

Les estructures intel·ligents

Aplicació de noves tecnologies per a la gestió de la salut estructural dels edificis



Fèlix Ruiz

Arquitecte tècnic i enginyer
d'obres públiques
Professor del CAATEEB



Ariadna Llorens

Enginyera industrial
Professora del Departament
d'Organització d'Empreses
de la UPC

■ La importància del manteniment

Quan es pensa en un element constructiu de formigó armat, clarament s'associa a un ésser inanimat, de la mateixa manera que una pedra també s'associa a un ésser inanimat. Però, i si fos possible dotar a aquest element de formigó armat, a aquest ésser inanimat, d'un sistema nerviós que li permetés transmetre dades sobre el seu estat de salut (fissuracions, deformacions, humitats, carbonatació, oxidació, etc)? I si això fos possible realitzar-lo amb tota l'estructura d'un edifici? Clarament aportaria importants beneficis, en facilitar significativament el manteniment dels edificis i detectar precoçment les patologies existents. Això que sona en certa manera a ciència ficció, no ho és en absolut; tal com expliquem en aquest article, existeix tecnologia per dur-ho a terme.

Com concepte bàsic de partida cal dir que està plenament demostrat que és molt millor realitzar manteniment preventiu en els edificis, que no realitzar-lo i intervenir quan hi ha greus lesions (manteniment correctiu). En efecte, amb el manteniment preventiu s'eviten d'una banda situacions de risc per a les persones (lesions molt greus que poden produir col·lapses d'edificis o de parts dels mateixos, desprendiments de façanes a via pública, etc.).

D'altra banda resulta més econòmic realitzar manteniment d'un edifici i inspeccions periòdiques, que no realitzar

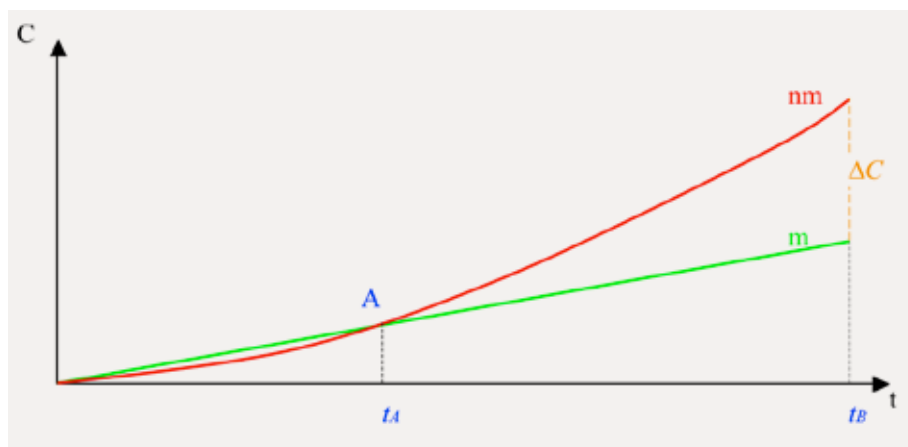


FIG. 1. RELACIÓ COST ACUMULAT (C) - TEMPS (T), EN LES OPCIONS DE MANTENIMENT (O MANTENIMENT PREVENTIU) I DE NO MANTENIMENT (O MANTENIMENT CORRECTIU)

manteniment i rehabilitar-lo quan està fortament degradat. Aquest concepte queda reflectit en la següent gràfica que es mostra en la figura 1.

En aquesta gràfica s'aprecia que mentre en l'opció de manteniment (m), l'evolució del cost acumulat és lineal, atès que es van realitzant petites operacions de manteniment periòdic que suposen petits costos periòdics, en l'opció de no manteniment (nm) es produeix una corba de tipus exponencial, ja que com més gran és t, és a dir com més temps ha passat sense que en l'edifici s'hagi realitzat cap operació de manteniment, major serà el cost per a retornar l'edifici a un bon estat de salut, i com més degradat estigui l'edifici, tant més ràpidament es degradarà, produint d'aquesta manera que la corba

sigui de tipus exponencial.

És a dir, que en un edifici on no s'hagi fet manteniment, el cost per a resoldre les patologies importants que té és clarament superior al cost acumulat que hagués resultat de fer operacions periòdiques de manteniment en aquest edifici. Aquesta diferència de cost es visualitza clarament en la gràfica en (ΔC), que en tal gràfica es dona per a tB.

El moment tA en la gràfica correspon al cost acumulat de fer manteniment en un edifici és el mateix cost que si en l'edifici no s'ha fet cap manteniment, i per a tA es decideix intervenir per a deixar-lo en correcte estat. Si bé el cost és el mateix en les dues opcions, cal dir que en l'opció de manteniment presenta l'avantatge que el cost s'ha anat pagant en petites quantitats periòdiques, mentre que en l'opció sense manteniment tot el cost s'ha d'assumir de cop.

