

# MONITORAGGIO IN AREA SISMICA: RILEVATORI DI DEFORMAZIONE A FIBRA OTTICA

G. Porco\* - D. Romano\*\* - G. F. Valer Montero\*

\* Università della Calabria, Dipartimento di Ingegneria Civile  
[a.porco@sismalab.it](mailto:a.porco@sismalab.it) [giuliafvalerm@gmail.com](mailto:giuliafvalerm@gmail.com)

\*\* Sismalab s.r.l.- Spin – Off Università della Calabria.  
[d.romano@sismalab.it](mailto:d.romano@sismalab.it)

## INTRODUZIONE

Gli eventi tellurici che hanno interessato dagli inizi del '900 il territorio Italiano, hanno sistematicamente messo in risalto l'elevata vulnerabilità sismica del nostro patrimonio edilizio, l'inadeguatezza della classificazione del territorio al fine di valutare le azioni prodotte sulle costruzioni nonché, l'inesistenza di qualsiasi attività di programmazione della manutenzione periodica ordinaria e straordinaria delle strutture sismo-resistenti, che garantiscono nel tempo la conservazione delle loro capacità di risposta alle perturbazioni esterne.

L'argomento sisma è divenuto purtroppo un argomento di grande attualità ed interesse, coinvolgendo componenti tecniche, politiche e produttive del nostro Paese e rendendo comuni i concetti di controllo, monitoraggio, prevenzione, vulnerabilità sismica e rischio sismico. La vulnerabilità sismica di una struttura, ossia la propensione di subire un danno di un determinato livello, a fronte di un evento sismico di una data intensità, concorre a determinare il rischio sismico il quale è un indicatore che tiene conto di tre fattori, ossia la pericolosità, la esposizione e la vulnerabilità. Maggiore è la vulnerabilità, a condizione di mantenimento degli altri due fattori, maggiore sarà il rischio sismico.

In particolare, la vulnerabilità sismica è uno dei fattori sul quale la comunità scientifica sta cercando di intervenire per individuare tecniche innovative di controllo e di progettazione al fine di ridurla in fase di ideazione degli organismi resistenti, confermarla in fase di costruzione e mantenerla inalterata nel tempo in fase di esercizio. In particolare, in merito a quest'ultimo aspetto, diverse sono le proposte in letteratura sull'uso di tecniche di controllo per la verifica dello stato di conservazione dei materiali ed in genere sulle parti resistenti, con attività che vengono in gergo indicate come monitoraggio.

Sotto il profilo ingegneristico, la fase di progettazione sviluppata nel rispetto delle norme tecniche, conferisce a una struttura, sia essa un edificio, un ponte o un muro di

sostegno, una propria vulnerabilità sismica. Tale vulnerabilità sarà però teorica, nel senso che, al termine della costruzione dell'opera, se il tutto avverrà nel rispetto delle prescrizioni del progetto e senza vizi costruttivi, la struttura evidenzierà una piena convergenza tra vulnerabilità teorica di progetto e vulnerabilità reale. All'entrata in servizio dell'opera, tuttavia, interviene un'altra variabile che incide ancora sul rischio sismico attraverso la vulnerabilità, ossia il tempo. Al trascorrere di questo, la struttura resistente potrà subire ancora modificazioni anche solo di deterioramento dei materiali che la costituiscono. Anche questo aspetto di variazione delle prestazioni in corso d'esercizio, incide negativamente sulla vulnerabilità inducendone a volte sensibili aumenti; in pratica le risorse teoriche della struttura, attivabili contro il sisma, potranno subire ancora una volta una riduzione, evidenziando una inadeguatezza alla risposta in termini di potenzialità, che risultano lontane da quelle detenute in fase progettuale ed all'entrata in servizio. Appare chiaro che gli aspetti fondamentali sono sostanzialmente due e cioè, verificare in fase di costruzione e prima dell'entrata in servizio di un'opera che i coefficienti di sicurezza di progetto attesi diventino quelli reali del manufatto, il quale avrà quindi una convergenza tra vulnerabilità teorica e vulnerabilità reale, mentre il secondo aspetto fondamentale è la verifica, al trascorrere del tempo, e, quindi in esercizio, che il livello di affidabilità resti immutato; in questo modo la struttura in qualsiasi istante, potrà disporre delle risorse di progetto mantenendo la vulnerabilità di primo impianto e non ridotta.

