

# Anàlisi cost-benefici de les estructures intel·ligents

Félix Ruiz

*Arquitecte tècnic, col·legiat 7.075, doctor enginyer civil i professor del CAATEEB*

Pau Martí

*Doctor enginyer en Informàtica, professor de la UPC*

Ariadna Llorens

*Doctora enginyera industrial, professora de la UPC*



FIGURA 1. IMATGE DE L'EDIFICI NEÀPOLIS A VILANOVA I LA GELTRÚ

Quan es pensa en un element constructiu de formigó armat, s'associa clarament a un ésser inanimat, de la mateixa manera que una pedra també s'associa a un ésser inanimat. Però, i si fos possible dotar aquest element de formigó armat, 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 pogués realitzar-se amb tota l'estructura d'un edifici?

Això aportaria clarament beneficis importants, atès que facilita significativament el manteniment dels edificis i permet detectar precoçment les patologies existents. Explicat així, sona en certa manera a ciència ficció, però no ho és en absolut.

En un article anterior publicat en aquesta revista (Ruiz i Llorens, 2012), ja es va posar de manifest la possibilitat tècnica de dotar d'un sistema nerviós les estructures dels edificis, i com de beneficiós resultaria aplicar aquestes tecnologies. El concepte bàsic explicat era dotar l'estructura d'uns sensors (en especial continus i de fibra òptica), de manera que l'estructura quedava dotada d'un «sistema nerviós» i era capaç de transmetre dades d'interès sobre el seu estat de salut (deformacions, fissuracions, oxidacions, etc.). En l'article esmentat també es posaven alguns exemples de l'ús d'aquesta tecnologia i de la

seva recerca científica al Departament d'Enginyeria de la Construcció de l'ETS d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona.

Tot el que hem explicat queda emmarcat clarament dins del concepte global *smart city* (ciutat intel·ligent) i *smart materials* (materials intel·ligents). De fet, aquest tipus d'estructures esmentades solen denominar-se estructures intel·ligents.

Anàlogament, tal com es deia en la part final de l'article anterior, el segon pas de la recerca ha de passar per avaluar la viabilitat econòmica de la proposta, atès que si aquesta tingués un cost d'implantació als edificis molt elevat, molt superior a qualsevol estalvi posterior que pogués repercutir, quedaria clar que no seria viable aplicar la proposta als edificis de manera generalitzada, sinó només en algun cas puntual per al seu estudi científic.

Per tant, l'estudi ha de ser del tipus cost-benefici, tal com es denomina en el camp de l'Economia Aplicada. En aquest estudi cal analitzar, d'una banda, quin és l'increment de cost inicial que suposa la implementació de la proposta, i de l'altra, cal 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 retorn de la inversió inicial i a partir de quin moment poden esperar-se'n beneficis nets.

L'objecte d'aquest article és precisament fer l'anàlisi cost-benefici de les estructures intel·ligents, per avaluar si el seu ús és factible des d'un punt de vista econòmic. El que s'exposa és un resum de la línia de recerca feta l'any 2015 entre Neàpolis (centre tecnològic que pertany a l'ajuntament de Vilanova i la Geltrú i que té com a algunes de les seves prioritats la recerca, la innovació tecnològica, l'emprenedoria i la col·laboració amb la universitat), l'EPS d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú i l'ETS d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona (Departament d'Enginyeria de la Construcció). Aquesta recerca es va dur a terme en el marc d'un projecte EPS (European Project Semester), desenvolupat en anglès, en el qual van participar 4 estudiants estrangers d'enginyeria en fase de projecte final de carrera, que eren dels països següents: Alemanya (2), França i Holanda.

En cas que es demostrés de manera consistent que la proposta és aplicable tècnicament (la qual cosa, com ja hem esmentat, s'ha demostrat en recerques fetes a Catalunya), i que és interessant econòmicament, perquè el període de retorn de la inversió inicial és atractiu i el volum de beneficis nets que se'n poden obtenir és significatiu, implicaria que seria d'interès aplicar aquestes tecnologies al conjunt dels edificis, tant als existents com als de nova construcció. D'aquesta manera es contribuiria a millorar la qua-

litat i el funcionament dels edificis durant la seva vida útil, estalviant diners, i per tant contribuint a millorar la qualitat de vida de la societat i a crear un entorn més sostenible, eficient i respectuós amb el medi ambient.

