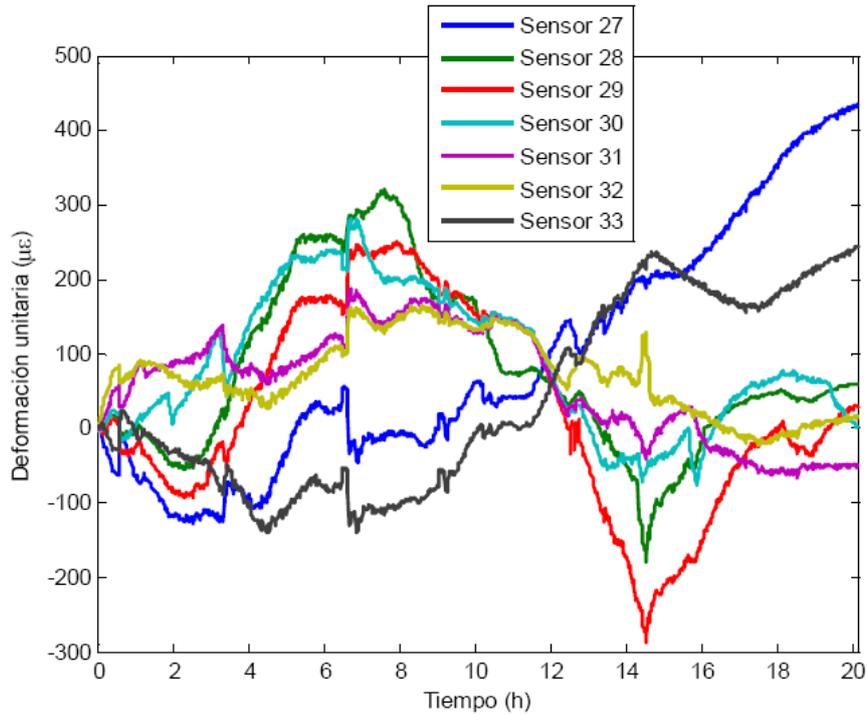


Fig. 3.121 Leyes de deformaciones en función del tiempo en la sección 1 del cajón metálico.

Las curvas de deformaciones de la Figura 3.121 muestran que inicialmente los sensores de las alas superiores del cajón (sensor 27 y 33) presentan compresiones, con un valor máximo de $100 \mu\epsilon$ (Instante en que el cajón se encuentra biapoyado). La deformación que indican estos mismos sensores cambia a valores de tracción, con un valor máximo de $400 \mu\epsilon$, a medida que avanza el lanzamiento (Instante en que la sección se aproxima a la pila). Por el contrario, los sensores que se encuentran en la cara inferior del cajón (28, 29, 30, 31 y 32) muestran inicialmente tracciones, con un valor máximo de $300 \mu\epsilon$. Posteriormente, cuando esta sección llega a pila, se invierte el signo de las deformaciones, pasando ahora a ser compresiones (alrededor de la hora 14).

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y PROPUESTA DE NUEVAS INVESTIGACIONES.

Esta Tesina de Máster muestra el desarrollo de un sensor de fibra óptica y de un sistema de monitorización y control de estructuras de hormigón y acero, para su posterior aplicación a obras reales. A partir del trabajo realizado, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

4.1-Conclusiones relativas al Estado del Arte.

- a) El interés por conocer el comportamiento real de las estructuras es un aspecto que existe desde muchos años atrás. En España, el ingeniero Eduardo Torroja es considerado como el gran pionero de la instrumentación estructural al instrumentar sus obras en los años 30 del siglo pasado.
- b) Actualmente, se ha registrado un aumento del número de fallos en estructuras que tienen lugar durante las fases de uso y conservación (21%). Además, la concentración de estos fallos tiene lugar en construcciones cuya antigüedad supera los 10 años (31%).
- c) Existen multitud de técnicas que permiten obtener información de la estructura monitorizada. Algunas de ellas resultan interesantes para determinadas aplicaciones, pero los resultados que proporcionan se ven claramente afectados por diferentes factores tales como el entorno, las vibraciones, la temperatura, las condiciones ambientales o las radiaciones electromagnéticas.
- d) Tras la revisión bibliográfica realizada, se concluye que existe la necesidad de desarrollar un sistema de medición de deformaciones, que aventaje al resto de técnicas, y ofrezca más garantías y fiabilidad en cuanto a la obtención de resultados.
- e) Durante los últimos 10 años, las investigaciones sobre el desarrollo de un sensor óptico de deformación que presente un buen comportamiento frente a variaciones térmicas son escasas. Sin embargo, este aspecto es fundamental en todo sistema óptico de sensado.
- f) Los sensores espectrométricos de la tipología Bragg-Grating son los más empleados en la actualidad, debido a su simplicidad de funcionamiento y mejores prestaciones que el resto.

4.2-Conclusiones relativas a la fase experimental.

- a) Se ha obtenido un encapsulado para el sensor óptico consistente en una base de fibra de vidrio tratada con resina de poliéster sobre la que descansa la fibra óptica. Este encapsulado resulta flexible, ligero y de muy poco espesor, pero resistente frente a golpes y caídas.
- b) Con la configuración propuesta, la fibra óptica se encuentra en contacto con la superficie a monitorizar, permitiendo una buena transferencia de deformaciones entre ambos elementos.
- c) La calibración del sensor óptico se obtiene imponiendo una deformación conocida mediante un sistema de posicionamiento milimétrico, y registrando las variaciones de longitud de onda reflejada. Este coeficiente resulta ser $1,15 \text{ pm}/\mu\epsilon$.
- d) Con esta calibración, las pruebas experimentales sobre probetas de hormigón y metálicas han ofrecido resultados muy satisfactorios.
- e) La comparativa entre el sensor óptico desarrollado por el ICITECH-ITEAM y los sensores ópticos comerciales ha mostrado resultados muy interesantes. La configuración del sensor óptico patentado por el ICITECH e ITEAM permite una mayor proximidad entre la fibra óptica y la superficie del elemento a monitorizar. Por este motivo, las deformaciones obtenidas han mostrado mejores resultados que las obtenidos con los sensores comerciales.
- f) De un modo análogo, se propone un encapsulado para el sensor de temperatura. La calibración de éste se ha llevado a cabo con temperatura ambiente y con cámara climática. El coeficiente de sensibilidad obtenido es de $9 \text{ pm}/^\circ\text{C}$.
- g) También se ha calibrado los sensores de deformación frente a variaciones térmicas. Los coeficientes de sensibilidad del sensor en hormigón y acero son, respectivamente 17.5 y $20.5 \text{ pm}/^\circ\text{C}$.
- h) Es imprescindible llevar a cabo la compensación térmica en el sensado óptico mediante la formulación propuesta en el apartado 3.7.2.9. Su aplicación exige la obtención de los coeficientes obtenidos en el apartado 3.7.2.7.
- i) Las variaciones térmicas sobre la fibra óptica influyen en dos factores (ecuación 3.16). Uno de ellos es la variación del índice de refracción de la fibra óptica ($5 \cdot 10^{-6} - 9 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/\text{K}$) y el otro es la variación del coeficiente de expansión térmica del material que forma la fibra óptica, en este caso, la sílice ($0.55 \cdot 10^{-6} \text{ } 1/\text{K}$). Este último miembro es despreciable frente al primero.
- j) Cuando la fibra óptica está en contacto con la superficie a monitorizar, la variación del coeficiente de dilatación térmica ya no es despreciable puesto que ahora juega un papel importante el coeficiente de dilatación térmica del material que forma la superficie.
- k) Este motivo ha sido fuente de multitud de errores en la aplicación de la compensación térmica. Aquí radica la importancia de la correcta calibración de los coeficientes de sensibilidad.
- l) El sensor óptico patentado por el ICITECH e ITEAM se ha embebido en probetas de hormigón, y sus resultados han resultado muy satisfactorios para la medida de deformaciones a largo plazo.
- m) Cuando el nivel de deformaciones en el hormigón es elevado (60-70% de la deformación última) el espectro del sensor empieza a sufrir distorsiones en su forma y