Una forte risposta a questi quesiti, e quindi un valido supporto ad affrontare tali problematiche negli ultimi anni, è arrivata dal monitoraggio strutturale con sistemi di controllo residenti a fibra ottica[1], [2], [3]. In riferimento al primo aspetto fondamentale precedentemente citato, per gli organismi resistenti di nuova realizzazione è possibile collocare dei rilevatori di deformazione sin dalle fasi costruttive e seguire in tempo reale, ed in remoto, i processi di carico della struttura resistente [4], [5] giungendo a verificare la reale convergenza tra i coefficienti di sicurezza di progetto e quelli reali.

In riferimento al secondo aspetto e cioè la possibilità di controllo del mantenimento delle prerogative di resistenza al trascorrere del tempo, questa è distinta a secondo che l'opera sismo resistente sia di nuova realizzazione o esistente. Il controllo in fase di esercizio per una struttura di nuova realizzazione può essere condotto utilizzando

le architetture impiantate in fase di realizzazione, secondo protocolli oramai consolidati [5], che permettono di gestire sia le attività di manutenzione ordinaria sia di verificare a valle di un evento sismico lo stato di danneggiamento subito. Più complesso è invece il monitoraggio di un'opera esistente, la quale potrà essere integra o soggetta a quadri fessurativi preesistenti. E' in questo contesto che è stata prodotta la presente nota, con la quale saranno illustrate metodologie di controllo basate principalmente su rilevatori di deformazione da impiegare su strutture in muratura ed implementabili anche su elementi in calcestruzzo armato e su opere monumentali ubicate in area sismica. Partendo dalla analisi delle potenzialità dei rilevatori di deformazione maggiormente impiegati nelle attività di controllo, saranno proposte alcune architetture di monitoraggio dedicate al controllo delle strutture murarie, basate sull'inserimento dei rilevatori di deformazione in punti singolari della ossatura sismo resistente e con le quali sarà possibile condurre un percorso di controllo sistematico per la verifica del mantenimento della vulnerabilità di entrata in servizio.

## **1. I RILEVATORI DI DEFORMAZIONE PER IL CONTROLLO IN AREA SISMICA**

Lo strumento base, per la predisposizione di un sistema di monitoraggio su una struttura esistente, è sicuramente il rilevatore di deformazione. Il sensore banalmente, sia esso a fibra ottica o costituito semplicemente da un estensimetro, è un misuratore di spostamenti su una predefinita base di misura. Le misure di convergenza o di divergenza delle estremità della base, permettono successivamente di risalire a delle deformazioni le quali, comparate con quelle ultime del materiale che si sta osservando, consentono di valutare numericamente la distanza tra la configurazione attuale e quella di collasso, ossia restituiscono il coefficiente di sicurezza al momento della misurazione.

Questa modalità di controllo, negli ultimi anni, è estremamente diffusa sulle strutture in c.a e su quelle in precompresso, ma è opinione condivisa che, anche sulle strutture in muratura, il controllo dei regimi di deformazione e di sforzo può essere perseguito con dei rilevatori di deformazione applicati su barre di acciaio inserite nella stessa struttura e solidarizzati con essa. Prima di entrare nel merito di alcune proposte di composizione dei sistemi di monitoraggio, è opportuno brevemente fornire una sintetica panoramica dei rilevatori di deformazione a fibra ottica utilizzati nel campo civile e, a

giudizio degli scriventi, con ampie possibilità di impiego anche per il monitoraggio delle strutture esistenti in muratura [6],[7],[8]. Per questioni di brevità prenderemo in considerazione solo tre tipologie di misuratori rimandando a testi specifici per eventuali approfondimenti.