Per a tA, tB i ΔC no es dona cap valor numèric, ja que la gràfica representa el cas general, i aquest valor numèric depèn de cada cas particular d'edifici. De fet el concepte d'aquesta gràfica també és d'aplicació a altres tipus de construccions diferents als edificis, com són preses, ponts, carreteres, murs de contenció, etc.

Cal dir que la recta que defineix l'opció de manteniment (m), en realitat és una simplificació de la realitat. En el cas real

(1) En la curva (nm) de no manteniment o manteniment correctiu, s'ha eliminat la taxa de disfuncions que es poden produir en les primeres edats de l'edifici (per errades de projecte, d'execució, defectes dels materials, etc.). Si no s'elimina aquesta taxa de disfuncions el resultat és la denominada corba de banyera o corba de Davies.

A Catalunya s'han realitzat recentment investigacions científiques pioneres en el camp de les estructures intel·ligents

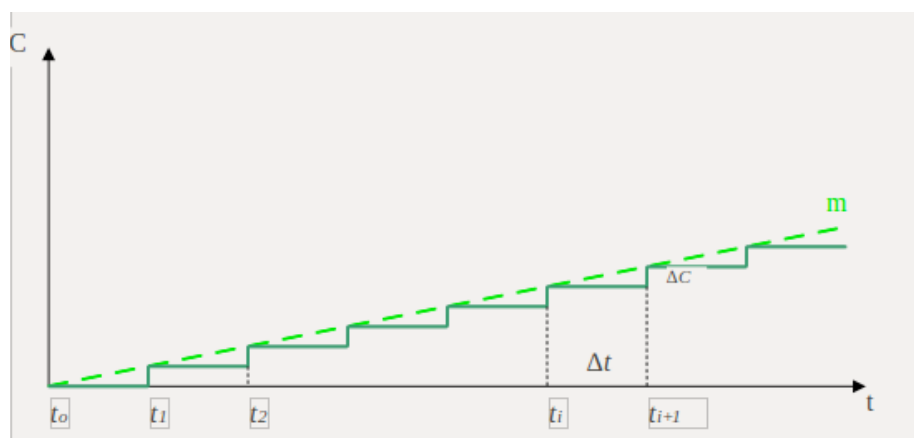


FIG. 2. GRÀFICA ESGRAONADA DE COST ACUMULAT EN L'OPCIÓ DE MANTENIMENT PERIÒDIC

de realitzar manteniment periòdic de l'edifici, es realitzen operacions de manteniment que es tradueixen en petites despeses amb certa periodicitat. Aquesta evolució real escalonada queda representada en la següent Figura 2.

En aquesta gràfica la corba real cost-temps en l'opció manteniment es la corba esgraonada, quedant simplificada per la recta (m). Així, en la corba esgraonada, per a cada període de temps d'anàloga durada (Δt) es produeix una despesa o increment de cost (ΔC) d'anàloga quantitat a les anteriors², i aquestes despeses es produeixen en cada t_i , que és quan es realitzen les operacions periòdiques de manteniment.

Les estructures intel·ligents per a optimitzar el manteniment dels edificis

En aquest marc, pot resultar de gran interès la utilització de les noves tecnologies, amb la finalitat de facilitar i optimitzar la gestió de la salut estructural i el manteniment dels edificis, i contribuir així de manera decisiva a allargar la vida útil dels mateixos i reduir costos.

El concepte bàsic és dotar a l'estructura d'un edifici d'uns sensors (especialment continus i de fibra òptica), de manera que l'estructura queda dotada d'un sistema nerviós i és capaç de transmetre dades d'interès sobre el seu estat de salut (deformacions, fissuracions, tensions, humitats, etc.). Anàlogament, l'estructura pot avisar a través d'un sistema de veu si alguna part d'aquesta estructura pateix alguna lesió que supera uns paràmetres preestablerts. Tot això

queda clarament emmarcat dintre del concepte global de *smart city* (ciutat intel·ligent) i de *smart materials* (materials intel·ligents). De fet, aquest tipus d'estructures referides se solen denominar *estructures intel·ligents*.

Cal ressaltar que aquest interessant i útil tema és innovador ja que no hi ha constància de cap edifici en el món que tingui estructura intel·ligent. Tan sols a la Xina, en l'any 2008 es va utilitzar sistema de monitoratge amb fibra òptica durant la construcció de l'edifici Dongsheng Garden A5, per a verificar, entre altres coses, que les tensions i deformacions que es produïen en els elements estructurals durant la construcció eren coherents amb les previstes en projecte. Però com s'ha dit, aquest monitoratge es va realitzar només durant la construcció de l'edifici, no posteriorment per a ajudar a gestionar el manteniment i la salut estructural de l'edifici una vegada construït.

Anàlogament s'ha de ressaltar que a Catalunya s'han realitzat recentment investigacions científiques pioneres en el camp de les estructures intel·ligents, que expliquem més endavant.