- caídas de potencia repentinas. Esto es otro indicativo del estado de deformaciones interno del hormigón.
- n) Una aplicación que resulta muy interesante es el desarrollo de sensores ópticos para medir retracciones a edades muy tempranas. En este aspecto, los sensores ópticos presentan grandes ventajas frente a los sistemas eléctricos. Actualmente, se está trabajando para comparar los resultados de los sensores ópticos con técnicas fiables que nos permitan comparar y validar resultados.
 - o) Se han embebido sensores ópticos de temperatura en el interior del hormigón para controlar la evolución de la temperatura interna durante el fraguado del mismo. Los resultados obtenidos han sido muy satisfactorios.
 - p) También se han empleado estos sensores ópticos para medir deformaciones en una armadura de una estructura de hormigón armado. Los resultados obtenidos no han podido ser comparados con las galgas empleadas para tal fin, porque los datos captados por éstas han sido incorrectos, debido a una deficiente conexión entre los elementos del sistema de adquisición de datos.
 - q) Es importante destacar el buen comportamiento de los sensores ópticos frente a las condiciones climatológicas adversas. Este tipo de sensor pertenece a la tipología de los espectométricos, cuyo punto más importante consiste en mantener la forma del espectro de luz, y medir variaciones que experimenta el máximo de reflectividad. Este aspecto ha sido conseguido, y es importante destacar el buen comportamiento que ha ofrecido el sensor, incluso estando sometido a la acción directa de agentes climatológicos como son el agua, sol o viento. Se puede observar que la forma del espectro apenas sufre distorsión (Figura 3.65 y Figura 3.118).
 - r) El proceso de pegado del sensor sobre la estructura es crítico. Se debe asegurar un espesor de adhesivo lo suficientemente pequeño para la correcta transferencia de deformaciones. En este sentido, el apartado 4.3 presenta las conclusiones de la fase numérica, que siguen mostrando la robustez y bondad de este sensor óptico.
 - s) Uno de los puntos clave para el sensado óptico es una correcta protección durante la construcción y posterior uso. Los sistemas ópticos de medida a base de fibra óptica son muy frágiles y en caso de rotura de la fibra óptica, la reparación es costosa y complicada de ejecutar en obra.
 - t) Otro aspecto fundamental para el buen funcionamiento de un sistema óptico de medida es cuidar la limpieza de la zona donde se realiza la instalación.

4.3-Conclusiones relativas a la fase numérica.

- a) Se ha llevado a cabo un estudio numérico modelando el sensor óptico patentado por el ICITECH e ITEAM, y se ha realizado un estudio de sensibilidad de una serie de parámetros que influyen sobre el comportamiento del mismo.
- b) Para cuantificar el comportamiento del sensor se ha definido un error, como la diferencia en porcentaje de las deformaciones de la superficie a monitorizar y las deformaciones que capta la fibra óptica.
- c) El sensor óptico patentado por el ICITECH e ITEAM presenta un buen comportamiento en cuanto a transferencia de deformaciones entre la superficie a monitorizar y la fibra óptica, elemento empleado como medio sensitivo. Esto se debe a la configuración

adoptada del propio sensor. El error máximo que puede darse en la situación más desfavorable no supera un valor del 4%.

- d) El espesor de adhesivo empleado es un factor que influye sobre el comportamiento del sensor. A menor espesor de adhesivo, el error que se obtiene es menor. A pesar de que la operación de pegado es un proceso manual, hay que intentar conseguir un espesor lo suficientemente pequeño como para que el error sea asumible.
- e) Los espesores con los que se trabaja en este tipo de operaciones suele tener un valor aproximado de 400 μ m (Figura 3.97). Para este espesor el error que se obtiene se encuentra acotado y presenta un valor aproximado de 1.5%.
- f) En caso de darse un pegado deficiente, en el que el espesor de adhesivo resultara elevado, el error que se obtendría en cualquier caso resultaría ser inferior a un valor de 3,5%. En este caso, sería necesario alcanzarse un espesor de adhesivo de 1000 μ m, valor que resulta muy elevado en este tipo de operaciones.
- g) El coeficiente de Poisson es otro factor que afecta sobre el comportamiento del sensor. La Figura 3.100 muestra que en el caso más desfavorable, el error obtenido no sobrepasa el valor de 3%.
- h) Los sensores ópticos comerciales que presentan una configuración como la de las Figura 3.102 y 3.103, ofrecen una peor transferencia de deformaciones entre el elemento a monitorizar y la fibra óptica. El error alcanzado depende fuertemente del espesor de adhesivo, pero sobre todo del espesor de la capa inferior de encapsulado, tal y como indica la Figura 3.107.
- i) Se observa claramente una incidencia negativa de esta capa inferior del encapsulado, que es capaz de provocar errores de hasta un 15%, cuando los espesores de esta capa son del orden de 400 μ m.
- j) La proximidad de la fibra óptica a la superficie a monitorizar es un aspecto que ha preocupado a los investigadores. Algunos de ellos proponen expresiones para corregir el error que se deriva de esta situación. Alguna expresión usualmente empleada ha sido la que propone Kleckers y Günther (2007):

$$\varepsilon_{OF} = \frac{0.5 h}{0.5 h + d} \varepsilon_{ANZ} \quad (4.1)$$

Siendo:

- ε_{OF} deformación de la superficie de la pieza.
- ε_{ANZ} dilatación medida por la fibra.
- h espesor de la pieza.
- d Distancia entre la fibra y la superficie de la pieza.

Según el sensor óptico desarrollado por el ICITECH-ITEAM, la distancia ente la fibra y la superficie de la pieza es prácticamente nula:

$$\lim_{d \rightarrow 0} \varepsilon_{OF} = \lim_{\substack{d \rightarrow 0 \\ [d] \rightarrow 0}} \frac{0.5 h}{0.5 h + d} \varepsilon_{ANZ} = \varepsilon_{ANZ} \quad (4.2)$$

Por este motivo, las medidas obtenidas con los sensores ópticos ICITECH-ITEAM presentan mayor exactitud.

4.4-Propuestas de nuevas investigaciones.

El desarrollo de la presente Tesina de Máster ha mostrado la necesidad de realizar nuevas investigaciones relacionadas con el comportamiento de los sensores ópticos y nuevos encapsulados para otras aplicaciones. Posibles futuras líneas de investigación podrían ser:

- a) Desarrollo de un sensor capaz de medir la retracción del hormigón a edades muy tempranas. Tal y como se ha comentado en el capítulo 3, ya se han realizado unos primeros ensayos en esta línea con resultados satisfactorios pero es necesario desarrollar aún más esta línea.
- b) Es necesario repetir los ensayos descritos en el apartado 3.7.2.13. Los resultados no han podido ser comparados con los que ofrecen las galgas, debido a que éstos no han sido captados correctamente, arrojando valores absurdos.
- c) Es interesante el estudio y desarrollo de un sensor óptico autocompensado en una sola fibra. Un sensor óptico autocompensado es aquél que engloba el sensor de deformación y de temperatura en uno solo. El hecho de estar en una sola fibra supone una mayor simplicidad para planificar la estrategia de monitorización. Las ventajas que puede aportar este nuevo diseño son importantes, sobre todo en cuanto a ahorro de cableado de instalación.
- d) Una aplicación interesante sería el desarrollo de un sensor capaz de medir aberturas de fisuras en el hormigón. Para este caso concreto, los sensores ópticos más apropiados no son los Bragg-Grating, sino otra tipología de sensores, en este caso, sensores distribuidos tipo *Raman* y *Brillouin Scattering*.
- e) Otra aplicación que se está llevando a cabo es el desarrollo de sensores de altas temperaturas para su aplicación en estructuras de hormigón. Este tipo de sensores se consiguen mediante el empleo de Fibras de Cristal Fotónico (PCF, Photonics Crystal Fiber) y gracias a la microestructuración interna de la fibra, se consiguen propiedades ópticas que permiten el desarrollo de sensores de compuestos químicos, de tensión o de temperatura, llegando a resistir temperaturas superiores a 1000°C. Estos ensayos serán llevados a cabo próximamente.
- f) Otra aplicación interesante sería la monitorización completa de una estructura desde sus primeras etapas de construcción y extendida también a su fase de uso. Así, se podrían conocer las solicitaciones a las que está sometida la estructura y, por tanto, su nivel de seguridad. Como se ha observado a lo largo de este trabajo, las prestaciones que ofrece la tecnología óptica para este tipo de aplicaciones son muy buenas.