### 1.1 I rilevatori di deformazione tipo SOFO

Il sistema di monitoraggio SOFO (acronimo francese di Surveillance d'Ouvrages par Fibres Optiques – Monitoraggio Strutturale per mezzo di Fibre Ottiche) si basa sul principio fisico dell'interferometria applicata a sensori a fibre ottiche. Si tratta quindi di sensori con due fibre, una per la misurazione ed una di riferimento, contenute da un tubo di protezione in plastica. La fibra di misurazione è tesa, ragion per cui il sensore è capace, se reso solidale alla struttura, di seguirne le deformazioni [9]. I sensori SOFO non risentono dei campi elettromagnetici, resistono alla corrosione ed alla umidità e sono ideali per monitoraggi a breve e/o a lungo termine dato che possono essere annegati, una volta applicati sulle barre d'acciaio fig.1, nel getto di calcestruzzo oppure installati in superficie grazie ad appositi supporti. Questi sensori fanno parte della categoria dei cosiddetti sensori lunghi, dato che la loro lunghezza attiva può arrivare anche a cinquanta metri.



Fig. 1 - Sensori di deformazione SOFO

Con la stessa filosofia applicativa è possibile pensare di utilizzare questi rilevatori anche sulle strutture esistenti in muratura. In pratica installando il rilevatore sempre su una barra di acciaio è possibile solidarizzare quest'ultima e successivamente al montaggio all'impianto murario (fig.2).

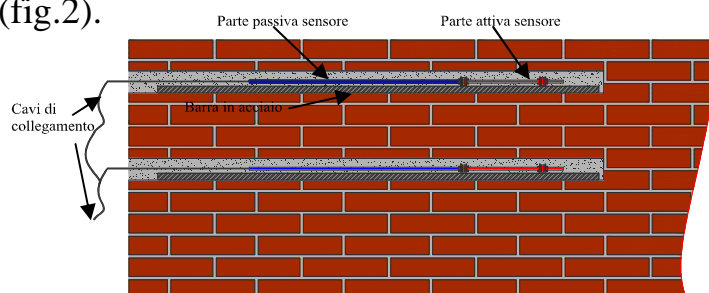


Fig. 2 – Sensori SOFO inseriti nella muratura

## 1.2 I sensori a reticolo di Bragg

Sensori a fibra ottica più moderni sono i sensori a reticolo di Bragg (FBG) fig.3. Le parti che compongono un sistema di monitoraggio che utilizza i sensori FBG sono: la fibra ottica con i sensori FBG, il cavo in fibra ottica di collegamento tra i sensori, l'elettronica di controllo ed infine un PC.

Questo tipo di sensori si sta rapidamente affermando nel campo della riabilitazione strutturale, principalmente per monitorare gli strati sottili, dato che rientrano nella categoria dei sensori corti (lunghezza attiva da 5mm a qualche centimetro). I sensori a reticolo di Bragg possono essere adoperati, come d'altronde i SOFO, per il monitoraggio delle vibrazioni e per il monitoraggio strutturale finalizzato al controllo dei quadri fessurativi (fig.4) [10]. Anche nel campo delle strutture esistenti in muratura, questa tipologia di rilevatori potrà essere impiegata o come sistema di controllo di pelle o in alternativa o in aggiunta, come sistema residente applicato su elementi in acciaio solidarizzati alla struttura preesistente.

