

---

## **ESTRUCTURAS INTELIGENTES. INSTRUMENTACIÓN CON FIBRA ÓPTICA**

V. Alegre<sup>1</sup>, S. Villalba<sup>2</sup>

<sup>1</sup> COTCA S.A. Asistencia Técnica, Patología y Control de Calidad, [vicente@cotca.com](mailto:vicente@cotca.com), [info@cotca.com](mailto:info@cotca.com) , web: <http://www.cotca.com>.

<sup>2</sup> Crack Ingeniería Catalana sl, [svillalba@crack-ingenieria.cat](mailto:svillalba@crack-ingenieria.cat), web: <http://www.crack-ingenieria.cat>

### **RESUMEN**

Las estructuras presumen de su belleza a través del diseño y se quejan de sus problemas mediante sus daños. Cuando nos enfrentamos a una estructura “dolida” por algún daño concreto o “resentida” por las muchas actuaciones sobre ella, con distintos resultados, es importante hacer una buena diagnosis para luego acertar con la “medicina”. La tecnología de “diagnosis médica” sobre las estructuras avanza a pasos agigantados, y una de las últimas herramientas con garantías para conocer el estado nervioso del “paciente” es la fibra óptica, que complementada con el control de otras variables, permite crear modelos estadísticos de comportamiento que nos acercan al conocimiento de su salud estructural.

Se presentan ejemplos de aplicación en estructuras singulares, que han servido para actuar sobre la misma cuando de acuerdo con un plan de contingencias y un seguimiento de la temperatura y las microdeformaciones con fibra óptica, se ha sobrepasado el umbral de daño.

### **ABSTRACT**

Structures flaunt beauty through their design and also they complain about troubles through their damages. When we have a “painful” structure due to something specific damage, or it is “resentful” by a lot of works with many different results, it is important to make a good diagnosis in order to obtain a successful “medicine”. The SHM “Structural Health Monitoring” technology on structures is continually in advance, and one of the last techniques about the knowledge of the “patient” is the fiber optical sensor technology. It is complemented with control of others variables in order to know completely the structural health.

This research presents some examples in singulars structures, that we are used this technique in cases where, according to an specific contingencies plan, the threshold damage has been exceeded.

**PALABRAS CLAVE:** Fibra óptica, monitorización, salud estructural

---

V. Alegre

## 1. LA SALUD ESTRUCTURAL DE LOS EDIFICIOS

Para gestionar la salud estructural de las infraestructuras y edificios, mientras la estructura “está viva” o cuando por razones de edad tiene “algún problema” y necesita una rehabilitación, el patólogo ha de saber diagnosticar la causa del daño para actuar en consecuencia y curar, en caso necesario, al “enfermo”.

En la construcción, existen muchos instrumentos para el diagnóstico de daños (flexímetros potenciométricos, georradars, termohigrómetros, multitud de END, láseres, scanners, ...) para que el “sistema nervioso” de la estructura sea capaz de transmitir datos sobre su salud. En esa línea, una herramienta en desarrollo relativamente reciente, es la fibra óptica, que empieza a tener aplicaciones directas por la calidad y cantidad de información útil sobre deformaciones y temperatura que genera para establecer el diagnóstico.

La fibra óptica OBR (Optical Backscatter Reflectometer) es una tecnología de sensores de medición prometedora para la monitorización de estructuras, ya sea puntualmente (pruebas de carga, apeos, operaciones singulares, cambios de usos ...) o de forma continua en el tiempo para estudiar la respuesta de la estructura y sus variaciones de deformación y temperatura y gestionar en función de ello el elemento constructivo. También de forma periódica se puede ir haciendo un chequeo a la estructura cuando lleva la fibra óptica incorporada.