REFERENCIAS.

ACI 440.1R-06. Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars. Reported by ACI Committee 440.

Adam J; Ivorra S; Pallares F; Giménez E; Calderón P; (2009). Axially loaded RC columns strengthened by steel caging. Structures and Buildings.(ISSN 0965-0911). Vol 162. (199-208). 2009.

Allan CL Wong; Paul A Childs; Richard Berndt; Tony Macken; Gang-Ding Peng; Nadarajah Gowripalan. (2007). Simultaneous measurement of shrinkage and temperature of reactive powder concrete at early-age using fibre Bragg grating sensors. Cement & Concrete Composites 29 (2007) 490–497.

Ansari F. State of the Art in the application of fiber optic sensor to cementitious composites. Cement & Concrete composites. Vol 19. Nº 1. (3-19). 2007.

Antuña J 2002. “Las estructuras de edificación de Eduardo Torroja Miret”. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain. In Spanish. Disponible en la página web <http://oa.upm.es>.

Azenha M. Identification of early-age concrete temperatures and strains: Monitoring and numerical simulation. Cement Concrete Comp (2009), Article in press. 2009.03.004.

Babei K. Evaluation of Hall-Cell Corrosion Detection Test for Concrete Bridge Decks. Washington State Transportation Centre, University of Washington, Seattle (2003).

Baifeng JI; Weilian QU. The Research of Acoustic Emission Techniques for Non Destructive Testing and Health Monitoring on Civil Engineering Structures. 2008 International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-24, 2008.

Barbachi M. Comportement de Capteurs a fibres optiques noyes dans un materiau diversement sollicité. Applications en Génie Civil. Laboratoire Central des Ponts et Chaussés, paris. (1996).

Barrera D. Diseño de sensores ópticos avanzados basados en FBG. Diploma de Estudios Avanzados (DEA). Universidad Politécnica de Valencia. Septiembre 2008.

Barrera D.; Silvestre C.; Cruz M.; García-Olcina R.; Sales S.; Development of a Multi-Point Multi-Parametric Sensor for Structural Health Monitoring. Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (ITEAM) 2008.

Billinton, David P. *The Tower and the Bridge: The new Art of Structural engineering*. Princeton University Press (1985).

Braunstein J; Ruchala J; Hodac B. *Smart Structures: fiber-optic deformation and displacement monitoring*. Osmos (Germany). *Proceeding of First International Conference on Bridge, Safety and Management, IABMAS*. Barcelona, CD-Rom (2002).

Calavera J. (2005). *Patología de estructuras de Hormigón Armado y Pretensado*. Vol II. INTEMAC, Madrid.

Calderón P; Adam J; Ivorra S; Pallares F; Giménez E. (2009). *Design strength of axially loaded RC columns strengthened by steel caging*. *Material & Design* (ISSN 0261-3069). Vol 30. (4069-4080). 2009.

Carosena M. (2006). *Infrared thermography of masonry structures*. Department of Energetics, Taiwan.

Casas JR (2006). *Monitorización de la corrosión en estructuras postensadas mediante sensores de fibra óptica*. Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería de la Construcción. Marzo, 2006.

Clark MR; McCann DM; Forde MC; (2003). *Application of infrared thermography to the nondestructive testing of concrete and masonry bridges*. *The King's Buildings*, Edinburgh, 2003.

Culshaw B. *The radio and electronic engineer Journal*. Vol 52 n°6. Pp 283. (1982).

Davis MA; Bellemore DG; Kersey AD; *Distributed Fiber Bragg Grating strain sensing in reinforced concrete structural components*. *Cement & Concrete Composites*. Vol 19. N°1. Pp 45-48 (1997).

Del GrosO A; Lanata F; Bruneti G; Pieracci A (2007). *Structural Health Monitoring of Harbour Piers*. *The 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure Vancouver, British Columbia, Canada November 13-16, 2007*.

Del Grosso A; Inaudi D; Bergmeister K; Santa U; *Monitoring of Bridges and Concrete Structures with Fibre Optic Sensors in Europe*. Smartec S.A. Manno, Switzerland (2000).

Del Grosso A; Inaudi D. *European Perspective on Monitoring-Based Maintenance*. IABMAS '04, *International Association for Bridge Maintenance and Safety*, October 19-22, Kyoto, Japan Page 1 of 5.

Eldukair ZA; Ayyub BM (1991). "Analysis of recent U.S. structural and construction failures", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 5(1), 57-73.

Elemente Reference Manual. Lusas Version 14. Issue 2. (2007).

Enckell M. (2007) Royal Institute of Technology (KTH), Sweden. Structural Health Monitoring of Bridges in Sweden. The 3rd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure Vancouver, British Columbia, Canada November 13-16, 2007.

Epaarachchi DC; Stewart MG; Rosowsky DV (2002). "Structural reliability of multistory buildings during construction", *Structural Engineering*, 128(2), 205-213.

Exequiel R; Analía V; Propiedades mecánicas de materiales compuestos con fibras naturales obtenidos mediante la técnica de Vacum Infusión. Jornadas SAM/CONAMET/SIMPOSIO MATERIA 2003.

Feld J; Carper K (1997). "Construction Failure", John Wiley and Sons.

Fraille J; García P. (1987). Instrumentación aplicada a la Ingeniería. Transductores y medidas mecánicas. Cátedra de Electrotecnia. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Madrid.

Frias C; Frazão O; Tavares O; Vieira A; Marques AT; Simões J; Mechanical characterization of bone cement using fiber Bragg grating sensors. *Materials and Design* 30 (2009) 1841–1844.

Gangopadhyay TK; Mousumi Majumder; Ashim Kumar Chakraborty; Asok Kumar Dikshit; Dipak Kumar Bhattacharya. Fibre Bragg grating strain sensor and study of its packaging material for use in critical analysis on steel structure. *Sensors and Actuators A* 150 (2009) 78–86.

Gasch I; Estudio Experimental de Sensores tipo FBG para medida de deformaciones en estructuras. Diploma de Estudios Avanzados (DEA). Universidad Politécnica de Valencia, Febrero 2007.

Gerard F. (2005). Fibre optic sensor systems for monitoring composite structures. 0034-3617/05 2005 Elsevier Ltd.

Giménez E; Adam J; Ivorra S; (2009). Influence of strips configuration on the behaviour of axially loaded RC columns strengthened by steel angles and strips. *Material & Design*. (ISSN 0261-3069). Vol 30. (4103-4111). 2009.

Glisic B; Inaudi D. (2007). Fibre Optics Methods For Structural Health Monitoring. John Wiley & Sons, Ltd.

Glišić B; Inaudi D; (2006). Monitoring of Early and Very Early Age Deformation of Concrete Using Fiber Optic Sensors. *Fédération Internationale du Béton Proceedings of the 2nd*

International Congress June 5-8, 2006. Naples, Italy. Session 17 – Monitoring, maintenance, repair, residual life and failures.

Glisic B; Simon N. (2000). Monitoring of concrete at very early age using stiff SOFO Sensor. *Cement & Concrete Composites* 22 (2000) 115-119.

Glisic B; Inaudi D. Structural health monitoring method for curved concrete bridge box Girders. SMARTEC S.A (2007).

Graver T; Daniele Inaudi; Justin Doornink. Growing Market Acceptance for Fiber-Optic Solutions in Civil Structures. Micron Optics, Inc. & Smartec S.A. (2005).

Gu X; Chen Z; Ansari F; Embedded fiber optic crack sensor for reinforced concrete structures. *ACI Structural Journal*, nº97. Pag 468-476. (2000).

Hang-Yin L; Kin-Tak Lau; Li Cheng. Determination of dynamic strain profile and delamination detection of composite structures using embedded multiplexed fibre-optic sensors. *Composite Structures* 66 (2004) 317–326.

Inaudi D; Glisic B (2005). Field Applications of Fiber Optic Strain and Temperature Monitoring Systems. Opto-electronic Sensor-based Monitoring in Geo engineering, Nanjing, P.R.China, November 23-24, 2005 Page 1 of 6.