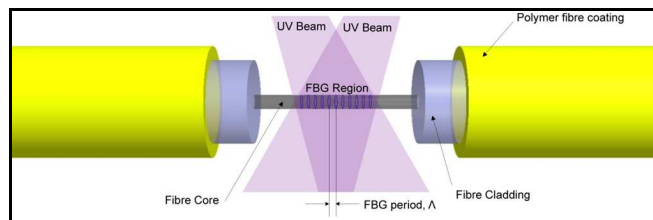


Fig. 3 - Sensore di deformazione a reticolo di Bragg

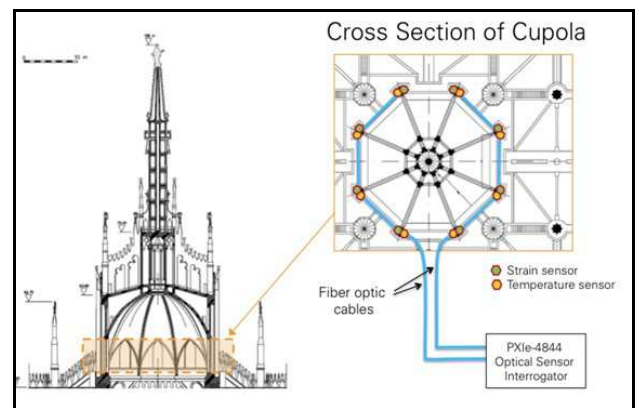


Fig. 4 a,b - Sensori di deformazione a reticolo di Bragg installati su un edificio storico

## 1.3 I sensori Micron Optics os3600

Altra tipologia di sensori presente nel campo civile è costituita dai rilevatori identificati come os3600 (fig.5a,b,c) [11]. Essi contengono due reticoli di Bragg al loro

interno sfruttando quindi le loro caratteristiche, compresa la compensazione della temperatura. In pratica ampliano ed estendono le prestazioni già elevate dei sensori FBG. Questi sensori sono estremamente precisi a lungo termine anche in condizioni ambientali difficili, ed è per questo motivo che possono essere facilmente incorporati, imbullonati, cementati o saldati alla struttura da monitorare con tecniche di installazione convenzionali. Hanno una lunghezza attiva o base di misura fino a 1,5 metri, ed è per questo motivo che rientrano nella categoria dei sensori standard. Le applicazioni più recenti di questi sensori riguardano soprattutto il monitoraggio delle deformazioni su pile da ponte. In riferimento alle potenzialità di questi rilevatori come strumento di controllo delle strutture murarie preesistenti, valgono le stesse considerazioni riportate nella sezione precedente.