## Metodologia

Per fer aquest treball de recerca, s'han seleccionat dos edificis per fer la proposta de sensoritzar-ne les estructures (principalment mitjançant l'ús de fibra òptica), calcular el cost d'implementar i mantenir aquesta tecnologia, i estimar l'estalvi de diners que suposa aplicar aquesta tecnologia a l'hora de fer el manteniment preventiu de l'estructura. O en altres paraules, estimar l'estalvi de diners que suposa fer el manteniment preventiu de l'estructura utilitzant sensors, comparat amb fer el manteniment preventiu de l'estructura sense sensors (és a dir, com es fa actualment, mitjançant inspeccions periòdiques, etc.).

Per tal que l'enfocament sigui al més ampli possible, els dos edificis escollits per fer-hi l'estudi són molt diferents entre ells, tant pel que fa a la tipologia constructiva, el tipus d'estructura, l'edat, els materials, etc. Així, un dels edificis triats ha estat l'edifici de Neàpolis (vegeu la figura 1), construït l'any 2007 (amb estructura de formigó armat, forjats reticulars, etc.). I l'altre, l'església de Sant Antoni Abat (vegeu la figura 2), construïda l'any 1693, (amb estructura de parets de càrrega de pedra, contraforts, arcs i voltes, etc.). Els dos edificis s'ubiquen a Vilanova i la Geltrú.

FIGURA 2. IMATGE DE L'ESGLÉSIA DE SANT ANTONI ABAT



## Tipus de sensors

Un dels primers passos de la recerca ha estat estudiar els diferents tipus de sensors que hi ha, per tal de triar els que siguin més idonis per a la recerca feta. Com una primera aproximació general, podem classificar els sensors tal com es presenta a la *taula 1*, on també es visualitzen les dades que mesuren cada tipus de sensor (Lau *et al.*, 2002).

Sensor	Què mesura
Fibra òptica	Deformació, esquerdes, humitat, temperatura, pH, vibracions, oxigen, hidrogen
Piezoelèctric	Deformació
Emissió acústica	Oxidació, esquerdes

TAULA 1. DIFERENTS TIPUS DE SENSORS

D'acord amb la distribució espacial dels valors mesurats dels sensors de fibra òptica (Fos), el sensor pot ser classificat en tipus diferents.

### 1. Sensor de punt

El mesurament amb sensors de punt es duu a terme només en un únic punt de la fibra.

### 2. Sensor integrat

El mesurament amb sensors integrats fa una mitjana d'un paràmetre físic al llarg d'una secció concreta de fibra i proporciona un valor únic.

### 3. Sensor multiplexat

El mesurament amb sensors multiplexats es defineix per un cert nombre de punts fixos i discrets al llarg d'un sol cable de fibra òptica. L'exemple més comú són els multiplexats *fiber Bragg gratings* (FBG).

### 4. Sensor distribuït

El mesurament amb sensors distribuïts pot fer-se en qualsevol punt al llarg d'una fibra òptica amb el sistema de mesurament basat en la dispersió (de la llum o de qualsevol altra radiació electromagnètica) de Rayleigh, Raman o Brillouin.

Per a aquesta recerca només són útils el tercer i el quart sensor. Si es compara amb el sensor multiplexat, un avantatge del sensor distribuït és el fet que no és necessària una definició prèvia de la localització dels sensors. No obstant això, en aquest estudi hem determinat les posicions adequades on han d'ubicar-se els sensors en cada un dels dos edificis, per obtenir dades representatives. El cost més elevat dels sensors distribuïts va motivar que en aquest estudi s'optés pels sensors multiplexats.

Els denominats *fiber Bragg gratings* (FBG) són similars a miralls molt petits (que formen una mena de reixeta) creats en una fibra òptica mitjançant un làser. Així, petites parts de fibra es transformen en sensors de fibra òptica capaços de detectar dades de l'entorn local al voltant d'aquestes zones.