Inaudi D; Glisic B. (2005). Application of distributed Fiber Optic Sensory for SHM. 2nd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure (SHMII-2'2005), Shenzhen, China, November 16-18.

Inaudi D. Fiber optic sensor network for the monitoring of civil engineering structures, EPFL, Lausanne, Switzerland, Ph.D. Thesis No. 1612 (1997).

Inaudi D; Casanova N; Glisic B. (2001). Long-term deformation monitoring of historical constructions with fiber optic sensors. 3rd International Seminar on structural analysis of historical constructions, 7-9.11.2001, Guimaraes, Portugal.

Inaudi D; Casanova N; Vurpillot S; Birdge Monitoring by fiber optic deformation sensors: design, emplacement and results. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. *Smart Structures and Materials*. SPIE Vol 2719. Pag. 141-149. 1996.

J. G. Hermoso, L. A. Ramírez, J. A. Luna. Colegio de Caminos, Canales y Puertos. Asociación Científico-Técnica del Hormigón Estructural. *Estructuras y Edificación*. Construcción de edificios altos. “Control” (2008). 314-316.

J. M. Calzón, M. G. Navarro. Asociación Científico-técnica del Hormigón Estructural. *Revista trimestral*. Volumen 59. Nº 249. “Torres Espacio. Building Structure” (2008). 24-26

Joachim N; Federal Ministry of Transport, Building and Housing, Bonn, Germany, Peter Haardt,(2003) “NDT Methods for the inspection of highway structures“Federal Highway Research Institute, Bergisch Gladbach, Germany.

Kaminetzky D; Stivaros P (1994). “Early-Age Concrete: Construction Loads, Behavior, and failures”, Concrete International, 16(1), 58-62.

Kang D.H; Park S.O; Hong CS; Kim CG; The signal characteristics of reflected spectra of fiber Bragg grating sensors with strain gradients and grating lengths. NDT&E International 38 (2008) 712–718.

Kin-Tak L; Chi-chiu Chan; Li-min Zhou; Wei Jin. Strain monitoring in composite-strengthened concrete structures using optical fibre sensors. Composites: Part B 32 (2001) 33–45.

Kleckers T; Bernd Günther. Bandas ópticas o bandas eléctricas: una comparación.<http://www.hbm.es/custserv/SEURLF/ASP/SFS/ID.802/MM.4,101,180/SE/techarticles.htm>. Julio 2007.

Koji Otsuka; Hirozo Mihashi; Masakazu Kiyota; Satoshi Mori; Atsushi Kawamata (2003). “Observation of multiple cracking in Hybrid FRCC at Micro and Meso Levels”. Journal of Advanced Concrete Technology Vol. 1

Kreuzer M. Strain Measurements with Fiber Bragg Grating Sensors. HBM, Darmstadt, Germany. (www.hbm.com).

Kuang KSC; Kenny R; Whelan MP; Cantwell WJ; Chalker PR; Embedded fibre Bragg grating sensors in advanced composite materials. Composites Science and Technology 61 (2001) 1379–1387.

Lange J; Benning W; Siering K; Crack detection at concrete construction units from photogrammetric data using image processing procedures, ISPRS Commission VII Mid-term Symposium "Remote Sensing: From Pixels to Processes", Enschede, the Netherlands, 8-11 May 2006.

LCPC (1984). Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art. Fascicule 32: Ponts en Béton Précontraint. Sous-Fascicule 32.2 Ponts à Poutres-Caissons ou a nervoures et ouvrages analogues en béton précontraint. Ministère de l'Urbanisme, du Logement et des Transports.

LCPC (1984). Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art. Fascicule 32: Ponts en Béton Précontraint. Sous-Fascicule 32.1 Ponts Courants. Ministère de l'Urbanisme, du Logement et des Transports.

Lee B; Review of the present status of optical fiber sensors. *Optical Fiber Technology* 9 (2003) 57–79.

Leng JS; D Winter; RA Barnes; G CMays; G F Fernando; Structural health monitoring of concrete cylinders using protected fibre optic sensors. *Smart Materials And Structures*. 15 (2006) 302–308.

Maaskant R; Alavie T.; Mesures RM; Tadros G; Rizhalla RH; Guha-Takurta A; Fiber Optic Bragg Grating Sensor for Bridge Monitoring. *Cement & Concrete Composites*. Vol 19. Nº1. Pp 21-23. (1997).

Meza JM; Franco EE; Farias MCM.; F. Buiochi R; M Souza; Cruz J. Medición del módulo de elasticidad en materiales de ingeniería utilizando la técnica de indentación instrumentada y de ultrasonido. *Revista de Metalurgia*, 44 (1) Enero-Febrero 52-65, 2008 ISSN: 0034-8570.

Moyo P; Brownjohn JMW; Suresh R; Tjin SC; (2005). Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil Infrastructure. *Engineering Structures* 27 (2005) 1828–1834.

Okabe Y; Shigeki Y; Ryohei T; Tadahito M; Nobuo T; Effect of thermal residual stress on the reflection spectrum from fiber Bragg grating sensors embedded in CFRP laminates. *Composites: Part A* 33 (2002) 991–999.

Pallares F; Ivorra S; Pallarés L; Adam J; (2009). Seismic assessment of a masonry chimney strengthened with CFRP. *Structures and Buildings* (ISSN 0965-0911). Vol in Pre. (1-1). 2009.

Paul C; Allan CL Wong; Gowripalan N; GD Peng. Measurement of the coefficient of thermal expansion of ultra-high strength cementitious composites using fibre optic sensors. *Cement and Concrete Research* 37 (2007) 789–795.

Pérez A. *Fibre Optic Sensors: Application to the long term monitoring of Civil Engineering Structures*. Tesina de Especialidad de la Universidad Politécnica de Cataluña (2001).

Piñero M; Morales V; Propiedades mecánicas de aerogeles híbridos de sílice. *Boletín de la sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. V., 44 [5] 291-293 (2005).

Q. Feng; Franco De Flaviis; Yoo jin Kin; Rudy Diaz. (2003) *Application of Electromagnetic Waves in Damage Detection of Concrete Structures*. National Science Foundation.

Quirion M; Ballivy G; Concrete strain monitoring with Fabry-Perot fiber optic sensor. *Journal of Materials in Civil Engineering/August 2000*. Pp 245-261.

Ramos CA; Oliveira R; Marques AT; Design of an optical fibre sensor patch for longitudinal strain measurement in structures. Article in press. *Material & Design* (2008).

Rupali S; Swee Chuan T; Bhalla S; Multi-component force measurement using embedded fiber Bragg grating. *Optics & Laser Technology* 41 (2009) 431–440.

Schulz L; Udd Seim; McGill GE; Advanced fiber grating strain sensor system for bridges, structures and highways. Blue Road Research and Oregon Department of Transportation. Research Unit (2002).

Slowik V; Schlattner E; Klink T; Experimental investigation into early age shrinkage of cement paste by using fibre Bragg gratings. *Cement & Concrete Composites* 26 (2004) 473–479.

T. K. Lee; Al-Mahaidi R. An experimental investigation on shear behaviour of RC T-beams strengthened with CFRP using photogrammetry, *Composite Structures* 82 (2008) 185–193.

Udd. E; Whitten L; Schulz; John Seim; Kelli Corona-Bittick; Jim Dorr. Fiber Optic Smart bearing load Structure. Blue Road Research, 2555 NE 205TH. Avenue Fairview (2005).

Vieira. A; R. de Oliveira; O Frazão; JM Baptista; AT Marques. Effect of the recoating and the length on fiber Bragg grating sensors embedded in polymer composites. *Materials and Design* 30 (2009) 1818–1821.

Whiteman T; Lichti DD; Chandler I. Measurement of deflections in concrete beams by close-range digital photogrammetry, *Symposium on Geospatial theory Processing and Applications*, Ottawa 2002.

Wnuk VP; Méndez A; Process for Mounting and Packaging of Fiber Bragg Grating Strain Sensors for use in Harsh Environment Applications. *Smart Structures Conference 2005*, SPIE paper 5758-6.

Yuyama S; Yokoyama K; Niitani K; Ohtsu M; Uomoto T (2007). Detection and evaluation of failures in high-strength tendon of prestressed concrete bridges by acoustic emission. *Construction and Building Materials* 21 491–500.