La instrumentación con fibra óptica requiere un conocimiento previo de la estructura, para colocar adecuadamente este “sistema nervioso” de forma que permita identificar donde se producen nuevas fisuras o nuevas deformaciones y cambios de temperatura. De esta forma se controla donde puede haber posibles roturas sin previo aviso o la influencia térmica, que quedarían sujetas a un plan de contingencias que limitara los valores máximos que detecta la fibra óptica, actuando en consecuencia.

En la industria aeronáutica se tiene experiencia de su viabilidad, en un elemento pétreo (hormigón, cerámica, ...) existen dificultades por la rugosidad superficial y la heterogeneidad debida a componentes de distinta morfología o tamaño. Las discontinuidades generadas por la fisuración del hormigón en niveles reducidos de carga, pueden producir la rotura de la fibra óptica si no se toman medidas.

La empresa ha utilizado de forma pionera esta herramienta en elementos pétreos y en combinación con otros aparatos, porque potencia el conocimiento de la estructura, al hacerla más comunicativa, expresando donde puede tener problemas y permitiendo validar su comportamiento en el tiempo, su salud.

Véanse ahora ejemplos de distintos “tratamientos médicos” propiciados por la fibra óptica, y basados en ella.

## 2. TRATAMIENTOS MÉDICOS. LA FIBRA ÓPTICA

### 2.1 Cuando la estructura requiere una operación puntual

En estos casos la instrumentación con fibra óptica permite seguir la evolución del refuerzo durante la operación, y las repercusiones en el resto del cuerpo de la estructura.

Un ejemplo es el caso de un apeo de pilares en un edificio modernista, que soporta un forjado abovedado entre arcos nervados que apoyan en el pilar. El pilar de fábrica de ladrillo presentaba fisuras verticales en evolución tras un siglo de vida útil, lo que hacía recomendable su sustitución. Se plantea el proceso de sustitución de este pilar por uno metálico que permitirá después volver a resitar la fábrica de ladrillo esta vez sin carga. Dado que la estructura durante esta “operación de sustitución” va a continuar en uso, se instrumenta la estructura de las bóvedas con fibra óptica para comprobar que las “tensiones” que se producen antes, durante y después de la operación son las normales, y aunque se tenga al enfermo “anestesiado” (apeado si pilar) no le ocurre nada a las otras partes importantes de la estructura que tienen un cierto nivel de daño (ver figura 1).

La instrumentación con fibra óptica permite realizar todo el proceso y en su caso establecer un plan de contingencias por si se produce alguna anomalía.

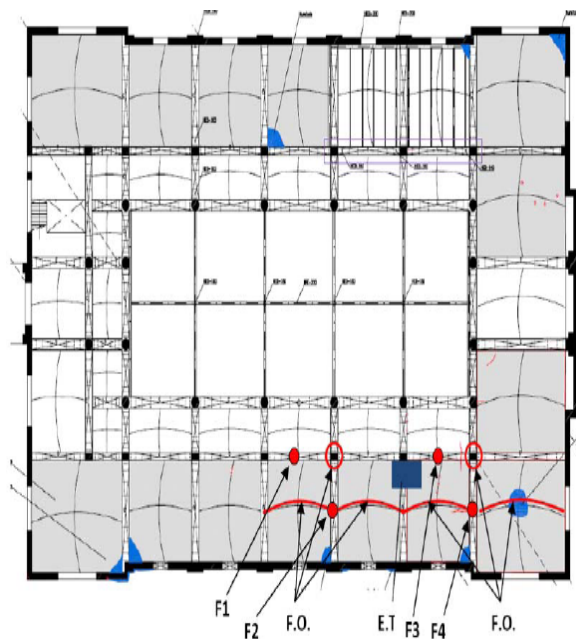


Figura 1. Esquema en planta de Monitorización  
F.O. Fibra óptica  
F<sub>n</sub>. Flexímetros potenciométricos



Foto 1. Fibra óptica en la bóveda.



Foto 3. Pilar apeado y fibra óptica en la bóveda.

Foto 2. Bóveda instrumentada próxima al apeo.