Per a la detecció s'envia llum blanca a través de la fibra i les reixetes estan disposades per reflectir determinades longituds d'ona i transmetre les altres al llarg de la fibra. Una dada d'interès com la deformació es pot determinar a partir de la longitud d'ona reflectida des de cada reixeta. Això significa que cada sensor està relacionat amb un color determinat de la llum blanca i el reflecteix. Si hi ha petits canvis, el color serà diferent i el dispositiu pot convertir aquesta informació en dades analitzables. La *figura 3* mostra aquest fenomen.

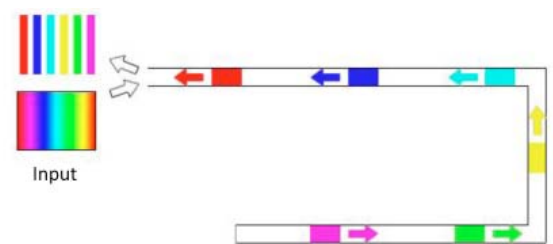


FIGURA 3. FUNCIONAMENT DELS FIBRE BRAGG GRATINGS (FBG)

En el nostre treball de recerca, vam seleccionar com a FBG el sensor denominat «fos4strain» (vegeu la *figura 4*). Aquest sensor és immune a les interferències lumíniques i electromagnètiques.

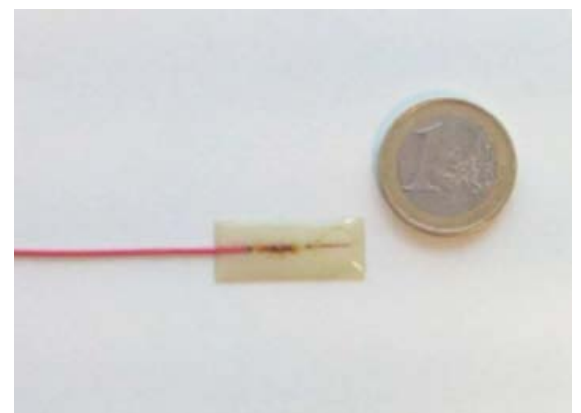


FIGURA 4. SENSOR «FOS4STRAIN»

A més a més de la fibra òptica, tal com hem vist a la *taula 1*, hi ha el sensor d'emissió acústica, el qual és capaç de detectar canvis en l'estructura per mitjà de captar les ones acústiques de les vibracions. Les causes d'aquestes vibracions són transformacions



estructurals en forma d'esquerdes, moviments i oxidació. Aquest sensor mesura les ones d'alta freqüència en un interval des de 10 kHz fins a diversos MHz i els converteix en un senyal elèctric. El senyal es digitalitza i s'analitza per mitjà d'un programari especial.

Per tant, vam decidir incloure aquest tipus de sensor per la seva capacitat de detectar l'oxidació, la qual cosa no pot fer, com ja hem vist, el sensor de fibra òptica. I la detecció precoç de l'oxidació es considera necessària per fer un manteniment preventiu adequat dels edificis.

En el nostre treball de recerca, vam seleccionar com a sensor d'emissió acústica el sensor denominat «AES150» (vegeu la figura 5).



FIGURA 5. SENSOR D'EMISSIÓ ACÚSTICA «AES150»

### ■ Proposta de diferents nivells d'intensitat

Per implantar sensors a les estructures dels edificis, com a principi general es proposa que pugui haver-hi diferents nivells d'intensitat en aquesta sensorització o monitorització. Vam denominar *nivell d'intensitat de sensorització* el fet de col·locar més o menys quantitat de sensors, i per tant d'obtenir més o menys quantitat de dades sobre la salut de l'estructura, i també de gastar més o menys quantitat de diners en la sensorització (tant en la seva implementació com en el seu manteniment posterior).

S'ha considerat oportú introduir aquest concepte atès que, en funció del tipus d'edifici, pot interessar que la sensorització sigui més o menys intensa. Així, per exemple, no és el mateix plantejar la sensorització estructural d'una petita casa unifamiliar aïllada que la d'un gran hospital, o la d'un edifici d'alt valor arquitectònic, històric i artístic, etc. En el primer cas pot haver-n'hi prou amb obtenir poques dades, és a dir amb un nivell d'intensitat de sensorització baix, mentre que en el segon cas pot interessar tenir més control sobre la salut estructural i obtenir més quantitat de dades, és a dir amb un nivell més elevat

d'intensitat de sensorització.