PÁGINAS WEB.

<http://www.ishmii.org>. Página web de la International Society for Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure. Consultado en Agosto del año 2009.

<http://www.nytimes.com/2007/08/02/us/02bridge.html> . Consultada en Agosto del año 2009.

<http://www.hbm.com> Página web de la Empresa HBM. Consultada en Marzo del año 2009.

<http://www.wikipedia.es>. Consultada en Marzo del año 2009.

<http://www.fibercomposite.com>. Página web de la empresa FiberComposite, especializada en el desarrollo tecnológico de fibras compuestas. Consultada en Marzo del año 2009.

<http://www.micronoptics.com>. Página web de la empresa MicronOptics, especializada en instrumentos para el sensado óptico. Consultada en Octubre del año 2008.

<http://www.fibersensing.com> Página web de la empresa FiberSensing, especializada en instrumentos para el sensado óptico. Consultada en Octubre del año 2008.

<http://www.glaspol.net> Página web de la empresa Glaspol Composites S.L. Consultada en Octubre del año 2008.

<http://www.materiales.eia.edu.co> Página web de la Escuela de Ingeniería de Antioquía. Consultada en Septiembre del año 2009.

<http://www.smartec.ch> Página web de la empresa Smartec S.A., especializada en instrumentos para el sensado óptico. Consultada en Octubre del año 2008.

APÉNDICE 1. EXTENSOMETRÍA CLÁSICA.

1.1 - Introducción.

Para validar el correcto funcionamiento de los sensores de fibra óptica, las deformaciones que experimentan éstos, se comparan con las obtenidas mediante la extensometría clásica.

El análisis de tensiones se determina en base a la distribución de esfuerzos en diferentes materiales y bajo determinadas condiciones de carga. El análisis experimental de tensiones se lleva a cabo midiendo la deformación de la pieza o elemento bajo carga, para inferir en ese punto los esfuerzos locales.

Los esfuerzos provocan unas deformaciones en el medio sobre el que se aplican, y la relación entre ambos parámetros puede ser explicada a través de la Teoría de Resistencia de Materiales. Los transductores de deformación se denominan Extensómetros o galgas de deformación y el tipo que se emplea con mayor frecuencia es la galga resistiva. La galga resistiva, permite determinar las tensiones y deformaciones de un sólido a partir de las modificaciones que sufre la resistencia eléctrica de la misma, al estar adherido al sólido cargado. (Rodríguez y Anza, 1982).

Los métodos extensométricos han ido evolucionando a lo largo de la historia. Uno de los primeros aparatos empleados fue el *extensómetro de Huggenberger*, el cual era un instrumento mecánico que se aplicaba directamente sobre la zona a estudiar. Hoy en día existen sistemas extensométricos basados en principios ópticos, acústicos o eléctricos [Ortiz Berrocal, 1998].

A continuación se presentan los transductores tipo Galgas Extensométricas, su constitución y clasificación (Fraile & García, 1987). También se comentan los circuitos de medida que básicamente, son puentes de Wheatstone, empleados para corregir y evitar errores provocados por efectos de temperatura.

1.2 - Conceptos básicos de elasticidad.

A continuación se realiza un breve repaso de ciertos conceptos de elasticidad que deben tenerse en cuenta para una mejor comprensión del funcionamiento de las galgas extensométricas.

Si se considera una barra de sección circular (Figura A1.1), que es solicitada por una carga paralela a la directriz de dicha barra, y que genera un esfuerzo que no excede del límite elástico del material que compone la barra, la deformación unitaria que experimenta la barra se puede obtener mediante la expresión A1.1.

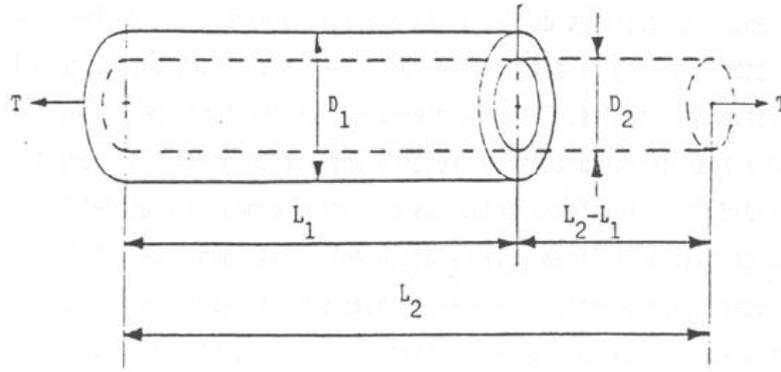


Fig. A. 1 Barra cilíndrica sometida a una fuerza axial (Fraile & García, 1987).

$$\varepsilon_a = \frac{L_2 - L_1}{L_1} = \frac{\Delta L}{L}; \quad \Delta L = L_2 - L_1; \quad L = L_1 \quad (\text{A1.1})$$

Éste valor de ε_a representa el alargamiento por unidad de longitud de barra, que a su vez, se encuentra relacionado con el módulo de elasticidad ó módulo de Young del material que conforma la barra, mediante la expresión (A1.2).

$$\sigma_a = \frac{T}{A} = E \varepsilon_a = E \frac{\Delta L}{L} \quad (\text{A1.2})$$

La ecuación anterior es la muy conocida ley de Hooke, donde σ_a representa el esfuerzo axial que se genera en la barra. La ecuación anterior nos dice que en régimen elástico y lineal, las deformaciones unitarias son directamente proporcionales a las tensiones.

En el caso del acero, el límite elástico suele variar entre 200 y 800MPa, mientras que su módulo de elasticidad suele estar en torno a 210000MPa. En la mayoría de materiales, la deformación unitaria suele ser muy pequeña, por lo que se suele trabajar empleando la unidad llamada “microstrain”, que viene a representar la deformación unitaria, expresada en $\frac{\mu m}{m}$. El símbolo que se emplea para representarla es $\mu\varepsilon$.

Tal y como se muestra en la Figura A.1, al existir una deformación axial de la barra, se produce una deformación en sección transversal de la misma, y de sentido contrario a la longitudinal. El cociente entre ambas deformaciones unitarias (transversal/longitudinal) recibe el nombre de coeficiente de Poisson, y viene dado según la ecuación A1.3:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a}; \quad \varepsilon_t = \frac{D_2 - D_1}{D_1} \quad (\text{A1.3})$$

El signo negativo en la expresión de ν hace referencia a que ambas deformaciones unitarias son de signo contrario.

El valor del coeficiente de Poisson se determina de modo experimental. Su valor oscila entre 0 y 0.5, y es muy común valores en torno a 0.3 para diferentes materiales.

1.3 - Principio de funcionamiento de un extensómetro eléctrico de resistencia.

Este tipo de extensómetro deben su existencia a un descubrimiento realizado por S. Lord Kelvin (1856), quien observó que, al cargar mecánicamente unos hilos de cobre y hierro, se producía una variación de la resistencia eléctrica, siendo esta variación mayor en el hierro que en el cobre. Para ello, se ayudó de un Puente de Wheastone, utilizando un galvanómetro como indicador.

La variación de resistencia de un conductor circular a consecuencia de su deformación mecánica, viene dado por la expresión A1.4.

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (\text{A1.5})$$

Siendo:

- R: resistencia eléctrica.
- S: sección del conductor.
- ρ : resistividad del material.
- l: Longitud del conductor

Sin embargo, al someter al conductor a una deformación, no sólo se modifica su longitud, sino que todos los parámetros que intervienen en la expresión anterior sufren una variación. Dichas variaciones vienen dadas por la expresión A1.6.

$$dR = \frac{A(\rho dl + l d\rho)}{A^2}; \quad \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} \quad (\text{A1.6})$$

Transformando la ecuación anterior en términos del coeficiente de Poisson se tiene la ecuación A1.7.

$$\frac{dR}{R} = \frac{dL}{L} (1 + 2\nu) + \frac{d\rho}{\rho} \quad (\text{A1.7})$$

En la expresión anterior, $d\rho$ es la variación de resistividad provocada por la modificación del volumen dV del conductor al estar sometido a esfuerzos mecánicos. Este fenómeno recibe el nombre de Efecto Piezoresistivo, que se expresa por la relación A1.8.

