

Aplicación de las nuevas tecnologías para la gestión de la salud estructural de las construcciones

Estructuras inteligentes

Cuando se piensa en un elemento constructivo de hormigón armado, claramente se asocia a un ser inanimado, de la misma manera que una piedra también se asocia a un ser inanimado. Pero, ¿y si fuera posible dotar a este elemento de hormigón armado de un sistema nervioso que le permitiera transmitir datos sobre su estado de salud (fisuraciones, deformaciones, humedades, carbonatación, oxidación, etc.)? ¿Y si esto fuera posible realizarlo con toda la estructura de un edificio, o de un puente, o de otra construcción?



Félix Ruiz Gorrindo

Ingeniero Técnico de Obras Públicas,
Arquitecto Técnico y Máster Ingeniero Civil

Ariadna Llorens Garcia

Dra. Ingeniera Industrial

LA IMPORTANCIA DEL MANTENIMIENTO

El dotar a las estructuras de hormigón de un sistema nervioso que permitiera transmitir datos sobre su estado de salud, aportaría importantes beneficios al facilitar significativamente el mantenimiento de las construcciones y al detectar precozmente las patologías existentes. Esto que explicado de esta manera suena en cierto modo a ciencia ficción, no lo es en absoluto, pues tal y como se explica en el presente artículo, existe tecnología para poderse llevar a cabo.

Como concepto básico de partida decir que está plenamente demostrado que es mucho mejor realizar mantenimiento preventivo en las construcciones, que no realizarlo

Con el mantenimiento preventivo se evitan situaciones de riesgo para las personas, además de ser una medida más económica

e intervenir cuando hay graves lesiones (mantenimiento correctivo).

En efecto, con el mantenimiento preventivo se evitan por un lado situaciones de riesgo para las personas (lesiones muy graves que pueden producir colapsos de edificios o de partes de los mismos, desprendimientos de fachadas a vía pública, etc.).

Por otro lado, resulta más económico realizar mantenimiento preventivo de una construcción e inspecciones periódicas, que no realizar dicho mantenimiento y rehabilitarla cuando está fuertemente degradada (mantenimiento correctivo), aspecto que queda plenamente demostrado en numerosos estudios para variados tipos de construcciones, como edificios, presas, puentes, etc.

LAS ESTRUCTURAS INTELIGENTES PARA OPTIMIZAR EL MANTENIMIENTO DE LAS CONSTRUCCIONES

En este marco, puede resultar de gran interés la utilización de las nuevas tecnologías, con el fin de facilitar y optimizar la gestión de la salud estructural y el mantenimiento de las construcciones, y contribuir así de manera decisiva en alargar la vida útil de las mismas y reducir costos.

El concepto básico es dotar a la estructura (ya sea de un edificio, de un puente, etc.) de unos sensores (en especial continuos y de fibra óptica), de manera que la estructura queda dotada de un "sistema nervioso" y es capaz de transmitir datos de interés sobre su estado de salud (deformaciones, fisuraciones, tensiones, humedades, etc.). Análogamente, la estructura puede avisar a través de un sistema de voz si alguna parte de esta estructura sufre alguna lesión o disfunción que supera unos parámetros preestablecidos.

Todo lo referido queda claramente enmarcado dentro del concepto global de "Smart city" (ciudad inteligente) y de "Smart materials" (materiales inteligentes). De hecho, este tipo de estructuras referidas se suelen denominar "estructuras inteligentes".

Cabe resaltar que este interesante y útil tema es innovador pues no hay constancia de ningún edificio en el mundo que tenga estructura inteligente. Tan sólo en China, en el año 2008 se utilizó sistema de monitorización con fibra óptica durante la construcción del edificio Dongsheng Garden A5, para verificar, entre otras cosas, que las tensiones y deformaciones que se producían en los elementos estructurales durante la construcción eran coherentes con las previstas en proyecto. Pero como



Figura 1.- Vista de fibras ópticas

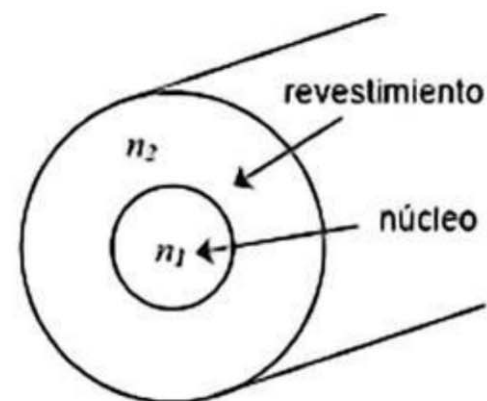


Figura 2.- Sección de una fibra óptica

se ha dicho, dicha monitorización se realizó sólo durante la construcción del edificio, no posteriormente para ayudar a gestionar el mantenimiento y la salud estructural del edificio una vez construido.

Análogamente se debe resaltar que en Cataluña se han realizado recientemente investigaciones científicas pioneras en el campo de las estructuras inteligentes, que más adelante en este artículo se explicarán de forma breve.