Fibra òptica

En primer lloc és d'interès explicar algunes nocions bàsiques sobre la fibra òptica, Optical Backscatter Reflectometer (OBR). La fibra òptica és un mitjà de transmissió emprat habitualment en xarxes de dades;

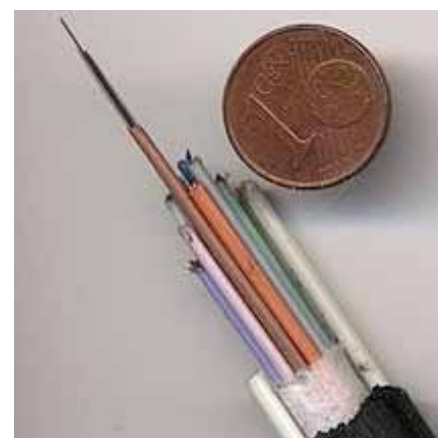


FIG. 3. VISTA DE FIBRES ÒPTIQUES

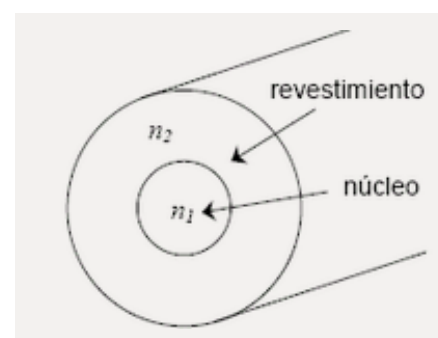


FIG. 4. SECCIÓ DE UNA FIBRA ÒPTICA

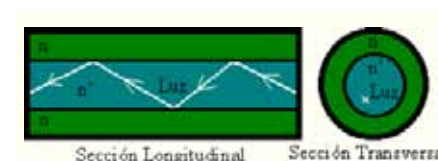


FIG. 5. ESQUEMA DE PROPAGACIÓ DEL FEIX DE LLUM PER L'INTERIOR DE LA FIBRA

un fil molt fi (d'un diàmetre orientatiu de $125\mu\text{m}$, és a dir, del gruix aproximat d'un cabell) de material transparent, vidre o materials plàstics, pel qual s'envien polsos de llum que representen les dades a transmetre. El feix de llum queda completament confinat i es propaga per l'interior de la fibra amb un angle de reflexió per sobre de l'angle límit de reflexió total, en funció de la llei de Snell. La font de llum pot ser làser o un LED.

Les fibres s'utilitzen àmpliament en telecomunicacions, ja que permeten enviar gran quantitat de dades a una gran distància, amb velocitats similars a les de ràdio o cable. Són el mitjà de trans-

(2) S'entén que en aquesta afirmació no es considera l'increment anual de preus de consum.

La tecnologia OBR es pot utilitzar també en el camp de la domòtica i de l'eficiència energètica aconseguint així un concepte integral d'edifici intel·ligent

missió per excel·lència al ser immune a les interferències electromagnètiques, també s'utilitzen per a xarxes locals, on es necessita aprofitar els avantatges de la fibra òptica sobre altres mitjans de transmissió.

Com s'ha dit, a Catalunya s'han realitzat recentment investigacions científiques pioneres en el camp de les estructures intel·ligents. Efectivament, en el Departament d'Enginyeria de la Construcció de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona, s'ha realitzat recentment una investigació per part del doctor Joan Ramon Cases Rius i del doctor Sergi Villalba Herrero, sobre l'aplicació de la fibra òptica Optical Backscatter Reflectometer (OBR) distribuïda en estructures de formigó [1,2,3].

En aquesta investigació s'ha monitoritzat una llosa de formigó armat de 5,60m de longitud, 1,60m d'amplada i 0,285m d'espessor amb sensors d'OBR en les seves cares superior i inferior. A més, s'ha instrumentat l'armat de reforç longitudinal mitjançant l'ocupació de galges extensomètriques dinàmiques tipus HBM.

Una vegada instal·lat el monitoratge descrit se sotmet la llosa a diferents nivells de càrregues fins a arribar a trencament.

Conclusions

Algunes de les conclusions d'aquesta investigació són els següents:

- La fibra OBR pot adherir-se i emplaçar-se de forma satisfactòria en superfícies de formigó, a pesar de la regositat de la superfície per la presència d'àrids, mantenint-se aquesta íntegra per a valors avançats de càrrega, pròxims al trencament físic de la secció.
- Els valors de deformació ($\mu\epsilon$) obtinguts a través de la fibra OBR s'han comparat amb els valors obtinguts mitjançant l'ocupació de galges extensomètriques adherides en l'armadura, confirmant unes lectures correctes.
- Anàlogament, la fiabilitat obtinguda de l'experimentació realitzada a través de l'ús de la fibra OBR s'ha comparat mitjançant la inspecció visual del procés d'aparició de les fissures mitjançant l'increment de càrrega. Els becs obtinguts de les microdeformacions