En este caso en concreto las variaciones de movimientos del arco antes de la operación en las cargas de uso eran de hasta 0,4 mm. Al realizar el corte del pilar, la estructura pretensada de apeo elevó el arco 0,3 mm y produjo tensiones de compresión en la bóveda registrada por la fibra óptica de poca entidad (100 microdeformaciones) mejorando el comportamiento de la estructura en el tramo en el que se actuaba, y manteniendo las tensiones en el resto.

Terminado el apeo, se ha podido corroborar que la bóveda no ha sufrido ninguna afectación, es decir que está bien de salud tras la operación.

## **2.2 Cuando la estructura está en la UVI**

Para aprender sobre el comportamiento de la fibra óptica y su respuesta en casos extremos, se realizó una prueba de carga a rotura por fatiga de una losa maciza de hormigón armado en laboratorio (en la UVI).

La fibra se colocó en la cara superior e inferior de la losa como indica la figura 2 y foto 4, y fue registrando las microfisuraciones con los distintos procesos de carga hasta rotura. La fibra óptica fue capaz de acompañar al enfermo hasta su “muerte” como consecuencia de  $2 \times 10^6$  ciclos de carga a fatiga.

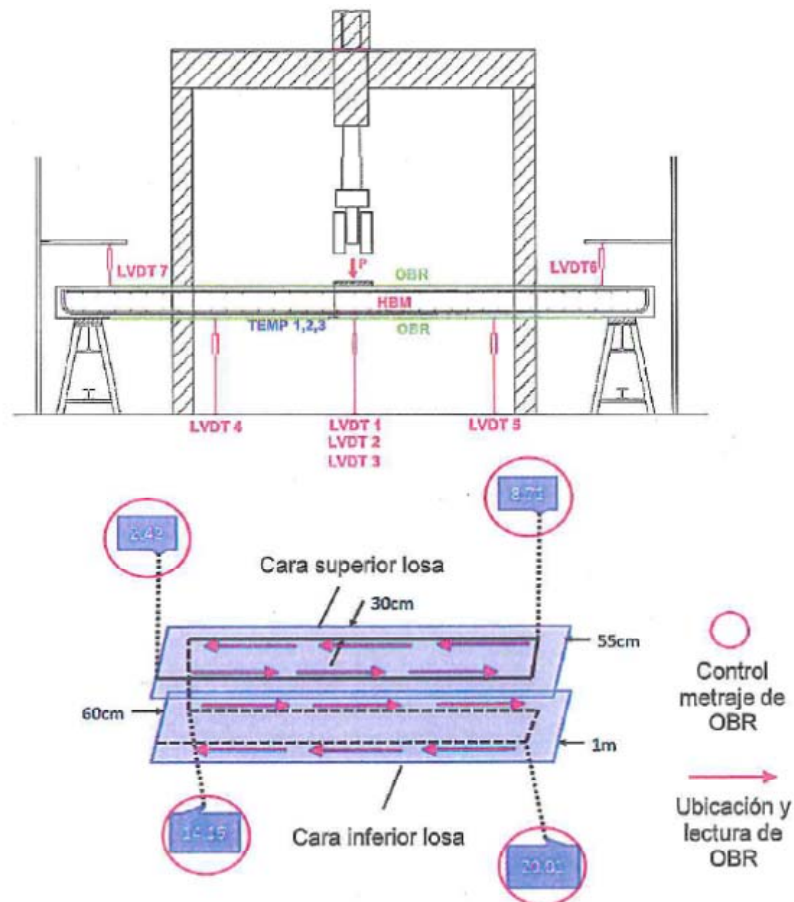


Figura 2. Instalación y posición de los sensores OBR y resto de Instrumentación.



Foto 4. Estado de pre-rotura de la losa.

El instrumentar con la fibra óptica hasta rotura ha permitido contrastar y validar los resultados obtenidos en la monitorización tanto para la detección de la aparición prematura de fisuras como para analizar la evolución hasta rotura.