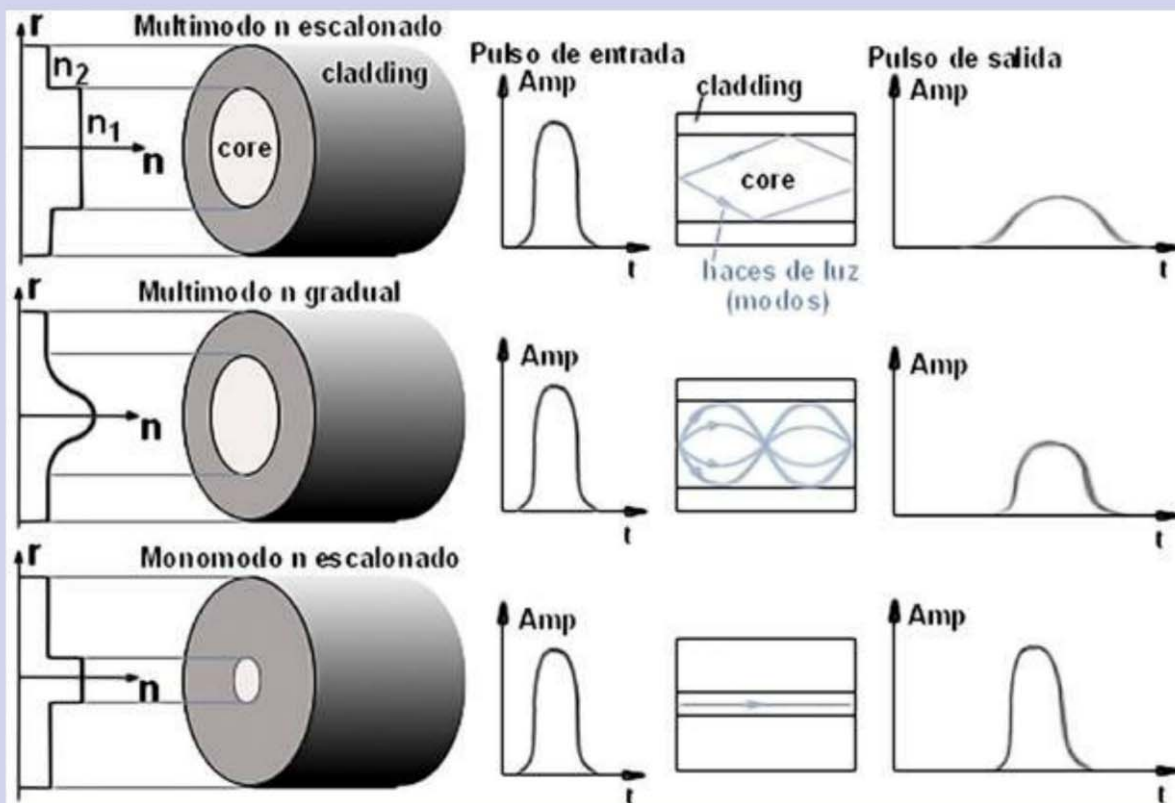
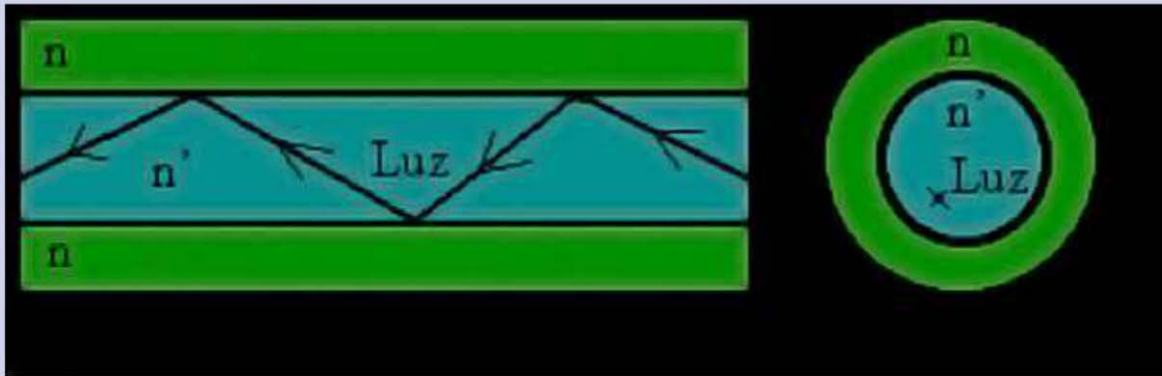
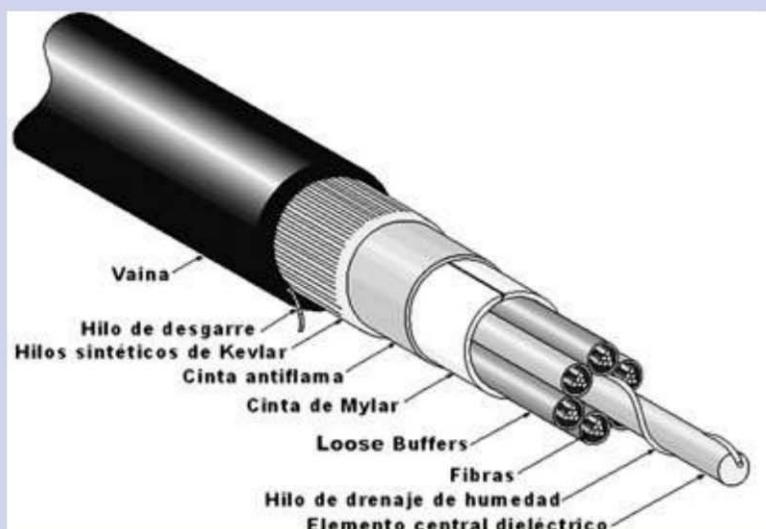