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} \quad (\text{A1.8})$$

Siendo C una constante, llamada Constante de Bridgmann.

En una galga, la relación existente entre la variación de resistencia, y la deformación unitaria, se expresa según la ecuación A1.9 (en términos incrementales).

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad (\text{A1.9})$$

Dicho valor se llama Factor de Galga, o sensibilidad de galga que se define como el cambio porcentual de resistencia y el cambio porcentual de longitud o deformación unitaria o deformación por fatiga.

Si sustituimos la ecuación A1.7 anterior en la ecuación A1.8, y asumimos que la variación de resistividad es nula, se obtiene la expresión A1.10 para conocer la sensibilidad de la galga :

$$GF = 1 + 2\nu \quad (\text{A1.10})$$

Si por el contrario, la variación de resistividad no es nula, la expresión del factor de galga, puede expresarse del siguiente modo, si tenemos en cuenta la ecuación de Bridgmann:

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = (1 + 2\nu) + C(1 - 2\nu) = K \quad (\text{A1.11})$$

En el caso de hilos metálicos, en el dominio de las deformaciones elásticas, el coeficiente de Poisson viene a estar en torno a 0.3. Como la constante de Bridgmann es prácticamente la unidad, el factor de galga tiene un valor aproximado de 2.

Respecto a la ecuación anterior, los ensayos demuestran que la sensibilidad de los diferentes materiales presenta valores muy diferentes. Esto significa que, como ya se indicó, la resistividad de los materiales también varía con la deformación, o mejor dicho, con el esfuerzo interno del material asociado a dicha deformación. Lo que ocurre es que, por encima del límite elástico, la variación del esfuerzo interno tiende a cero, y el coeficiente de Poisson tiende a 0.5 (volumen constante). En este caso, los cambios de resistencia por deformación sí son principalmente debidos a las variaciones dimensionales, y la sensibilidad (GF), tiende a 2.

Lo anterior significa que materiales que tienen una sensibilidad (GF) en el rango lineal muy diferente a 2, tenderán a valores cercanos a 2 en el rango plástico, con la no linealidad que supone esta variación, y que por tanto únicamente aquellas aleaciones con sensibilidades (GF) cercanas a 2 en el rango elástico se comportarán prácticamente linealmente en un amplio rango de deformación, lo cual suele ser cierto para la mayoría de los materiales empleados en la fabricación de galgas.

En la Figura A1.2 se muestran las características básicas de las aleaciones empleadas para la fabricación de galgas resistivas. La mayoría de los extensómetros eléctricos se fabrican con Constanan (aleación de cobre níquel), manteniéndose el factor de galga constante dentro de un amplio margen de deformación incluso superando el límite elástico del conductor.

MATERIAL	COMPOSICIÓN	FACTOR DE GALGA (K)	RESISTIVIDAD DE - cm
Nichrome V	80% Ni – 20% Cr	2.0	108
Constantan	45% Ni – 55% Cu	2.0	49
Karma	74% Ni – 20% Cr 3% Al – 3% Fe	2.4	130
Platino	100% Pt	4.8	10
Niquel	100% Ni	-12	7.8

Fig. A. 2 Materiales empleados en la fabricación de galgas. (Casas, 2002).

Para la obtención de las deformaciones en un punto de una estructura, se adhiere el extensómetro al punto donde se desee obtener la deformación, y se determina la variación de resistencia del conductor. A partir de esto, podemos obtener la deformación de la estructura mediante la expresión A1.12.

$$\varepsilon_a = \left(\frac{1}{K}\right) \frac{\Delta R}{R} \tag{A1.12}$$

Los valores de K y R, son generalmente suministrados por el fabricante de la galga, de modo que, si medimos ΔR es posible calcular la deformación ε_a del extensómetro, y en consecuencia, de la propia estructura. Aquí radica la importancia de una buena técnica de pegado del extensómetro a la estructura, de modo que ésta transfiera convenientemente las deformaciones a la galga.

A pesar de haberse demostrado la relación entre la deformación del material y la variación de resistencia de las galgas, en muchas ocasiones es difícil apreciar las diferencias de resistencia que experimenta la galga e interpretar, en base a ellas, las deformaciones que experimenta un determinado material. Por ese motivo, habitualmente se convierte el cambio de resistencia de la galga en un voltaje, conectando dos o cuatro galgas como ramas de un puente Wheatstone, como el que se muestra en la figura A1.3. De esta manera se consigue amplificar la respuesta de la galga frente a un mismo esfuerzo.

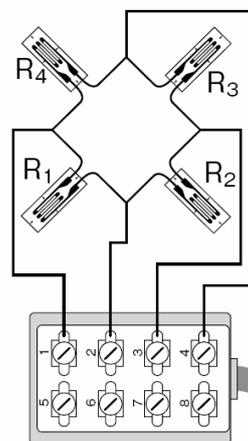


Fig. A. 3 Puente de Wheatstone (www.hbm.com)

En la práctica, se emplean expresiones como la A1.13 para relacionar las deformaciones de las cuatro galgas que componen el puente, siempre que las resistencias y factores de galga sean iguales:

$$\frac{U_A}{U_B} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (\text{A1.13})$$

1.4 - Tipos de extensómetros eléctricos.

Es teóricamente posible medir deformaciones en una estructura mediante un solo hilo como elemento sensible. Sin embargo, para no sobrecargar la fuente de alimentación del circuito, y reducir de este modo al máximo el calor generado por la corriente que circula por el extensómetro, es necesario disponer de una resistencia mínima, de unos 100 Ω para la galga. Si se emplea un conductor de Constatan, de 0.025 mm de diámetro, correspondiente a una resistencia de 1000 Ω /m, se necesitaría una longitud de 10 cm. Esta longitud es prohibitiva, si se desean realizar medidas precisas y muy localizadas.

En el año 1938, Simmons y Ruge, desarrollan una banda metálica, de conductor muy delgado, formando una rejilla plana con el hilo. El problema de estas bandas de hilo, era su sensibilidad frente a los esfuerzos transversales.

Teniendo en cuenta el factor de galga, si la banda se deforma en el sentido de su longitud y en sentido transversal, deben definirse las sensibilidades de la banda a deformaciones axiales K_a y a deformaciones transversales K_t . De este modo, la variación unitaria puede escribirse de acuerdo a la expresión A1.14.

$$\frac{\Delta R}{R} = k_a \varepsilon_a + k_t \varepsilon_t; \quad \frac{\Delta R}{R} = k_a (\varepsilon_a + s_t \varepsilon_t) \quad (\text{A1.14})$$

Siendo s_t el factor de sensibilidad transversal. Realizando las sustituciones oportunas, se obtiene la expresión A1.15.

$$k = k_a (1 - \nu s_t) \quad (\text{A1.15})$$

Los valores de K y k_a son iguales si sólo existen deformaciones axiales, pero pueden introducirse errores apreciables cuando hay deformaciones transversales. Esto se debe a variaciones de sección en el hilo en la zona de los meandros de la banda extensométrica cuando existen tensiones normales a la dirección axial de la banda. Con el objetivo de disminuir este efecto, Senders y Roe (1952), crearon la banda extensométrica de circuito impreso, que son las más usadas actualmente.

Para la fabricación de las bandas extensométricas de circuito impreso (Figura A.4), se emplean técnicas de fotocorrosión, lográndose espesores de hasta 5 μm e incluso menos. Admiten, debido al proceso de fabricación empleado, una gama muy amplia de formas y dimensiones que van desde longitudes de 0.2 mm hasta 102 mm, con resistencias nominales de 120, 350, 600, y 1000 Ω .

La sensibilidad transversal de esta banda es muy pequeña, debido a que se proyectan de tal modo que la sección en las vueltas de las rejillas sea superior a la sección longitudinal, de tal forma que una deformación transversal, no modifique prácticamente la resistencia de la banda.

Generalmente, y como se apuntó en el apartado 1.3 el material de las bandas suele ser Constatan, que tiene una sensibilidad o factor de galga próximo a 2, soportando esfuerzos, en rotura en torno a 20000 y 25000 $\mu\epsilon$, con precisiones de 0.1% hasta 10000 $\mu\epsilon$ y del 1% hasta valores superiores.