Estructuras inteligentes. Instrumentación con fibra óptica



Foto 5. Sensor OBR (cara superior – Primer Tramo)

Los resultados obtenidos (gráfica 1) muestran como el sensor OBR no solo es capaz de detectar microfisuras, sino también de medir correctamente los niveles de carga que producen fisuras con aperturas superiores a 1 mm (hasta un 60% de la carga de rotura) adquiriendo la señal de frecuencia de forma adecuada, además de proporcionar valores de deformación correctos sin producirse la rotura de la fibra.

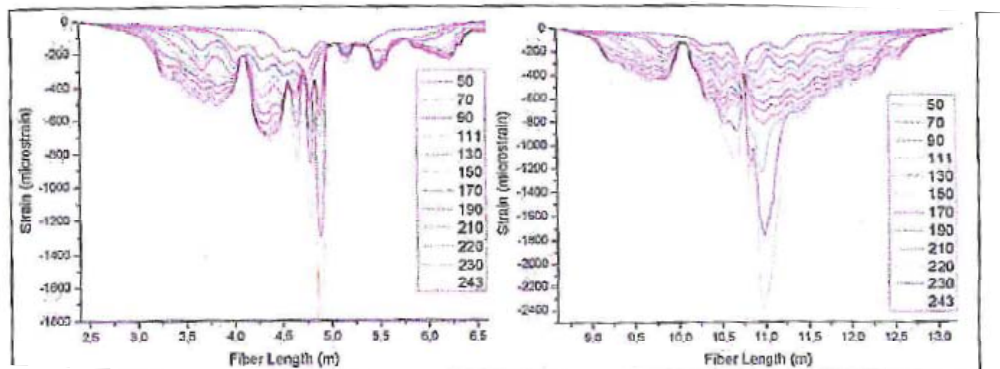


Figura 3. Longitudes de las deformaciones en la fibra (primer y segundo tramo).

### 2.3 Cuando preocupa la vida útil de la estructura

Es el caso de esta torre de refrigeración, que es una lámina de hormigón armado de 120 m de altura, 14 cm de espesor y 24.000 m<sup>2</sup> de superficie interior. Se produjo una grieta por varias causas concomitantes (viento, durabilidad, ejecución con geometría no correcta, ...) que se ha instrumentado para ver su comportamiento en el tiempo, antes de reparar la fisura, y una vez reparada.

La instrumentación antes de ser reparada permitió calibrar los movimientos de la fisura principal y la aparición de microfisuras en la lámina, que en su comportamiento como tal; iba a colaborar con la zona dañada, cuando ésta se la pedía.