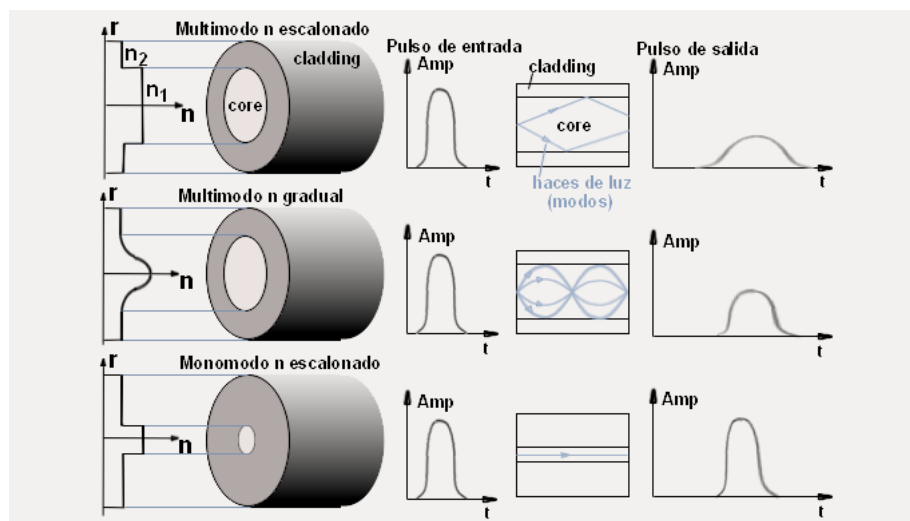


FIG. 6. GRÀFICS DE FUNCIONAMENT DE DIFERENTS TIPUS DE FIBRA ÒPTICA

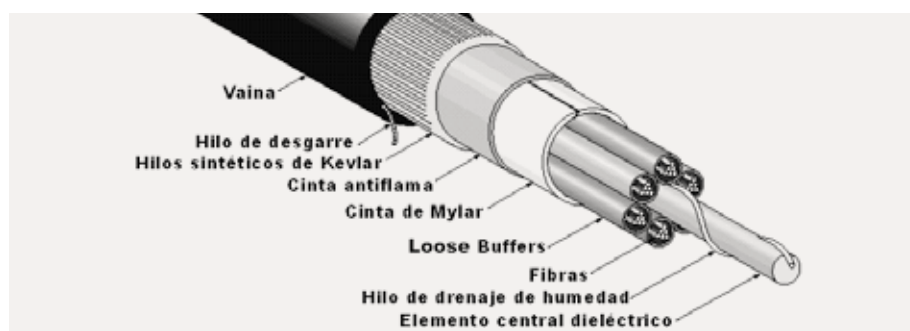


FIG. 7. SECCIÓ DE CABLE AMB FIBRES ÒPTIQUES

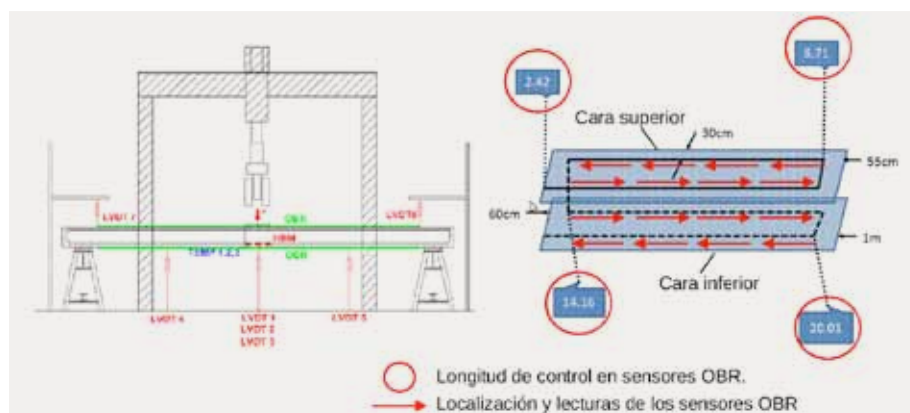


FIG. 8. INSTRUMENTACIÓ I UBICACIÓ DELS SENSORS OBR EN LA LLOSA

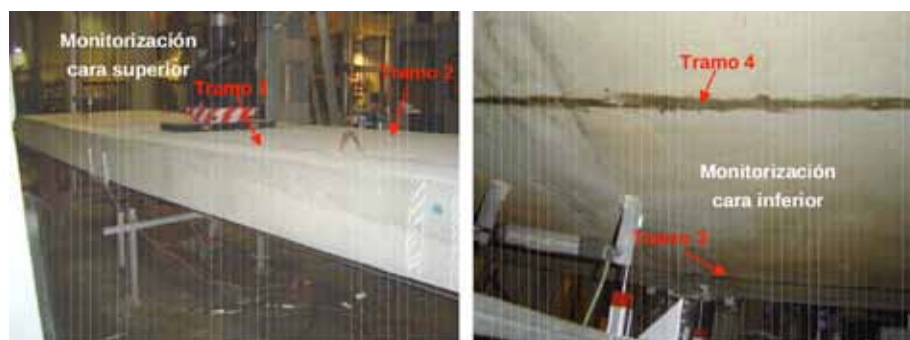


FIG. 9. INSTRUMENTACIÓ I UBICACIÓ DELS SENSORS OBR EN LA LLOSA

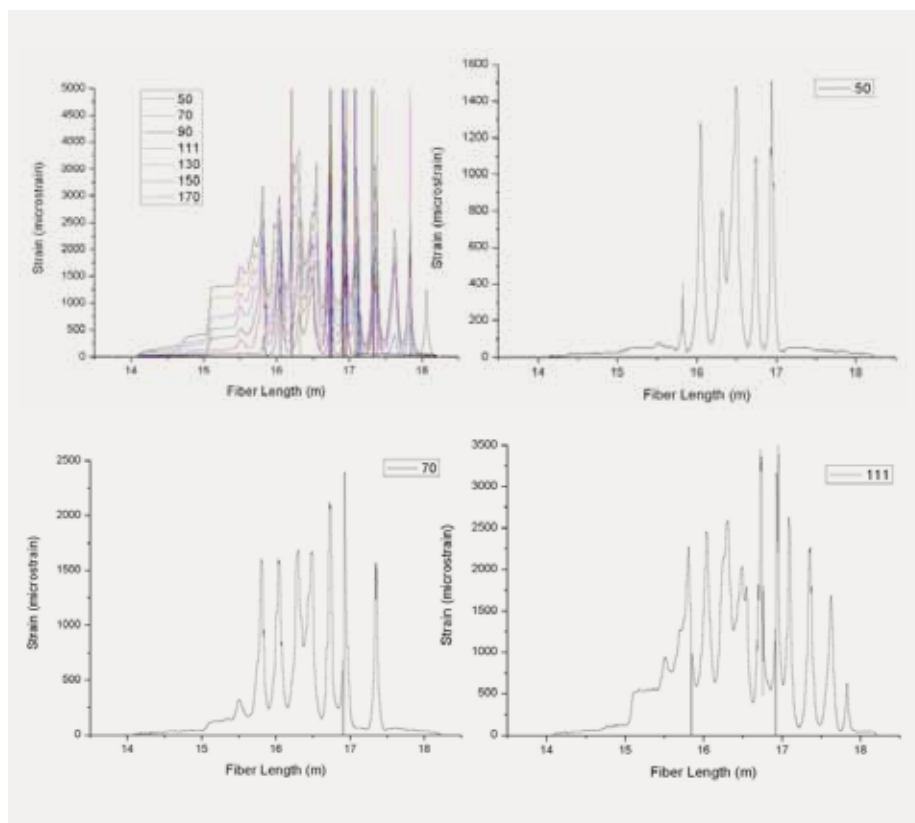


FIG. 10. DEFORMACIONS ($\mu\epsilon$) AL LLARG DEL 3R TRAM DE LA FIBRA (CARA INFERIOR) PER A DIFERENTS NIVELLS DE CÀRREGA



FIG. 11. ESTAT DE LA FIBRA OBR DESPRÉS DE L'ASSIG. VISTA DE L'ESTAT DE LA LLOSA DARRERA DE LA RUPTURA

detectades per la fibra OBR coincideix amb la posició de les fissures detectades mitjançant la inspecció visual realitzada, fet que ratifica l'èxit de l'ús de la tècnica OBR en la detecció de la fissuració prematura, la seva evolució, així com la detecció d'un possible trencament prematur de l'element estructural.

Una aplicació en una estructura real del sistema ha estat realitzada per l'empresa SGS Tecnos, sota la direcció del doctor Vicens Villalba Herrero s'ha monitoritzat mitjançant fibra òptica contínua el viaducte de la carretera BP-1413 a

Cerdanyola del Vallès (figura 12).

En aquesta investigació es confirma la viabilitat del pegat dels 100m de fibra òptica sobre la superfície del formigó i la lectura contínua durant el període d'investigació. Gràcies a la seva precisió i alta resolució espacial, els resultats obtinguts tenen una gran fiabilitat. El mesurament de deformacions a tot el llarg de la fibra permet obtenir no només

les deformacions en tots els punts (figura 13) sinó també la fletxa en els punts que són d'interès [4].

Aquestes conclusions són perfectament aplicables a les estructures de formigó armat d'edificis.