En aquest treball de recerca hem proposat com a base de partida tres nivells d'intensitat de sensorització: baix, mitjà i alt. En les figures següents es mostren les propostes de sensorització en planta per a l'església de Sant Antoni Abat i per a Neàpolis, tots dos amb nivell d'intensitat mitjà, que és el que s'ha considerat adequat per a aquests dos edificis (vegeu les figures 6, 7 i 8).

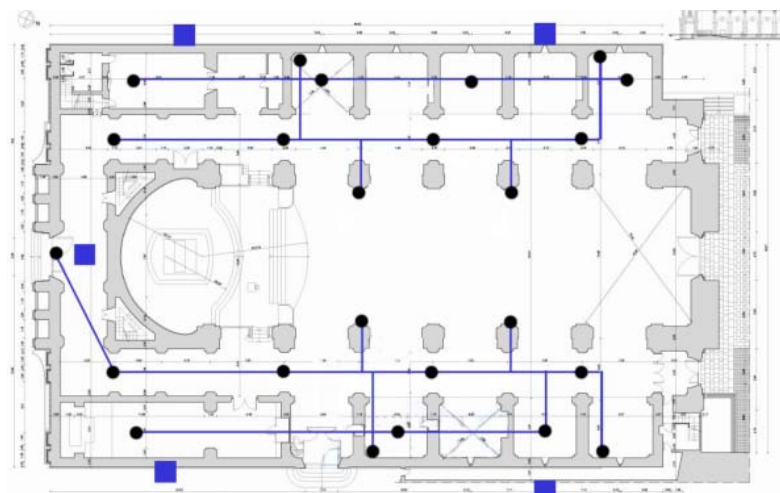


FIGURA 6. EXEMPLE DE SENSORITZACIÓ D'INTENSITAT MITJANA A L'ESGLÉSIA DE SANT ANTONI ABAT

Les línies blaves mostren la situació de la fibra òptica (als arcs, les voltes i les columnes), els punts negres indiquen la situació dels sensors en la fibra. Els quadrats blaus indiquen la situació dels sensors d'emissió acústica.



FIGURA 7. EXEMPLE DE SENSORITZACIÓ D'INTENSITAT MITJANA A L'EDIFICI NEÀPOLIS

Les línies blaves mostren la situació de la fibra òptica (als sostres i els pilars), els punts liles indiquen la situació dels sensors en la fibra.

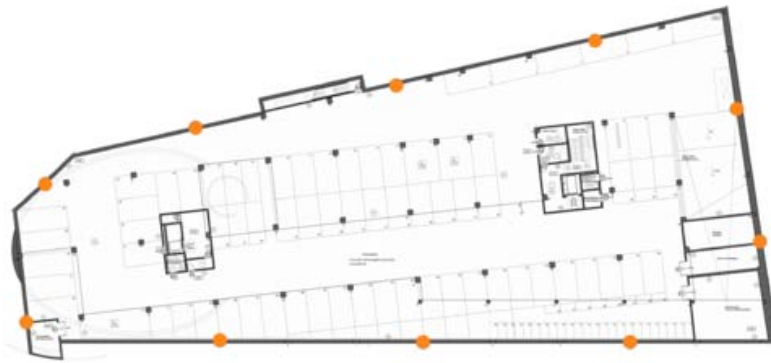


FIGURA 8. PROPOSTA DE SITUACIÓ DE SENSORS D'EMISSIÓ ACÚSTICA A L'EDIFICI NEÀPOLIS

### ■ Avaluació de la viabilitat econòmica

Per avaluar el grau de viabilitat econòmica de l'aplicació de sensors a les estructures, s'ha de comparar el cost de fer manteniment preventiu (sense l'ús de sensors) amb el cost de fer manteniment preventiu mitjançant l'ús de sensors. En base a aquest raonament, proposem l'expressió següent:

$$F = \frac{PCM \cdot T}{IC + (SSC + SPMC) \cdot T}$$

EXPRESSIÓ (1)

On:

F = viabilitat econòmica (*feasibility*)

Indica el grau de viabilitat econòmica de la inversió.