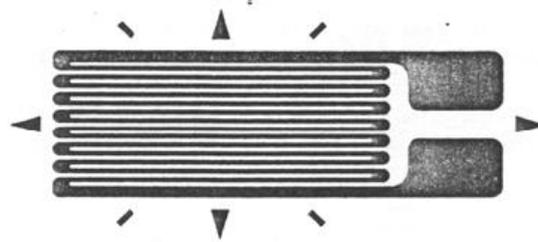


Fig. A. 4 Imagen de una banda extensométrica de circuito impreso. (Fraile & García, 1987)

A partir del descubrimiento del transistor, en el año 1946, y del estudio de las propiedades piezoeléctricas de los semiconductores, se han realizado transductores de gran sensibilidad, con factores de galga de 50 y 175, dependiendo del tipo y cantidad de impurezas introducidos en un cristal puro de silicio. Estos factores de galga tan elevados, los hace aplicables para la medida de deformaciones extremadamente pequeñas, en minitransductores, y aquellos que necesitan una señal de salida elevada. Sin embargo, la variación del parámetro K con la temperatura, y su precio elevado, hacen que su aplicación sea muy reducida.

A continuación se muestran los aspectos constructivos de las galgas semiconductoras (Figura A.5). Los factores de galga oscilan entre 50 y 200, con resistencias nominales de 120 Ω , precisiones del 1% por encima de 1000 $\mu\epsilon$, y esfuerzo de rotura correspondiente a una deformación en rotura de 5000 $\mu\epsilon$.

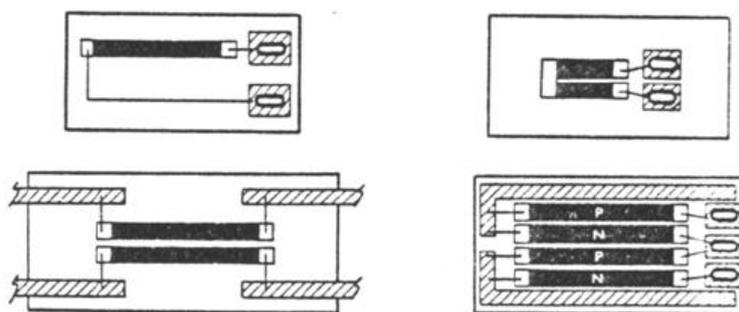


Fig. A. 5 Galgas semiconductoras (Fraile & García, 1987)

Otro aspecto importante a considerar es la configuración de la banda extensométrica.

Las más sencillas son las uniaxiales, en las que la mayor parte del elemento sensible está alineado con el eje donde queremos realizar la medida. Se utilizan por tanto, cuando se quieren medir deformaciones en una sola dirección. Existen también bandas biaxiales, conocidas también como rosetas, y éstas se utilizan para medir deformaciones en dos o más direcciones,

localizando la magnitud y sentido de las deformaciones principales cuando las sollicitaciones de la pieza son complejas. Existen rosetas de dos elementos (cuando se conocen las direcciones de las tensiones o direcciones principales), de tres elementos (cuando no están localizados los ejes principales).

Otro aspecto a considerar, en las bandas, es el material sobre el que va pegado el hilo sensible o rejilla.

En primer lugar, el soporte sirve para facilitar el manejo de la banda. Sirve, por otra parte, para mantener los finos conductores de la rejilla en la dirección apropiada y proporciona soporte a los terminales de conexión. Los materiales soportes, deben ser buenos aislantes eléctricos, a cualquier temperatura de trabajo del extensómetro, y también fuertes y flexibles, para permitir el fácil pegado a superficies de perfil variado. Aún después del pegado, el soporte juega un papel importante en relación con la transmisión de las deformaciones. Esto es así debido a que los movimientos relativos del material, deben ser transmitidos a la rejilla a través del soporte.

La transmisión de deformaciones exige un módulo de elasticidad transversal bastante alto a cualquier temperatura de funcionamiento y ausencia de efectos viscoelásticos o fluencia de frío. Los aglomerantes nitrocelulósicos combinados con un refuerzo de papel delgado, dan lugar a soportes que sirven hasta temperaturas de 80°C, siendo éstos utilizados durante muchos años en los extensómetros llamados “de dorso de papel”.

Las resinas epoxi o fenólicas (Bakelita), son excepcionales, ya que su apretada estructura en forma de retícula no se ablanda a altas temperaturas. Por esta razón, los extensómetros eléctricos con soporte fenólico, han sido utilizados desde hace mucho tiempo, cuando las temperaturas de utilización alcanzan los niveles de 200 y 300°C, aún cuando las resinas se vuelven frágiles después de la exposición a altas temperaturas.

1.5- Características generales de las bandas extensométricas.

Las bandas extensométricas del tipo circuito impreso, están formadas por pequeñas resistencias de valores normalizados a 120, 350 y 1000Ω, con precisiones del orden de +- 0.4%, y un factor de galga próximo a 2. El fabricante suele facilitar el factor con dos cifras decimales dentro de cada lote o serie de fabricación, con una tolerancia de +- 1%. A continuación se resume y comenta otras características de las bandas extensométricas.

- a) Linealidad, histéresis y deriva.

Si se presenta la salida de una banda, es decir, la deformación medida en función de la deformación aplicada, considerando el sistema formado por la banda, el adhesivo y la instrumentación, se obtiene, para una carga cíclica, el gráfico indicado en la Figura A.6. En ella se observa una ligera desviación de la respuesta de la zona lineal, y se aprecia, que la curva de salida de la banda, cuando decrece la carga aplicada, está por debajo de la curva de carga creciente, lo que forma un ciclo de histéresis. Además, cuando la deformación aplicada se reduce a 0, la salida de la banda indica una pequeña deformación negativa, que se denomina *Deriva de cero*. La magnitud de la desviación de la linealidad, histéresis y deriva dependen del nivel de la deformación, del comportamiento del adhesivo, y del material soporte.

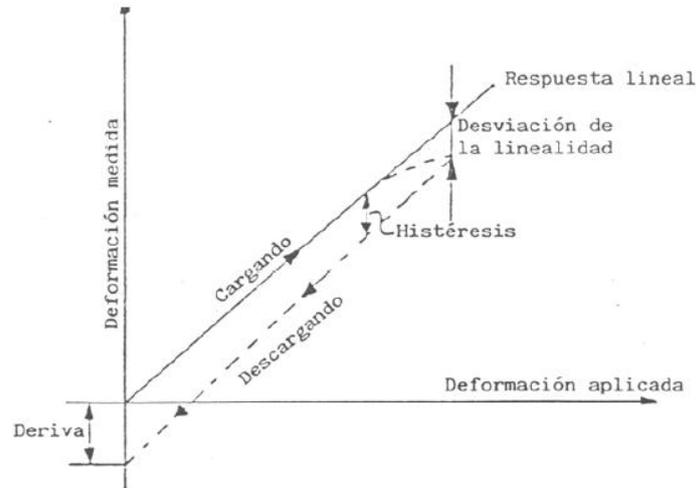


Fig. A.6 Deriva de las bandas extensométricas. (Fraile &García, 1987)

Si las bandas se colocan correctamente, las desviaciones de la linealidad no sobrepasan el 1% de la deformación máxima aplicada para soportes de poliamida (poliéster) y del 0.05% para soportes de resina epoxi. Las bandas clásicas presentan una desviación del 0.1 % hasta 4000 $\mu\epsilon$, y del 1% hasta los 10000 $\mu\epsilon$. La deformación para la cual se rompe la banda es del orden de 20000 a 25000 $\mu\epsilon$ aproximadamente.

La duración de las bandas es prácticamente ilimitada, siempre que se cumplan los requisitos de pegado, aislamiento, condiciones ambientales y deformaciones máximas que se aconsejan para cada tipo.

Para los ensayos que engloba el presente trabajo, las galgas se emplean para poder comparar los resultados obtenidos con los sensores ópticos Bragg Grating. Se debe tener muy en cuenta, las ventajas que presentan estos sensores frente a las bandas convencionales, comentados en el apartado correspondiente.

b) Compensación de temperatura.