Figura 3 (arriba).- Esquema de propagación del haz de luz por el interior de la fibra

Figura 4 (sobre estas líneas).- Gráficas de funcionamiento de diferentes tipos de fibra óptica

Figura 5 (derecha).- Sección de cable con fibras ópticas



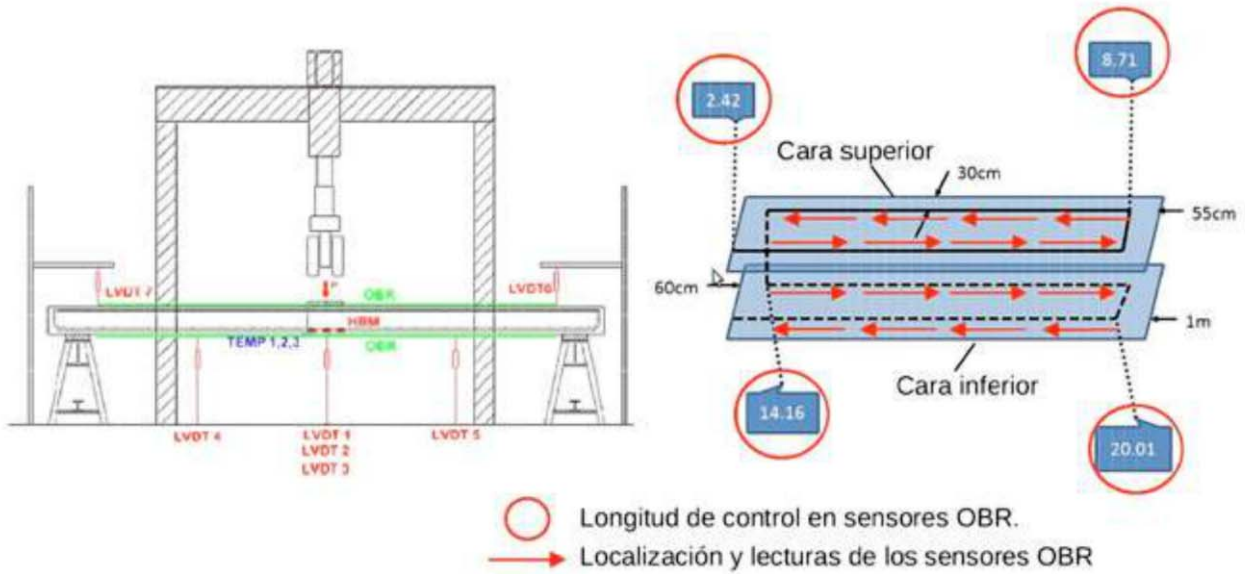


Figura 6.- Instrumentación y ubicación de los sensores OBR en la losa



Figura 7.- Ubicación de la carga y localización de los sensores OBR

En primer lugar es de interés explicar algunas nociones básicas sobre la fibra óptica, *Optical Backscatter Reflectometer* (OBR), con el fin de tener una mejor comprensión de la temática tratada.

La **fibra óptica** es un medio de transmisión empleado habitualmente en redes de datos; un hilo muy fino (de un diámetro orientativo de $125\mu\text{m}$, es decir, del grosor aproximado de un cabello) de material transparente, vidrio o materiales plásticos, por el que se envían pulsos de luz que representan los datos a transmitir. El haz de luz queda completamente confinado y se propa-

ga por el interior de la fibra con un ángulo de reflexión por encima del ángulo límite de reflexión total, en función de la ley de Snell. La fuente de luz puede ser láser o un LED.

Las fibras se utilizan ampliamente en telecomunicaciones, ya que permiten enviar gran cantidad de datos a una gran distancia, con velocidades similares a las de radio o cable. Son el medio de transmisión por excelencia al ser inmune a las interferencias electromagnéticas, también se utilizan para redes locales, en donde se necesite aprovechar las ventajas de la fibra óptica sobre otros medios de transmisión.