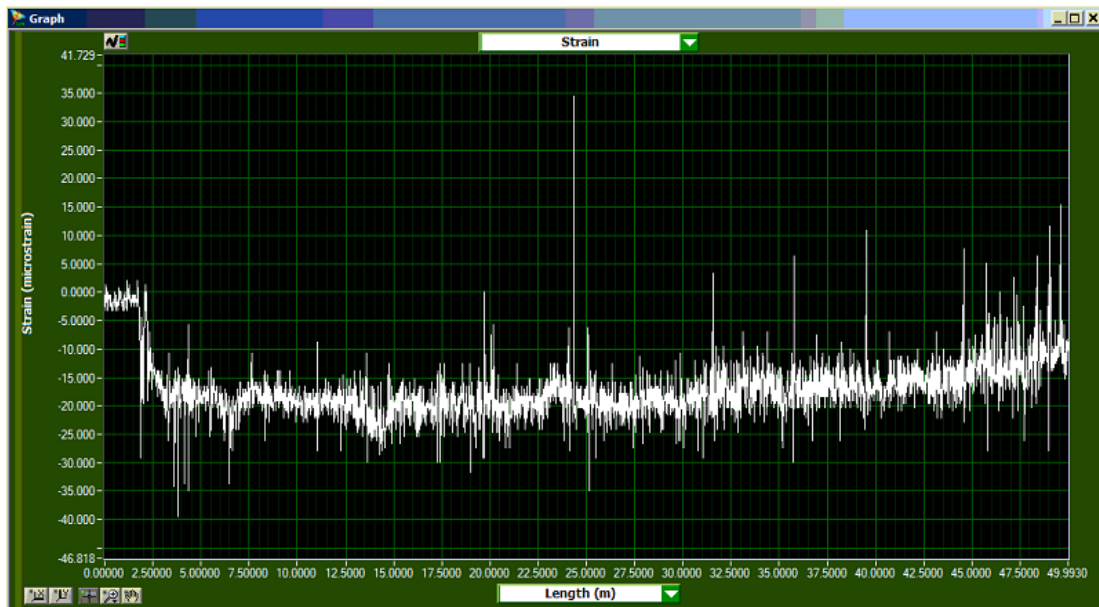


Figura 4. Calibraciones de la fibra óptica.

La instrumentación durante la operación de reparación con la fibra óptica en otra zona sensible apartada de la grieta principal permitió constatar que no se producen anomalías en las zonas más sensibles de la torre (ver figuras 5 y 6).

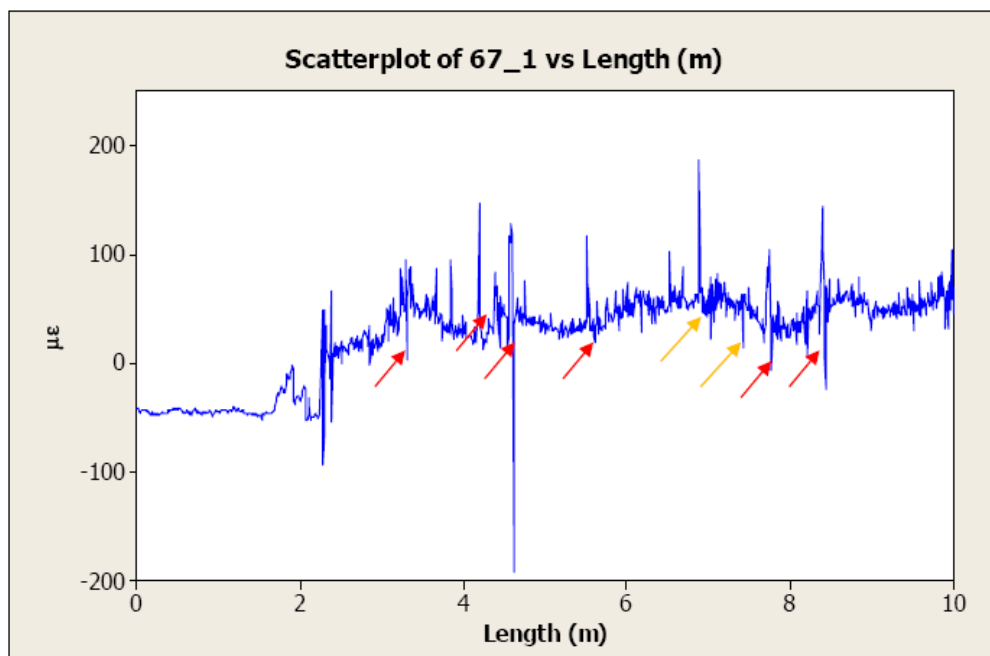


Figura 5. Calibraciones de la fibra óptica.