Actualment, s'està portant a terme una aplicació real de monitoratge en una torre de refrigeració situada a Espanya. Els treballs desenvolupats per les empreses Crack Enginyeria Catalana i COTCA sota la direcció del doctor Sergi Villalba Herrero, aborden el monitoratge de la torre de refrigeració en una longitud total de 300 metres. Els resultats obtinguts a data d'avui, mostren la viabilitat d'adherència en superfícies relativament rugoses de formigó. Així mateix, a partir dels resultats obtinguts, s'ha confirmat la viabilitat en l'evolució de les fissures existents en la torre, així com de la detecció prematura en l'aparició de noves fissures. Els becs obtinguts de les microdeformacions detectades per la fibra OBR coincideixen amb la posició de les fissures detectades (figures 14 i 15). Les lectures, a temps real, detecten les variacions tenso-deformacionals de l'estructura enfront de les variables (accions) predominants de gradient tèrmic i acció eòlica.

En la mateixa línia, també a Catalunya, s'ha iniciat una línia d'investigació en aquesta matèria en la qual intervien diferents institucions, entre les quals estan Neàpolis (centre tecnològic que pertany a l'ajuntament de Vilanova i la Geltrú i que té com algunes de les seves prioritats la investigació, la innovació tecnològica i la col·laboració amb la universitat), l'Escola Politècnica Superior d'Edificació de Barcelona (Enginyeria d'Edificació), l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona (Departament d'Enginyeria de la Construcció), i l'EPS d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú. L'objectiu final d'aquesta línia de treball és aplicar les tecnologies descrites en casos reals d'edificis, i verificar com funcionen a nivell de monitoratge de la salut estructural, així com en matèria d'eficiència energètica i

Queda de manifest la possibilitat tècnica de dotar d'un sistema nerviós a les estructures dels edificis, i els beneficis que pot resultar l'aplicació d'aquestes tecnologies

domòtica.

A part dels sensors continus de fibra òptica, existeixen altres tecnologies que poden ser utilitzades a fi de monitoritzar les estructures de formigó armat, com la denominada pols intel·ligent (en anglès, *smartdust*), tot i que en principi en aquest cas el seu ús seria per a monitoritzar estructures d'edificis de nova construcció, no d'edificis existents.

La pols intel·ligent és una xarxa sense fil de minúsculs sensors microelectromecànics (MEMS), robots o dispositius que poden detectar senyals de llum, temperatura, vibracions, etc. Els dispositius també es diuen *motes* (sobrenom en anglès: de *remote sensing*) i es treballa a disminuir la seva grandària fins al d'un òbol, o fins i tot d'una partícula de pols. Cada dispositiu conté sensors, circuits que computen, tecnologia de comunicacions sense fils bidireccional i una font d'alimentació. Els *motes* recopilen dades, realitzen còmput i es comuniquen per ràdio amb uns altres en distàncies que s'acosten a 300 metres.

Quan estan molt junts o apinyats, creen automàticament xarxes altament flexibles, de baixa potència amb usos que s'estenen des de sistemes de control del clima a dispositius d'entreteniment que treballen conjuntament amb aparells de gestió d'informació específica com un PDA o un iPod.

Convé ressaltar que la utilització de fibres OBR i altres tipus de sensors en els edificis es pot aprofitar per a objectius més amplis als del monitoratge estructural i l'optimització de la gestió de la salut de l'estructural de l'edifici. En efecte, aquesta tecnologia es pot utilitzar també en el camp de la domòtica i de l'eficiència energètica de l'edifici, aconseguint així un concepte integral d'edifici intel·ligent, *smart building*.

Com és evident, els aparelladors, arquitectes tècnics i enginyers d'edificació, per la formació acadèmica rebuda d'alt nivell científic tècnic i transversal, som uns professionals perfectament indicats per a intervenir en el camp de l'eficiència energètica dels edificis i de la domòtica. Anàlogament, altres professions també són idònies per a intervenir en aquesta matèria, sent aquest un dels nombrosíssims exemples que mostren que és necessari que hi hagi una bona