La fibra óptica es un medio de transmisión empleado habitualmente en redes de datos

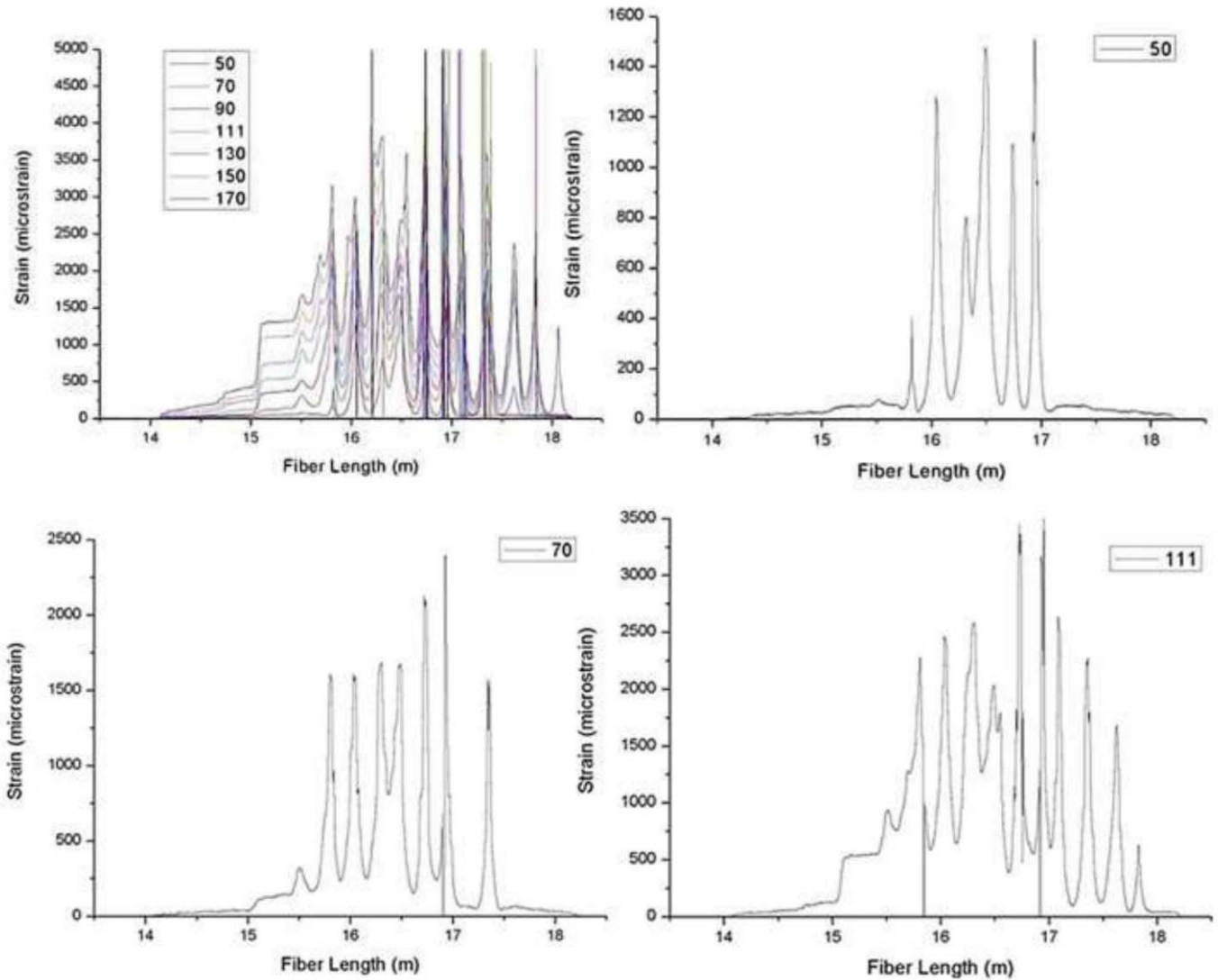


Figura 8.- Deformaciones ($\mu\epsilon$) a lo largo del 3er tramo de la fibra (cara inferior) para distintos niveles de carga

Como se ha referido, en Cataluña se han realizado recientemente investigaciones científicas pioneras en el campo de las estructuras inteligentes. Efectivamente, en el Departamento de Ingeniería de la Construcción de la ETS de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, se ha realizado recientemente una investigación por parte del doctor Joan Ramón Casas Rius y del doctor Sergi Villalba Herrero, sobre la aplicación de la fibra óptica *Optical Backscatter Reflectometer* (OBR) distribuida en estructuras de hormigón [1,2,3].

En dicha investigación se ha monitorizado una losa de hormigón ar-

mado de 5,60 m de longitud, 1,60 m de ancho y 0,285 m de espesor con sensores de OBR en sus caras superior e inferior. Estos sensores se componen de fibra óptica de la que se utiliza para transmisión de datos, utilizándose en esta investigación fibra del tipo singlemode con revestimiento epoxídico para dar más flexibilidad a la fibra. Además, se ha instrumentado el armado de refuerzo longitudinal mediante el empleo de galgas extensométricas dinámicas tipo HBM.

Una vez instalada la monitorización descrita se somete la losa a diferentes niveles de cargas hasta llegar a rotura.