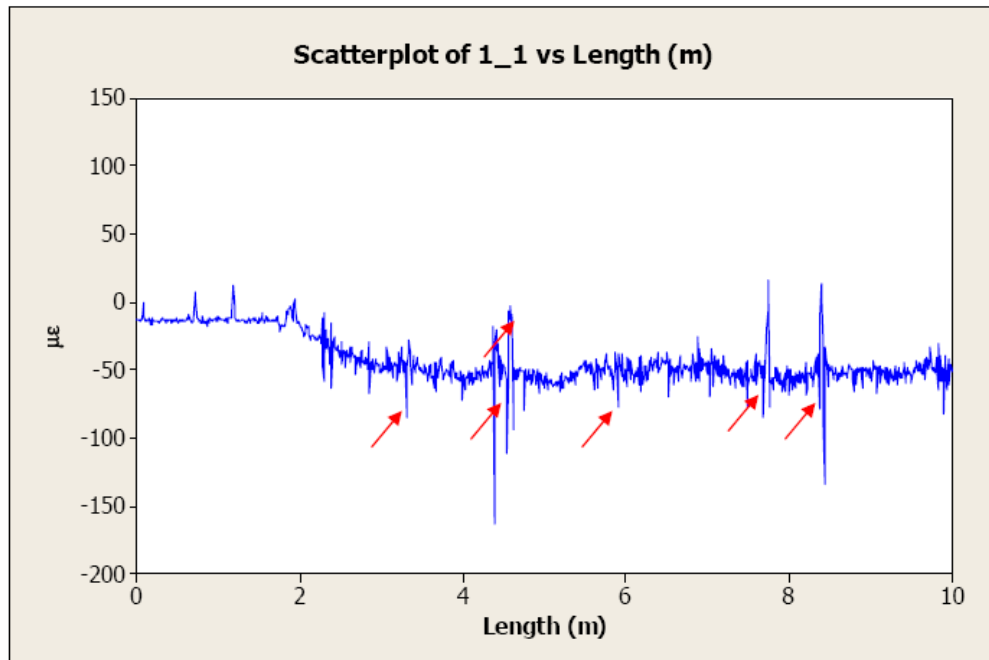


Figura 6. Calibraciones de la fibra óptica.

La instrumentación después de la reparación permitió ver la puesta en carga de los elementos de refuerzo.

En este caso la fibra utilizada fue un ODISI-A50 que se basa en el barrido de la longitud de onda de la interferometría, de forma que interroga cientos de lugares “puntos” en una única fibra óptica de forma simultánea. Se dispone pues, de una adquisición de datos de forma continua a lo largo de la fibra. Con 50 metros de longitud máxima de detección y una resolución espacial sub-milimétrica, constituyendo una herramienta fundamental para la obtención de valores de deformación y temperatura en la estructura.