PMC = cost de manteniment preventiu (*preventive maintenance cost*)

Representa el cost (anual mitjà) de fer manteniment preventiu de l'estructura sense utilitzar sensors (és a dir, com es fa actualment, per mitjà d'inspeccions periòdiques, etc.).

IC = cost inicial (*initial cost*)

Representa el cost d'implementar el sistema de sensors de l'estructura intel·ligent. Inclou el cost dels sensors i de la fibra òptica que s'instal·la, el cost de la seva instal·lació i el cost del programari per obtenir i gestionar les dades.

SSC = cost del sistema intel·ligent (*smart system cost*)

Representa el cost (anual mitjà) de mantenir el sistema de sensors de l'estructura intel·ligent. Inclou la reparació o renovació de cables (de fibra òptica) o sensors que tinguin disfuncions, el manteniment del programari que controla el sistema i el cost de la gestió de dades obtingudes pel sistema.

SPMC = cost de manteniment preventiu intel·ligent (*smart preventive maintenance cost*)

Representa el cost (anual mitjà) de fer manteniment preventiu de l'estructura utilitzant sensors.

T = Temps (*time*)

És el temps (en anys) durant el qual es fa l'estudi comparatiu.

### ■ Graus de viabilitat econòmica de la inversió

A partir dels resultats que s'obtinguin de l'expressió (1) tenim que:

- Si  $F < 1$ ; indica que la inversió no és rentable.
- Si  $1,01 < F < 1,25$ ; indica que la inversió és lleument rentable, amb un petit marge per a desviacions.
- Si  $1,26 < F < 1,50$ ; indica que la inversió és rentable, amb un marge apreciable per absorbir possibles desviacions.
- Si  $F > 1,51$ ; indica que és una inversió sòlidament rentable, amb elevat retorn de la inversió.

### ■ Període de recuperació de la inversió (PRI)

En cas que la inversió sigui rentable ( $F > 1$ ), interessa conèixer el moment a partir del qual comença a obtenir-se benefici net (el benefici supera la inversió inicial). Aquest moment es visualitza a la figura 9, on s'observa el punt de retorn de la inversió (*break-even-point*). S'observen també els aspectes següents que són importants conceptualment:

- Les dues corbes són de pendent constant (són rectes), atès que el cost mitjà anual de manteniment en els dos casos és constant.
- La recta PMC (color vermell) comença a l'origen de coordenades, atès que no hi ha cost inicial per a  $T = 0$ .
- La recta SPMC (color verd) comença a l'eix d'abscisses, atès que hi ha cost inicial per a  $T = 0$ .
- El pendent de la recta SPMC és inferior al pendent de la recta PMC. Això es deu al fet que vam

$$\frac{dSPMC(T)}{dT} < \frac{dPMC(T)}{dT}$$

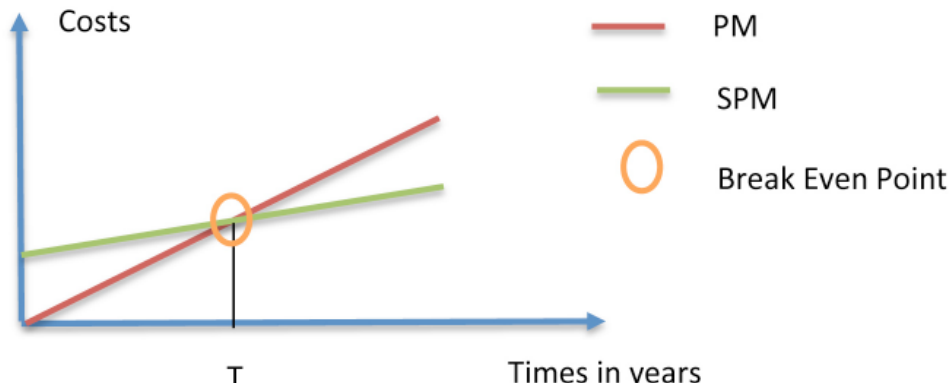


FIGURA 9. PUNT DE RETORN DE LA INVERSIÓ (BREAK-EVEN-POINT)

considerar que utilitzant sensors (estructura intel·ligent) el cost de manteniment preventiu és inferior a fer manteniment preventiu sense sensors.