Algunas de las conclusiones de esta investigación son las siguientes:

- La fibra OBR puede adherirse y emplazarse de forma satisfactoria en superficies de hormigón, a pesar de la rugosidad de la superficie por la presencia de áridos, manteniéndose esta íntegra para valores avanzados de carga, próximos a la rotura física de la sección.
- Los valores de deformación ($\mu\epsilon$) obtenidos a través de la fibra OBR se han comparado con los valores obtenidos mediante el empleo de galgas ex-

Los picos detectados por la fibra OBR coincide con la posición de las fisuras detectadas mediante la inspección visual realizada

tensométricas adheridas en la armadura, confirmando unas lecturas correctas.

– Análogamente, la fiabilidad obtenida de la experimentación realizada a través del uso de la fibra OBR se ha comparado mediante la inspección visual del proceso de aparición de las fisuras mediante el incremento de carga. Los picos obtenidos de las microdeformaciones detectadas por la fibra OBR coincide con la posición de las fisuras detectadas mediante la inspección visual realizada, hecho que ratifica el éxito del uso de la técnica OBR en la detección de la fisuración prematura, su evolución, así como la detección de una posible rotura prematura del elemento estructural. A continuación se adjuntan algunas de las gráficas que muestran lo explicado en este punto.

Una aplicación en una estructura real del sistema ha sido realiza-



Figura 9.- Estado de la fibra OBR tras el ensayo. Vista del estado de la losa tras la rotura

da por la empresa SGS Tecnos, S.A. Bajo la dirección del Doctor Vicens Villalba Herrero se ha monitorizado mediante fibra óptica continua el viaducto de la carretera BP-1413 en Cerdanyola del Vallés (Figura 10).

En dicha investigación se confirma la viabilidad del pegado de los

100 m de fibra óptica sobre la superficie del hormigón y la lectura continua durante el periodo de investigación. Gracias a su precisión y alta resolución espacial, los resultados obtenidos tienen una gran fiabilidad. La medición de deformaciones a todo lo largo de la fibra permite obtener no sólo las deformaciones