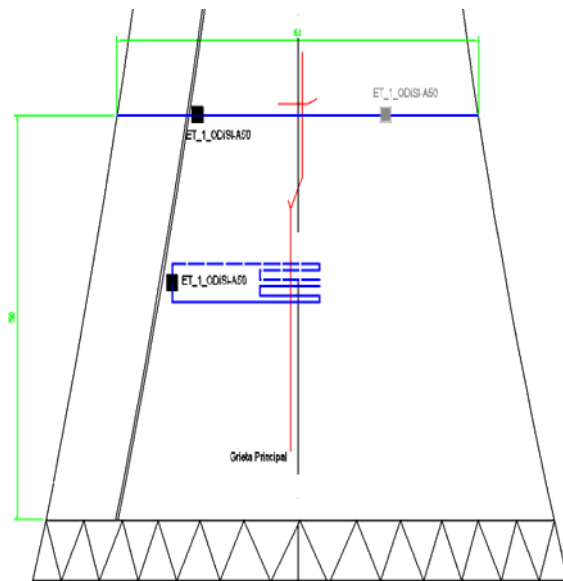


Figura 7. Disposición de la fibra óptica en la

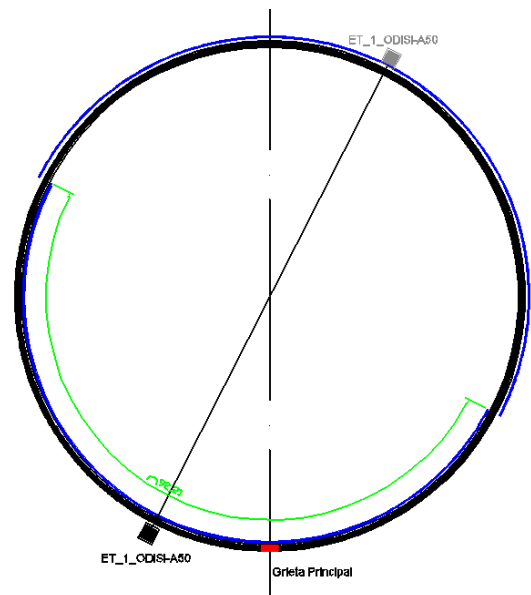


Figura 8. Esquema de posicionamiento en la lámina y en la fisura.

Correlacionado en el futuro la colocación de la fibra con la modelización de las causas del daño más relevante, se podrá aproximar un diagnóstico que dé el peso de cada una de las causas que dañan la estructura, es decir que parte de “culpa” tiene el viento, la geometría, la durabilidad, etc.

Ese buen diagnóstico permitirá hacer un adecuado plan de mantenimiento y alargar su vida útil.

### **3. CONCLUSIONES**

De forma general se ha tratado de demostrar con casuísticas diferentes que la fibra óptica es un sistema de monitorización óptimo para el conocimiento y/o el seguimiento de la salud de una estructura. Consiste en incorporar un “sistema nervioso” a los elementos que lo requieran y hablar a través de la fibra de los daños relacionados con deformaciones, temperatura, vibraciones).

Como sistema de monitorización continua es resistente al agua y a la corrosión, y soslaya problemas de interferencias electromagnéticas y corrientes parásitas que se producen en otros aparatos.

Para controlar al “paciente” cuando hacemos operaciones de reparación o sustitución, o para controlar variables de elementos que están en la UVI (laboratorios) es también un utensilio adecuado en combinación con otros que son necesarios para controlar otras variables (higrómetros, termografías, georradars, endoscopias, scanners, ...) de la estructura.

Para el diagnóstico de enfermedades estructurales, dando peso a cada una de las causas que pueden producir un daño, la fibra óptica convenientemente situada para captar las distintas acciones en sus puntos más sensibles, es una herramienta que permite validar los modelos estadísticos basados en la modelización, a partir de la instrumentación de las principales variables que definen.

### **4. AGRADECIMIENTOS**

Se agradece a los técnicos Frederic Crespo y Agustí Grau, y a las empresas Vertisub y UPC la confianza depositada para realizar alguno de los ejemplos presentados.

## 5. BIBLIOGRAFÍA

Villalba, S.; Casas, J.R.: “*Feasibility of Structural Health Monitoring of concrete structures by Optical Backscatter Reflectometer*”. Proceedings of 7<sup>th</sup> International Workshop on Structural Health Monitoring. Septiembre de 2009. Stanford University (USA).

Villalba, S.; Casas, J.R.: “*Monitorización y salud estructural. Aplicación de la fibra óptica distribuida (OBR) en estructuras de hormigón*”. Procedimientos del V Congreso de Puentes y Estructuras de ACHE. Barcelona, Octubre de 2011. pp. 313-314.

Villalba, S.; Casas, J.R.: “*Application of optical fiber distributed sensing to health monitoring of concrete structures. Mechanical Systems and Signal Processing*”. DOI: 10.1016/j.ymsp.2012.01.027.

Villalba, V.; Villalba, S.; Casas, J.R.: “*Monitorización continua – Gestión estructural. Monitorización del viaducto de la Carretera BP-1413 (Cerdanyola del Vallès)*”. Procedimientos del V Congreso de Puentes y Estructuras de ACHE. Barcelona, Octubre de 2011. pp. 401-402.