Per determinar analíticament el valor de T (temps, en anys, a partir del qual comencen a obtenir-se beneficis nets), vam partir de l'expressió (1) i vam igualar a 1 ( $F = 1$ ). Aïllant, obtenim l'expressió (2) que ens permet trobar el valor de T.

$$\frac{PCM \cdot T}{IC + (SSC + SPMC) \cdot T} = 1$$

$$IC + (SSC + SPMC) \cdot T = PMC \cdot T$$

$$IC = PMC \cdot T - (SSC + SPMC) \cdot T$$

$$IC = (PMC - (SSC + SPMC)) \cdot T$$

$$\frac{IC}{(PMC - (SSC + SPMC))} = T$$

EXPRESSIÓ (2)

#### ■ Metodologia per determinar els paràmetres

Un cop explicat el plantejament general i les expressions matemàtiques proposades per determinar el grau de viabilitat econòmica de les estructures intel·ligents, explicarem tot seguit la metodologia per determinar el valor dels diferents paràmetres que incideixen en les expressions matemàtiques que hem explicat abans.

**PMC = cost de manteniment preventiu (preventive maintenance cost)**

Representa el cost (anual mitjà) de fer manteniment preventiu de l'estructura sense utilitzar sensors (és a dir, com es fa actualment, mitjançant inspeccions periòdiques, etc.).

Per determinar aquest valor s'ha fet el següent:

- Preguntar si es tenen dades dels dos edificis objecte d'estudi (Neàpolis i església de Sant Antoni Abat) pel que fa al cost anual que representa fer manteniment preventiu. Cap dels dos edificis disposa d'aquestes dades.
- Obtenir dades de despeses diverses en els últims anys fetes en aquests dos edificis en matèria de reparació i manteniment.
- Estudiar bibliografia sobre costos de manteniment preventiu en edificis antics i en edificis de construcció recent.

**IC = cost inicial (initial cost)**

Representa el cost d'implementar el sistema de sensors de l'estructura intel·ligent. Inclou el cost dels sensors i de la fibra òptica que s'instal·la, el cost de la

seva instal·lació i el cost del programari per obtenir i gestionar les dades.

Per determinar aquest valor s'han consultat empreses del sector que comercialitzen i instal·len els sensors proposats i la fibra òptica.

**SSC = cost del sistema intel·ligent (smart system cost)**

Representa el cost (anual mitjà) de mantenir el sistema de sensors de l'estructura intel·ligent. Inclou la reparació o renovació de cables (de fibra òptica) o sensors que tinguin disfuncions, el manteniment del programari que controla el sistema, i el cost de la gestió de dades obtingudes pel sistema.

Per determinar aquest valor s'ha fet el següent:

- Tenir en compte la vida útil mitjana de cada tipus de sensor i de la fibra òptica; el cost d'extreure i col·locar nous sensors i fibra òptica (quan deixen de funcionar per disfunció o per haver superat la seva vida útil), i el cost de revisions periòdiques del sistema per part d'enginyer informàtic o similar.
- Per determinar els valors esmentats en el punt anterior s'han consultat empreses del sector que comercialitzen i instal·len els sensors proposats i la fibra òptica.

**SPMC = cost de manteniment preventiu intel·ligent (smart preventive maintenance cost)**

Representa el cost (anual mitjà) de fer manteniment preventiu de l'estructura utilitzant sensors i fibra òptica.