Figura 10.- Fibras longitudinales instaladas

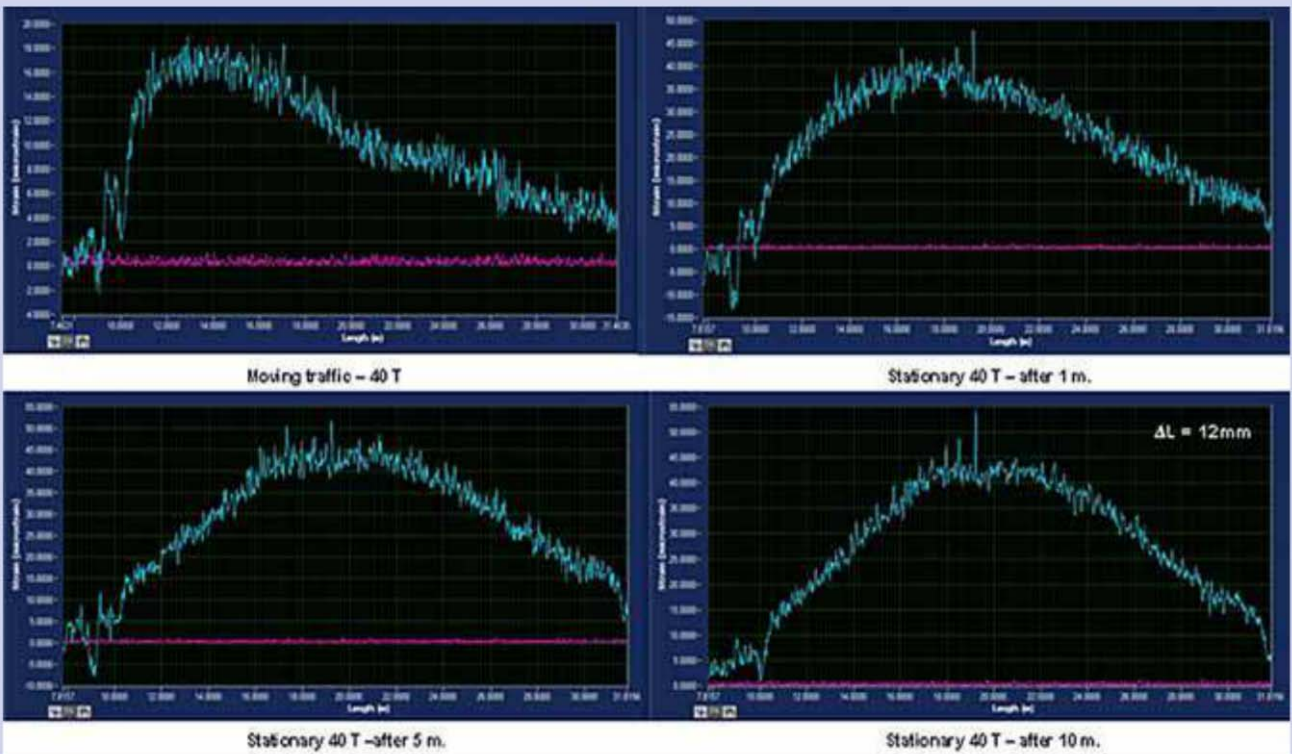


Figura 11.-Valores obtenidos durante los ensayos realizados de un vano

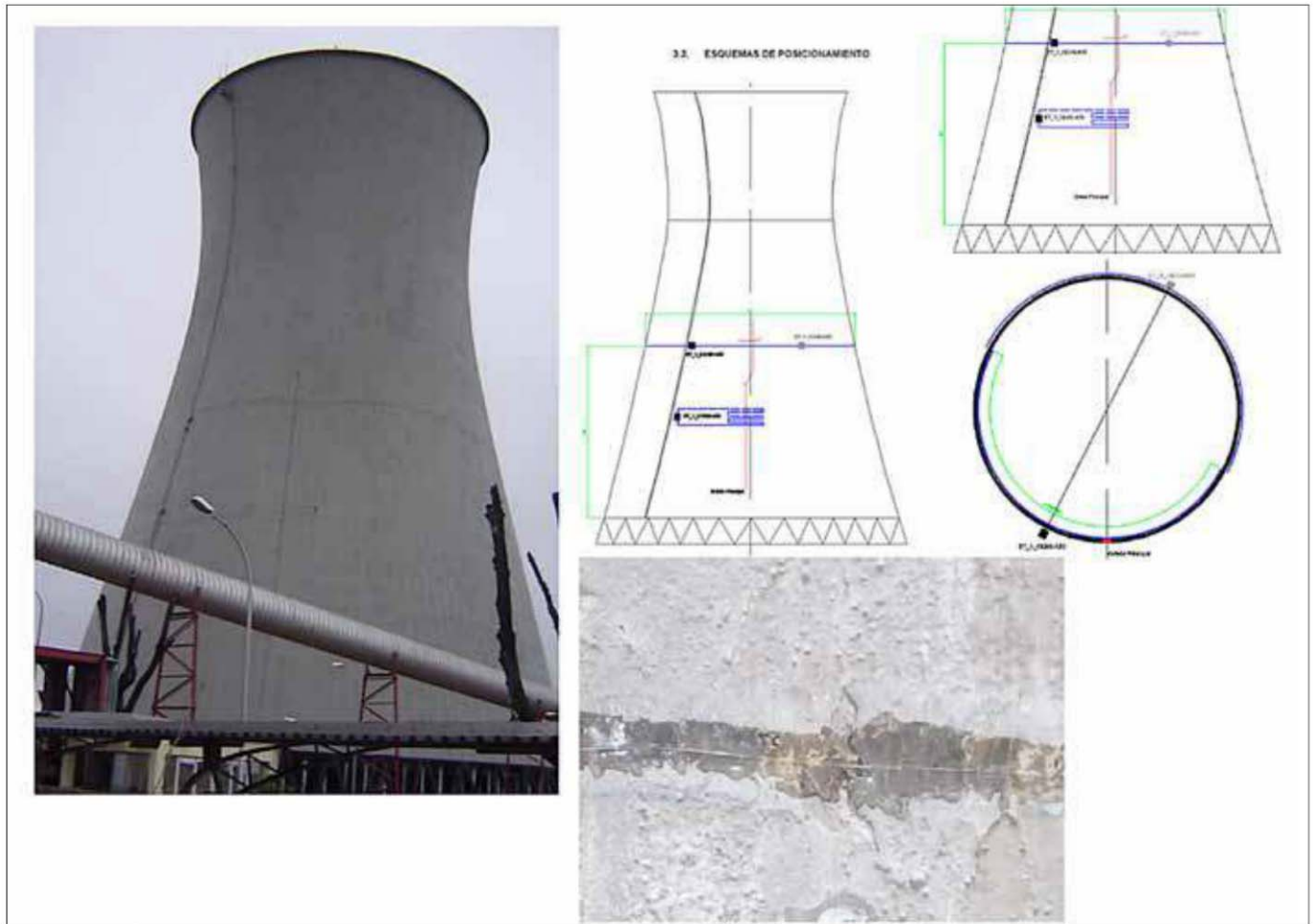


Figura 12.- Esquema de monitorización desarrollada en la estructura

en todos los puntos (Figura 11) sino también la flecha en los puntos de son de interés [4].

Actualmente, se está llevando a cabo una aplicación real de monitorización en una Torre de Refrigeración ubicada en España. Los trabajos desarrollados por las empresas Crack Ingeniería Catalana, Sl y COTCA, SA, bajo la dirección del doctor Sergi Villalba Herrero, abordan la monitorización de la Torre de Refrigeración en una longitud total de 300 metros. Los resultados obtenidos a fecha de hoy, muestran la viabilidad de adherencia en superficies relativamente rugosas de hormigón. Asimismo, a partir de los resultados obtenidos, se ha confirmado la viabilidad en la evolución de las fisuras existentes en la Torre, así como de la detección prematu-

ra en la aparición de nuevas fisuras. Los picos obtenidos de las microdeformaciones detectadas por la fibra OBR coinciden con la posición de las fisuras detectadas (Figuras 12 y 13). Las lecturas, a tiempo real, detectan las variaciones tensodeformacionales de la estructura frente a las variables (acciones) predominantes de gradiente térmico y acción eólica.