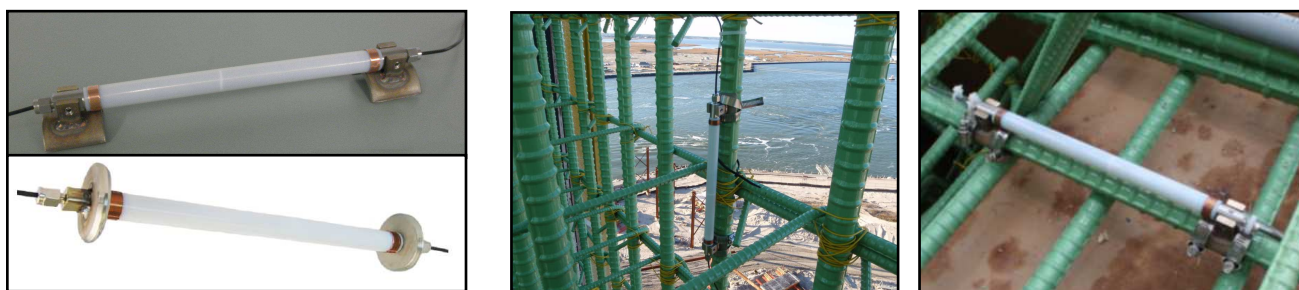


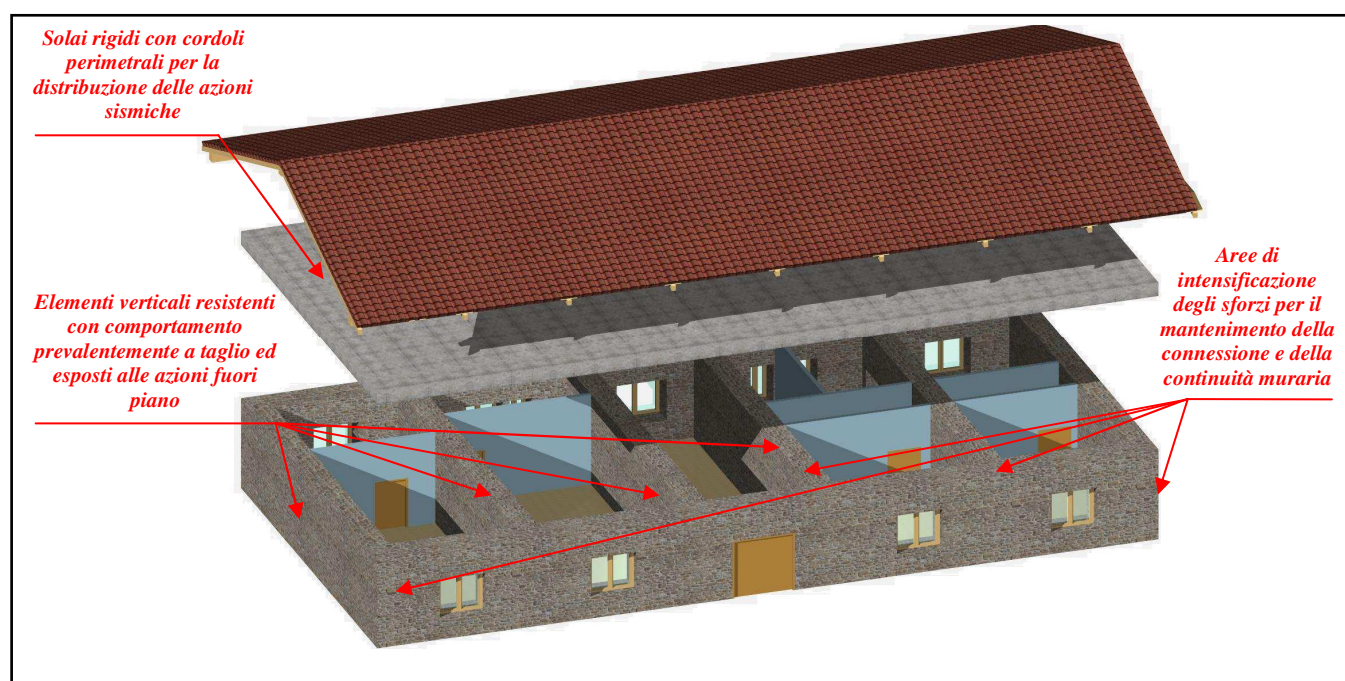
Fig. 5 a,b,c - Sensore os3600

## 2. UNA PROPOSTA DI ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO IN AREA SISMICA

In zona sismica i sistemi residenti di monitoraggio vengono concepiti seguendo un rigido iter progettuale attraverso il quale sono rese evidenti le parti strutturali che, in virtù delle condizioni di carico verticali opportunamente combinate con il sisma, entrano per prima in stato di crisi e mediante l'impiego di misuratori di deformazione, possono essere tenute sotto controllo. Questo approccio, oramai consolidato per le strutture in c.a. di nuova costruzione, potrebbe costituire un solido punto di partenza per proporre protocolli di monitoraggio di strutture esistenti realizzate in muratura. In pratica, con le dovute cautele e i necessari accorgimenti tecnico operativi, la metodologia del controllo basata sul rilievo della deformazione in campo statico, potrebbe essere proposta anche sul patrimonio edilizio esistente in muratura, per poter effettuare verifiche di affidabilità o attivare controllo *routinari* per gli interventi manutentivi. Il sistema da implementare dovrà essere in grado di fornire utili informazioni sullo stato di conservazione dei livelli di affidabilità dell'edificio per verificare al passare del tempo, il mantenimento della originaria

vulnerabilità sismica. Inoltre, a valle di un evento tellurico di significativa portata, dovrà garantire l'accertamento della presenza o meno di stati di crisi e/o di condizioni di riduzione dei coefficienti di sicurezza.