En algunos casos, la instalación de una banda extensométrica está sometida a posibles cambios de temperatura, lo que debe tenerse en cuenta para distinguir si la variación de resistencia se debe a la deformación aplicada o al cambio de temperatura recién comentado. Al variar la temperatura, se dan tres fenómenos que modifican la característica de la galga:

- ✓ Variación del factor de galga k .
- ✓ Alargamiento o contracción de la rejilla como el material soporte.
- ✓ Alteración del valor de la resistividad del hilo que forma la rejilla.

El cambio en el factor de galga para una banda realizada con Constatan (Advance) es del orden de 0.00735%/°C, por lo que este efecto puede despreciarse.

Este es el efecto que tiene lugar normalmente en ensayos de laboratorio, donde las fluctuaciones de temperatura no exceden de +/-5°C, en caso de ensayos de corta duración.

En el mercado existen bandas autocompensadas, en las que eligiendo adecuadamente los materiales de la banda y el soporte, se reduce en gran proporción el efecto anterior.

c) Disipación de calor.

La temperatura de la banda, se encuentra influenciada no sólo por la temperatura ambiente, sino también por la potencia disipada en la banda cuando se conecta al circuito eléctrico de medida (generalmente el puente de Wheastone).

La potencia $P = RI^2$ se disipa en forma de calor. El incremento de temperatura de la banda es difícil de determinar, debido a la variedad de factores que influyen en el balance calorífico de la galga. Generalmente se suele definir una Densidad de Potencia $P_D = P/A$ donde A es el área de la rejilla de la banda, que está muy relacionada con el tipo de muestra a ensayar, la cual actúa como sumidero de calor.

Para cada tipo de galga, el constructor suministra un ábaco en el que se indica la tensión máxima de la fuente del puente de Wheastone, para que no existan problemas de disipación de calor.

1.6- Criterios de selección de una banda.

A continuación se citan a grandes rasgos, los aspectos más importantes que deben tenerse en cuenta para la selección de una banda extensométrica:

- a) En el caso de conocer las direcciones de los planos principales del modelo a ensayar, se puede realizar la medida con una simple banda, o a lo sumo dos, situadas sobre los ejes principales
- b) Cuando se desea aumentar el factor de galga K, puede emplearse una banda con doble rejilla o dos bandas separadas unidas en serie.
- c) Si la distribución de deformaciones es compleja, debe emplearse algún tipo de rosetas para determinar ejes principales de las deformaciones.
- d) El tamaño de la banda debe adaptarse al modelo a ensayar. Si se esperan grandes gradientes de deformación, deben utilizarse las bandas más pequeñas posibles. Cuando es necesario emplear altas tensiones para alimentación del puente de Wheastone, debe elegirse una banda con una gran superficie de rejilla para conseguir una disipación adecuada.
- e) La rejilla, material de soporte y adhesivos elegidos, deben poder trabajar a los niveles de temperatura y tensión previstos. Cuando no se conocen estos niveles, deben aplicarse los factores de seguridad que se estimen más convenientemente.
- f) La rejilla, el material de soporte y el adhesivo, deben tener una vida suficiente para que soporten el programa del ensayo sin una rotura prematura.
- g) El material de soporte y el adhesivo o pegamento, deben ser compatibles químicamente con el material objeto del ensayo.
- h) El coeficiente de dilatación de la banda debe adaptarse al material al que se aplica. Esta condición no es tan necesaria cuando se emplean bandas de compensación de temperatura en el puente de medida
- i) Finalmente, y ésta es una regla de sentido común, es importante utilizar la banda más económica que satisfaga las condiciones anteriores.

1.7 - Circuito de medida empleados.

A continuación se justifica el empleo de los puentes de Wheastone en los circuitos de medida de las galgas extensométricas.

La deformación medida ε , por una banda extensométrica de factor K y resistencia R , cuando experimenta una variación de ΔR , viene dado por la ecuación A1.16.

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \left(\frac{\Delta R}{R} \right) \quad (\text{A1.16})$$

Para una banda clásica de $K=2$ y $R=120 \Omega$, que detecte una deformación de $1\mu\varepsilon$ (10^{-6}), corresponde a una variación de resistencia de valor:

$$\Delta R = KR\varepsilon = 0.00024 \Omega \quad (\text{A1.17})$$

Ello implica una variación en la resistencia de 0.0002%. Obviamente para medir cambios tan pequeños, es preciso emplear circuitos de medida muy sensibles, teniendo especial cuidado en la compensación de magnitudes de influencia: interferencia electromagnética, temperatura, etc... Los cables debe procurarse que sean apantallados para evitar cualquier tipo de inducciones externas, y el puente debe disponer de la conexión a tres hilos para reducir los efectos de los cables de unión.

El circuito básico de medida empleado en extensometría es el puente de Wheastone cuya disposición se muestra en la Figura A.7.

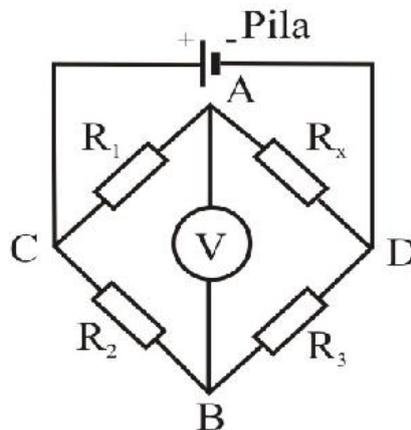


Fig. A. 7 Puente de Wheastone (Casas, 2002)

Existen diversos tipos de montaje del puente de Wheatstone, según es el número de bandas activas que se utilizan. Aunque el siguiente montaje del circuito en $\frac{1}{4}$ de puente se realiza con redes de dos hilos, en el montaje real se emplean redes de tres hilos, para compensar de este modo el efecto de las líneas que unen las bandas con el puente (suponiendo también despreciables las resistencias de los hilos de unión frente a las resistencias del puente).

1.7.1 - Montaje en ¼ puente.

Se dice que el montaje está realizado en ¼ puente, cuando de las cuatro resistencias del mismo, solamente una es variable, manteniéndose las otras tres durante la medida con los valores fijos del equilibrio inicial.

En la Figura A.8, se muestra el esquema del circuito en el que la resistencia R_2 del puente es la resistencia R_T del transductor. Inicialmente, cuando el transductor no está sometido a ninguna acción externa, su resistencia R_{T0} coincide con las demás del puente, de este modo el puente está equilibrado. Si la banda extensométrica sufre una variación positiva o negativa del valor ΔR .

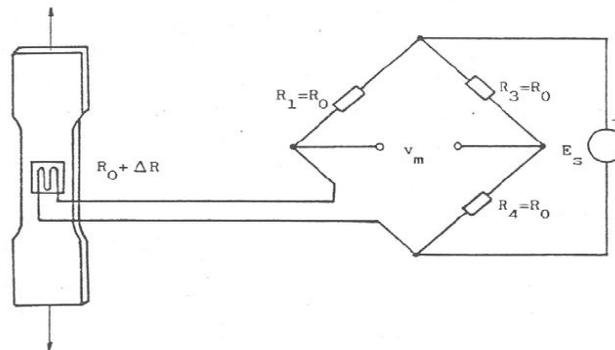


Fig. A. 8 Montaje en ¼ de puente. (Fraile & García, 1987)

En este caso, la variación será positiva, puesto que la zona donde está instalada la galga está sometida a tracción.

La tensión V_m de desequilibrio del puente es:

$$V_m = \left(\frac{E_S}{4}\right) \frac{\Delta R}{R_0} \quad (\text{A1.18})$$

Y por tanto la deformación:

$$\varepsilon = (1/K) \left(\Delta R/R_0\right) = (1/K) \left(4V_m/E_S\right) = \Delta L/L \quad (\text{A1.19})$$

El montaje mostrado en la figura A.8 se emplea cuando se conoce perfectamente la dirección del esfuerzo a medir y éste es único. Las dos expresiones anteriores resultan exactas en estas aplicaciones. Cuando hay cambios de temperatura, conviene elegir galgas autocompensadas para evitar errores en las medidas. Otro procedimiento habitual es el de colocar una galga adicional pasiva en una rama contigua al puente del mismo valor nominal que la galga activa, pero sin estar sometida a ninguna deformación (Banda compensadora).