En la misma línea, también en Cataluña, se ha iniciado una línea de investigación en esta materia en la que intervienen diferentes instituciones, entre las que están Neàpolis (centro tecnológico que pertenece al ayuntamiento de Vilanova i la Geltrú) y que tiene como algunas de sus prioridades la investigación, la innovación tecnológica y la colaboración con la universidad), la EPS de

Actualmente, se está llevando a cabo una aplicación real de monitorización en una Torre de Refrigeración ubicada en España

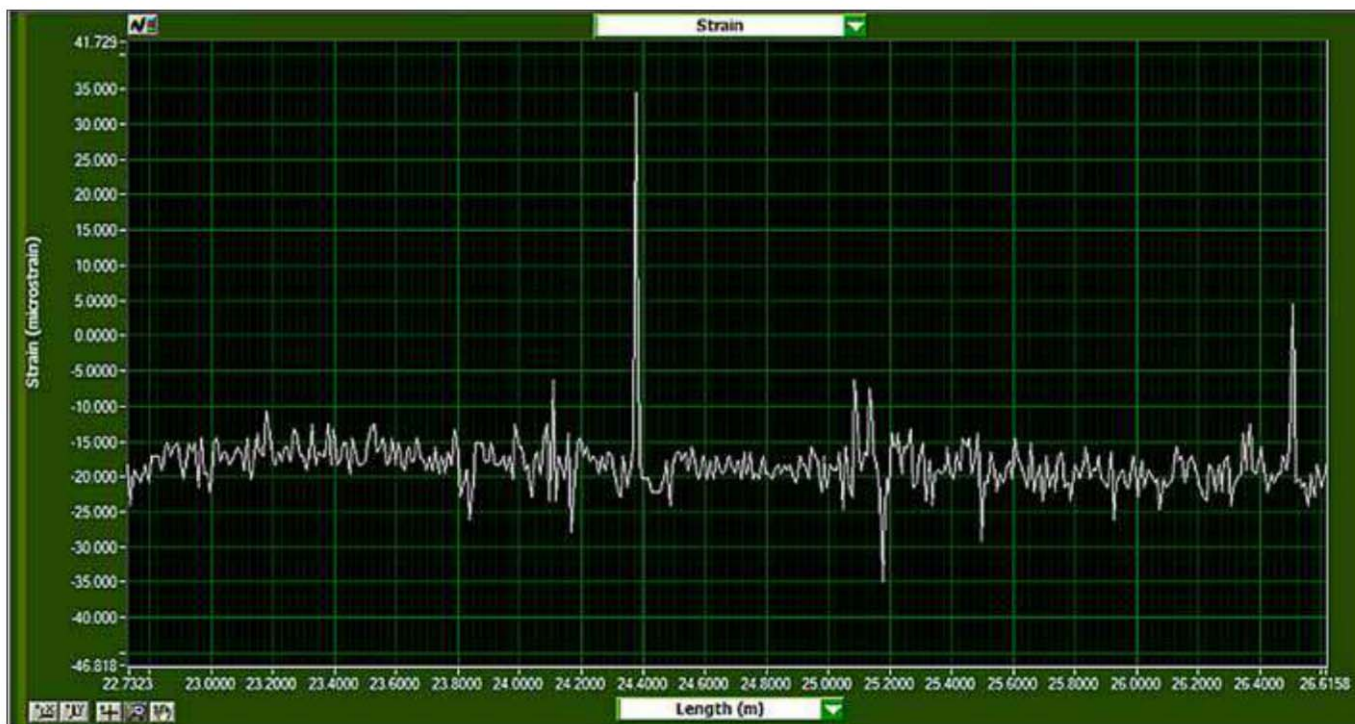


Figura 13.- Valores pico de microdeformaciones que corresponden a las grietas existentes.

Edificación de Barcelona (Ingeniería de Edificación), la ETS de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona (Departamento de Ingeniería de la Construcción), y la EPS de Ingeniería de Vilanova i la Geltrú. El objetivo final de esta línea de trabajo es aplicar las tecnologías descritas en casos reales de edificios, y verificar cómo funcionan a nivel de monitorización de la salud estructural, así como en materia de eficiencia energética y domótica.

Aparte de los sensores continuos de fibra óptica, existen otras tecnologías que pueden ser utilizadas con objeto de monitorizar las estructuras de hormigón armado, como el denominado **polvo inteligente** (en inglés, *smartdust*).

El polvo inteligente es una red inalámbrica de minúsculos sensores microelectromecánicos (MEMS), robots o dispositivos que pueden detectar señales de luz, temperatura, vibraciones, etc. Los dispositivos también se llaman motas (motes en inglés: de **remote sensing**) y se tra-

Existen otras tecnologías que pueden ser utilizadas con objeto de monitorizar las estructuras de hormigón armado, como el denominado polvo inteligente

baja en disminuir su tamaño hasta el de un grano de arena, o incluso de una partícula de polvo. Cada dispositivo contiene sensores, circuitos que computan, tecnología de comunicaciones sin hilos bidireccional y una fuente de alimentación. Los motes recopilan datos, realizan cómputos y se comunican por radio con otros en distancias que se acercan a 300 metros.