La possibilità di poter seguire misure di deformazione significative su parti resistenti in muratura è fortemente influenzata dalla eterogeneità del materiale, dalla estensione delle basi di misura che dovranno garantire acquisizioni mediate e prive di effetti scala ed inoltre, dalla possibilità che in opera vi siano soluzioni di continuità così nette tali da generare porzioni murarie completamente isostatiche e non collegate all'organismo resistente complessivo, generando informazioni forvianti e prive di significato per gli accertamenti della affidabilità. Con la consapevolezza che questi argomenti sia per brevità che per la loro intrinseca complessità non possono essere trattati in questo contesto, di seguito è proposto uno schema di sistema di monitoraggio a fibra ottica, eludendo queste problematiche e rimandando per i dovuti approfondimenti alla letteratura specifica.



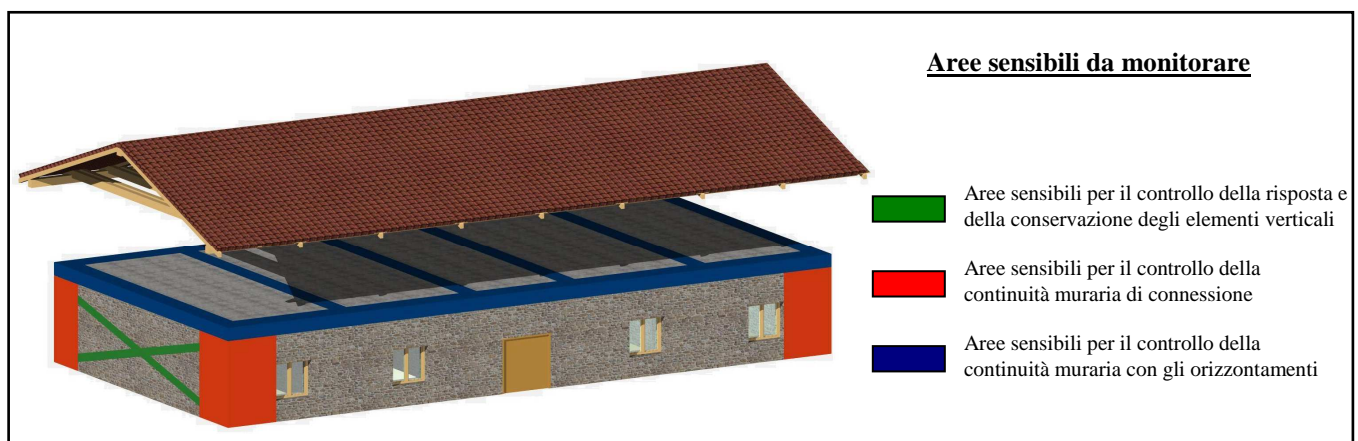
*Fig. 6 – Edificio in muratura - elementi resistenti*

La proposta del sistema di controllo è fondata su due aspetti principali, la prima di riconoscere quali parti strutturali di un edificio in muratura rappresentano gli elementi primari che si oppongono al sisma e garantiscono un adeguato coinvolgimento di tutte le risorse disponibili (fig.6); la seconda, di solidarizzare in predefinite aree (fig. 7) dell'apparato murario, barre di acciaio e di disporre su di esse rilevatori di deformazione di lunghezza adeguata, che consentano di cogliere le variazioni di sforzo lungo l'asse

dell'elemento metallico.