Per determinar aquest valor, vam considerar els factors següents que suposen estalvi respecte PMC:

- Es necessita menys quantitat de temps (i, per tant, menys quantitat de cost) de tècnic (arquitecte tècnic o enginyer d'edificació, etc.) en inspecció i diagnòstic de l'edifici. En efecte, en PMC, el tècnic ha de revisar periòdicament l'edifici (la qual cosa suposa una quantitat de temps considerable, en funció de diverses dades de l'edifici: mida, tipologia constructiva, nombre i característiques de les disfuncions existents, etc.). En canvi, en SPMC, el tècnic, fins i tot des de casa seva o el despatx, pot obtenir al seu ordinador o telèfon intel·ligent les dades sobre l'estat de salut de l'edifici en qüestió, i reduir així notablement el temps que hi ha de dedicar.
- Mitjançant SPMC podem saber abans quan hi ha una disfunció (el programari del sistema pot incloure una aplicació que avisi el tècnic de capçalera en cas que apareguin disfuncions, o quan aquestes superin certa magnitud). Aquesta detecció més primerenca de les disfuncions en SPMC pel que fa

a PMC permet que les terapèutiques aplicades en SPMC siguin més econòmiques. Per a l'aplicació del programari esmentat pot ser d'utilitat l'ús d'una escala de gravetat de danys en edificis, que permeti la classificació dels danys en funció del seu grau de gravetat (Ruiz, 2014).

- Derivat del punt anterior, cal introduir també un cost addicional. En efecte, si l'edifici té disfuncions greus, no només cal gastar diners per reparar-lo. També és necessari considerar que els usuaris de l'edifici probablement hauran de prendre unes mesures que els poden generar perjudicis. Entre aquestes mesures poden haver-hi les següents: desallotjament provisional de l'edifici (o de part d'aquest), fer desplaçaments més llargs (per exemple, en cas que les persones que treballen a les oficines de l'edifici hagin d'anar provisionalment a un lloc més allunyat), etc. Aquests perjudicis s'han de tenir en compte i valorar-se econòmicament, en aquest cost addicional. Així, la detecció més primerenca de les disfuncions en SPMC pel que fa a PMC, repercuteix en un menor cost addicional en SPMC pel que fa a PMC.

Cal dir que de tots els paràmetres estudiats (PMC, IC, SSC i SPMC), SPMC és el que presenta més dificultat per obtenir resultats amb elevat grau de certesa. En part, això es deu al fet que, amb base als estudis que hem elaborat, no ens consta que hi hagi cap edifici al món amb estructura intel·ligent del qual poder extreure dades experimentals. D'altra banda, en les poques construccions en què sabem que s'usa el concepte d'estructura intel·ligent (algun pont, central tèrmica, etc.), no consta que hi hagi cap estudi econòmic sobre l'estalvi que suposa l'ús d'aquesta tecnologia si es compara amb no utilitzar-la.

Per obtenir valors consistents de SPMC, seria ideal disposar de diversos edificis pilot amb estructures intel·ligents, i anar obtenint dades experimentals dels costos de SPMC. ■

**En cas que es demostrï de manera consistent que la proposta és aplicable tècnicament i que és interessant econòmicament, implicaria que seria d'interès aplicar aquestes tecnologies al conjunt dels edificis, tant als existents com als de nova construcció**

## Conclusions

Després d'aplicar la metodologia i les expressions matemàtiques proposades als dos edificis estudiats s'obté en tots dos casos que  $F > 1$  (la inversió és rentable). Anàlogament, s'obté que per a l'església de Sant Antoni Abat,  $T = 10$  anys (el període de recuperació de la inversió és de 10 anys); i per a l'edifici Neàpolis,  $T = 15$  anys.

Aquests resultats indiquen que, a més a més de ser rentable l'ús d'aquesta tecnologia, la seva rendibilitat és més gran en edificis antics que en edificis de construcció recent. Això últim sembla raonable que sigui així, atès que en un edifici antic, pel fet de tenir una probabilitat més elevada, en principi, de patir disfuncions rellevants, el fet que mitjançant l'ús de sensors puguem detectar de manera més primerenca aquestes disfuncions, ens permet estalviar més atès que redueix els costos de reparació, davant l'opció de manteniment preventiu sense ús de sensors.

En canvi, en edifici de construcció recent (que estigui ben construït; per tant, sense errors rellevants de projecte, ni d'execució, ni defectes de materials, etc.), hi ha, en principi, menys probabilitat de patir disfuncions rellevants, per la qual cosa l'estalvi és menys significatiu respecte de l'opció de manteniment preventiu sense ús de sensors.