Cuando están muy juntos o apiñados, crean automáticamente redes altamente flexibles, de baja

potencia con usos que se extienden desde sistemas de control del clima a dispositivos de entretenimiento que trabajan conjuntamente con aparatos de gestión de información específica como un PDA o un iPod.

Conviene resaltar que la utilización de fibras OBR y otros tipos de sensores en los edificios se puede aprovechar para objetivos más amplios a los referidos de la monitorización estructural y la optimización de la gestión de la salud de la estructural del edificio. En efecto, esta

tecnología se puede utilizar también en el campo de la domótica y de la eficiencia energética del edificio, consiguiendo así un concepto integral de edificio inteligente, *Smart building*.

Entre los diversos profesionales de la ingeniería y la arquitectura capacitados para trabajar en el campo de las estructuras inteligentes y en el concepto más global de Smart Cities, los ingenieros de obras públicas por la formación académica recibida de alto nivel científico técnico y transversal, somos unos profesionales perfectamente indicados para desarrollar nuestras competencias en él. Este sector es un claro ejemplo que demuestra que es necesario que haya una buena colaboración y entendimiento entre diferentes profesiones, así como un significativo grado de transversalidad bidireccional entre todos los profesionales, con objeto de conseguir la máxima eficacia y ser de la máxima utilidad a la sociedad.

Por todo lo referido en el presente artículo, queda de manifiesto la posibilidad técnica de dotar de un sistema nervioso a las estructuras de las construcciones, y lo beneficioso que puede resultar la aplicación de estas tecnologías.

El segundo paso de la investigación debe pasar por **evaluar la viabilidad económica de la propuesta**, pues si se diera el caso que la misma tuviera un coste de implantación en las construcciones muy elevado, muy superior a cualquier ahorro posterior que pudiera repercutir, quedaría claro que la propuesta no sería viable aplicarla de forma generalizada, sino tan sólo en algún caso puntual para su estudio científico.

Por tanto el estudio deber ser del tipo de **coste-beneficio**, tal y como se denomina en el campo de la Economía Aplicada. En este estudio se debe analizar por un lado cuál es el incremento de coste inicial

que supone la implementación de la propuesta. Y por otro lado se debe evaluar cuál es el ahorro de dinero a lo largo del tiempo que supone la aplicación de la propuesta, la cual cosa permite establecer el **periodo de retorno de la inversión inicial**, y a partir de qué momento se pueden esperar beneficios netos.

En este marco, también es adecuado considerar los ahorros de dinero a lo largo del tiempo que representa la aplicación de las tecnologías referidas en el ámbito de la domótica y de eficiencia energética del edificio, así como aspectos relacionados con el denominado coste social.

En el caso que se demuestre de forma consistente que la propuesta es aplicable técnicamente (la cual cosa como se ha referido ya se ha demostrado en investigaciones realizadas en Cataluña), y que es interesante económicamente por ser atractivo el periodo de retorno de la inversión inicial y que el volumen de beneficios netos que se pueden obtener sea significativo, implicaría que sería de interés el aplicar estas tecnologías a las construcciones, tanto a las existentes como a las de nueva planta, contribuyendo así decisivamente a mejorar la calidad y el funcionamiento de las construcciones durante su vida útil, ahorrando dinero, y por tanto contribuyendo de esta manera a mejorar la calidad de vida de la sociedad y crear un entorno más sostenible, eficiente y respetuoso con el medio ambiente.

Así, tal vez en unos años empiece a ser frecuente la existencia de construcciones inteligentes, tanto en materia de estructuras inteligentes, como también en el caso de edificios en materia de eficiencia energética y domótica, pudiendo incluso quedar recogidos estos aspectos a nivel de normativa, en caso en que realmente se demuestre la bondad de la propuesta desde un punto de vista técnico, económico y social. ■

Los ingenieros
técnicos de
obras públicas
están muy
capacitados
para trabajar
en el campo de
las estructuras
inteligentes

REFERENCIAS

[1] VILLALBA, S.; CASAS, J.R.: Feasibility of Structural Health Monitoring of concrete structures by Optical Backscatter Reflectometer. Proceedings del 7th International Workshop on Structural Health Monitoring. Septiembre de 2009. Stanford University (USA).

[2] VILLALBA, S.; CASAS, J.R.: Monitorización y salud estructural. Aplicación de la fibra óptica distribuida (OBR) en estructuras de hormigón. Proceedings del V Congreso de Puentes y Estructuras de ACHE. Barcelona, Octubre de 2011, pp. 313-314

[3] 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.ymssp.2012.01.027

[4] VILLALBA.V; VILLALBA.S; CASAS, J.R.: Monitorización Continua – Gestión Estructural. Monitorización del viaducto de la Carretera BP-1413 (Cerdanyola del Vallés). Proceedings del V Congreso de Puentes y Estructuras de ACHE. Barcelona, Octubre de 2011, pp. 401-402.