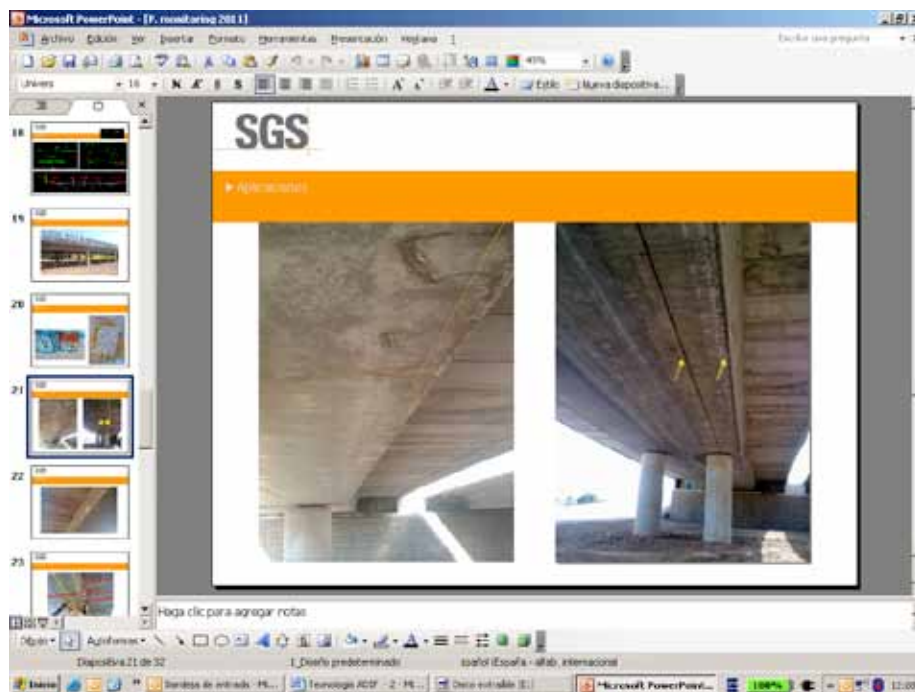


FIG. 12. FIBRES LONGITUDINALS INSTAL·LADES

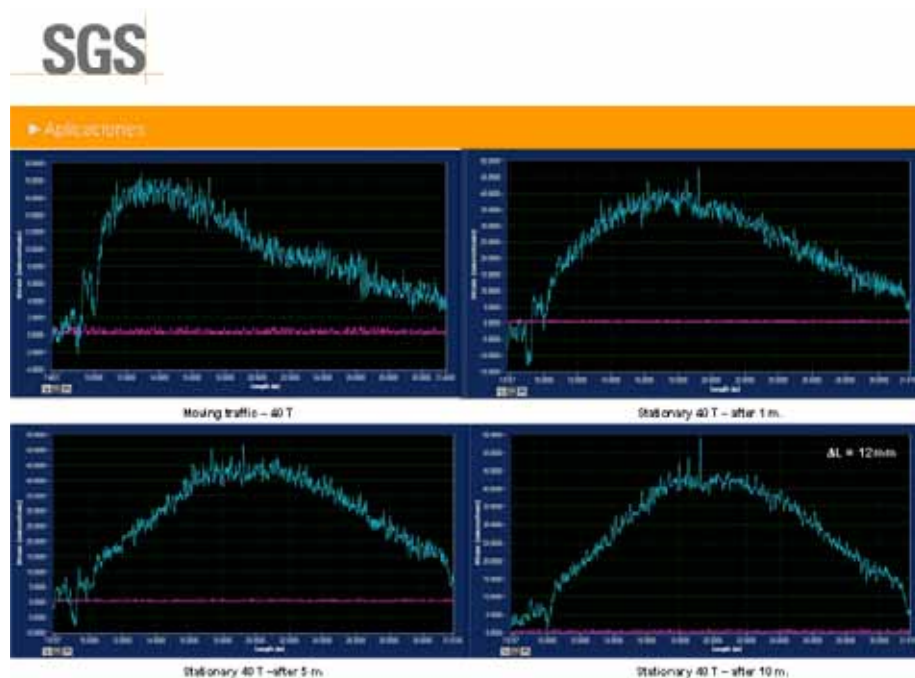


FIG. 13. VALORS OBTINGUTS DURANT ELS ASSAIGS REALITZATS D'UN VANO

col·laboració i enteniment entre diferents professions, així com significatiu grau de transversalitat bidireccional entre aquestes, a fi d'aconseguir la màxima eficàcia i ser de la màxima utilitat a la societat.

Queda de manifest la possibilitat tècnica de dotar d'un sistema nerviós a les estructures dels edificis, i el beneficiós que pot resultar l'aplicació d'aquestes tecnologies.

Viabilitat econòmica

El segon pas de la investigació ha de passar per avaluar la viabilitat econòmica de la proposta, ja que en cas que la mateixa tingués un cost d'implantació en els edificis molt elevat, molt superior a qualsevol estalvi posterior que pogués repercutir, quedaria clar que la proposta no seria viable aplicar-la de forma generalitzada en els edificis, sinó tan sols en algun cas