Aquí es recorda que en l'edifici de construcció recent es parteix de la premissa que l'edifici està construït sense sensors, i que a posteriori s'instal·len els sensors i la fibra òptica (adherida a la superfície, com s'ha comentat). En el cas de l'edifici que es construeixi ja de bon començament amb estructura intel·ligent, els resultats poden ser diferents, probablement amb més rendibilitat. Això és així perquè és probable que el cost inicial (IC) sigui una mica menor, si es compara amb el cost inicial en el cas de l'edifici existent en el qual s'instal·len els sensors a posteriori. A més a més, en edificis de nova construcció es poden aplicar altres tipus de tecnologies amb la finalitat de monitoritzar les estructures de formigó armat, com la denominada pols intel·ligent (en anglès, smartdust), la qual ja va explicar-se en l'article anterior (Ruiz i Llorens, 2012).

Convé ressaltar que la utilització de sensors i fibra òptica en els edificis es pot aprofitar per a objectius més amplis als referits de la monitorització estructural i l'optimització de la gestió de la salut de l'estructura de l'edifici. En efecte, aquesta tecnologia també pot utilitzar-se en el camp de la domòtica i de l'eficiència energètica de l'edifici, i aconseguir així un concepte integral d'edifici intel·ligent, smart building.

Tot el que s'ha explicat en aquest article i en l'anterior apunta cap a la bondat de l'ús de les estructures intel·ligents, tant des del punt de vista tècnic com econòmic. Així, potser d'aquí a alguns anys comença a ser freqüent l'existència d'edificis intel·ligents, tant en matèria d'estructures intel·ligents com en matèria d'eficiència energètica i domòtica, i fins i tot poden quedar recollits aquests aspectes a nivell de normativa.

Com és evident, els aparelladors, els arquitectes tècnics i els enginyers d'edificació, per la formació acadèmica rebuda d'alt nivell científic tècnic i transversal, som uns professionals perfectament indicats per intervenir en el camp de les estructures intel·ligents, així com de l'eficiència energètica dels edificis i de la domòtica, i més en general en matèria de smart cities. Anàlogament, altres professions també són idònies per intervenir en aquesta matèria, i aquest és un dels nombrosos exemples que mostren que és necessari que hi hagi una bona col·laboració i entesa entre diferents professions, així com un grau significatiu de transversalitat bidireccional entre aquestes, per tal d'aconseguir la màxima eficàcia i ser de màxima utilitat a la societat. ■

### ■ Agraïments

Volem donar les gràcies a les persones següents:

Louise Colly (França), Carina Lamp (Alemanya), Ties Marissen (Holanda) i Nadine Worgull (Alemanya), perquè amb el seu treball de final de carrera en el marc de l'European Project Semester (EPS) han desenvolupat eines útils en aquest treball de recerca.

Antonio Aguado (Dr. enginyer de Camins, Canals i Port) i Carles Serrat (Dr. en Matemàtiques) per la seva direcció de la tesi doctoral Escala de gravetat de danys en edificis: de l'assignació directa a la contrastació estadística.

Joan Ramon Casas (Dr. enginyer de Camins, Canals i Ports) i Míriam Soriano (enginyera de Camins, Canals i Ports i màster en Enginyeria Estructural i de la Construcció), per la seva col·laboració en aquest treball de recerca. ■

### ■ Referències

Lau, K.; Zhou, L.; Tse, P. i Yuan, L. (2002). *Applications of Composites, Optical Fiber Sensors and Smart Composites for Concrete Rehabilitation: an Overview. Applied Composite Materials*. Els Països Baixos: Kluwer Academic Publishers. 9, p. 221-247.

Ruiz, F. (2014). *Escala de gravedad de daños en edificios: de la asignación directa a la contrastación estadística*. Tesi doctoral. ETS d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona-UPC.

Ruiz, F. i Llorens, A. (2012). «*Les estructures intel·ligents. Aplicació de les noves tecnologies per la gestió de la salut estructural dels edificis.*» L'INFORMATIU. Col·legi d'Aparelladors, Arquitectes Tècnics i Enginyers d'Edificació de Barcelona. Número 333, p. 98-103. ■