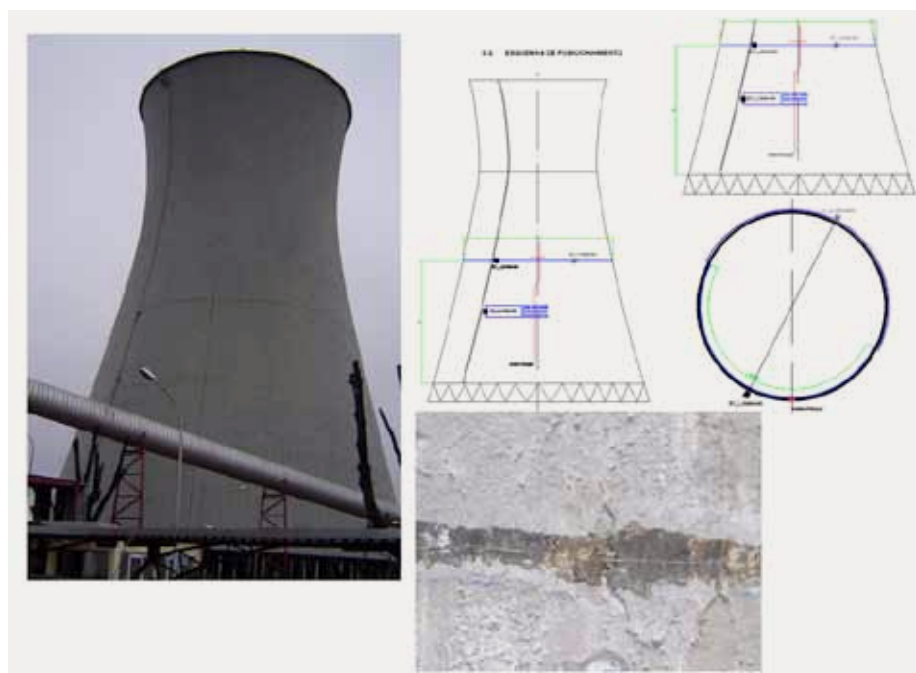


FIG. 14. ESQUEMA DE MONITORITZACIÓ DESENVOLUPADA EN LA ESTRUCTURA

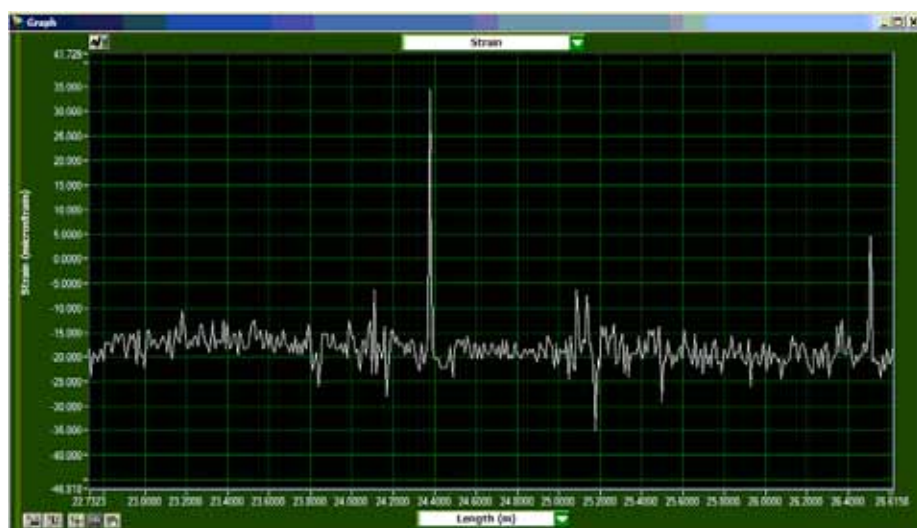


FIG. 15. VALORS PIC DE MICRODEFORMACIONS QUE CORRESPONEN A LAS ESQUERDES EXISTENTS

puntual per al seu estudi científic.

Per tant l'estudi ha de ser del tipus de cost-benefici, tal com es denomina en el camp de l'economia aplicada. En aquest estudi s'ha d'analitzar d'una banda quin és l'increment de cost inicial que suposa la implementació de la proposta, i d'altra banda s'ha d'avaluar quin és l'estalvi de diners al llarg del temps que suposa l'aplicació de la proposta, la qual cosa

permet establir el període de tornada de la inversió inicial, i a partir de quin moment es poden esperar beneficis nets.

En aquest marc, també és adequat considerar els estalvis de diners al llarg del temps que representa l'aplicació d'aquestes tecnologies en l'àmbit de la domòtica i d'eficiència energètica de l'edifici, així com aspectes relacionats amb el denominat cost social.

En el cas que es demostrï de forma consistent que la proposta és aplicable tècnicament i que és interessant econòmicament per ser atractiu el període de tornada de la inversió inicial i que el volum de beneficis nets que es poden obtenir sigui significatiu, implicaria que seria d'interès l'aplicar aquestes tecnologies al conjunt dels edificis, tant als existents com als de nova construcció, contribuint així decisivament a millorar la qualitat i el funcionament dels edificis durant la seva vida útil, estalviant diners, i per tant contribuint d'aquesta manera a millorar la qualitat de vida de la societat i crear un entorn més sostenible, eficient i respectuós amb el medi ambient.

Així, tal vegada en uns anys comenci a ser freqüent l'existència d'edificis intel·ligents, tant en matèria d'estructures intel·ligents, com en matèria d'eficiència energètica i domòtica, podent fins i tot quedar recollits aquests aspectes a nivell de normativa, en cas que realment es demostrï la bondat de la proposta des d'un punt de vista tècnic i econòmic. ■

Referències

- [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

Els aparelladors són professionals perfectament indicats per a intervenir en el camp de l'eficiència energètica dels edificis i de la domòtica.