In riferimento alla individuazione degli elementi primari, notoriamente i maschi murari verticali svolgono il ruolo di elementi resistenti principali quando sono ben solidarizzati, sia agli orizzontamenti, sia agli altri elementi verticali disposti in posizione trasversale. Con riferimento pertanto allo schema semplificato riportato nella figura 6, possiamo riconoscere in un organismo murario semplificato principalmente tre parti resistenti principali, ossia, i pannelli murari, i cordoli di collegamento e le zone di ammorsamento di pannelli disposti trasversalmente tra di loro.

La conseguenza di queste osservazioni elementari è che le aree da tenere sotto controllo con i rilevatori di deformazione sono quelle raffigurate schematicamente nella figura 7. In tali aree, per effetto del sisma, sono attese delle modifiche dei regimi di sforzo associate da una variazione delle deformazioni preesistenti.

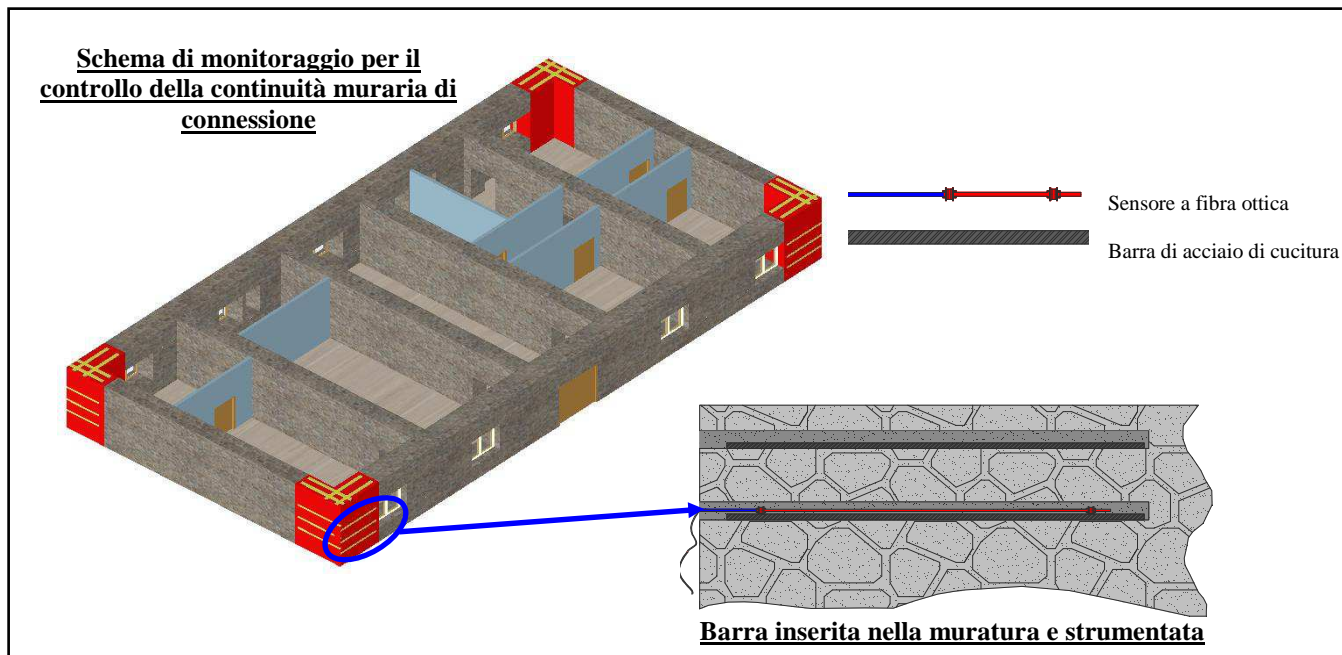


*Fig. 7 – Edificio in muratura aree da monitorare*

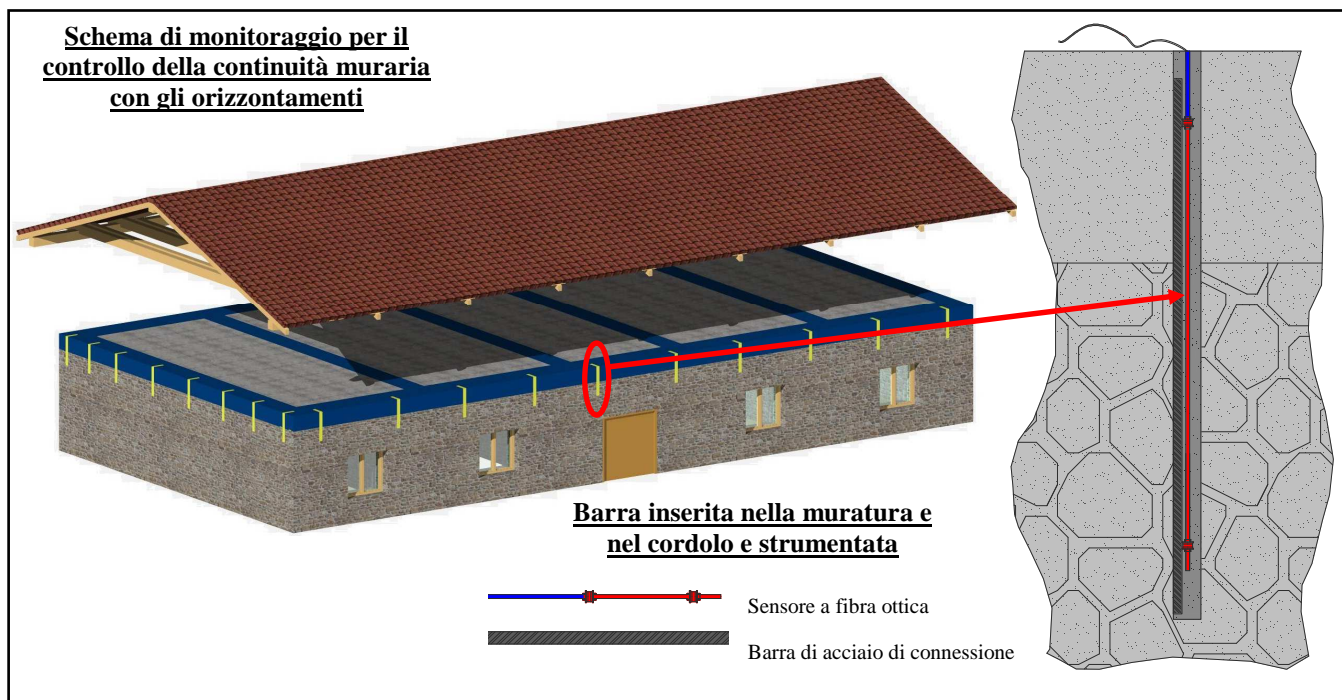
La possibilità di cogliere nelle aree indicate, modifiche del regime di deformazioni con misure quasi puntuali è estremamente arduo. Una delle vie che è possibile seguire per ridurre gli effetti scala e mitigare gli effetti locali, è quello di inserire per lunghezze apprezzabili all'interno della muratura, con l'ausilio del carotaggio, delle barre di acciaio sulle quali possono essere installati i sensori a fibra ottica.

Negli interventi di consolidamento spesso si ricorre all'uso di barre in acciaio siano essi normali, inox o di materiale composito pultruso, al fine di aumentare le risorse delle sezioni resistenti o per solidarizzare gli elementi tra di loro. È su questi rinforzi che sarà possibile intervenire con piccoli accorgimenti, affinché essi possano accogliere i sensori a fibra ottica e divenire uno degli elementi base del sistema di monitoraggio.





*Fig. 8 – Schema di monitoraggio per il controllo della continuità muraria di connessione*  
 Con riferimento alle tre aree prima identificate, verranno illustrati alcuni schemi di intervento con barre, sulle quali potranno essere installati i rilevatori di deformazione. In figura 8 sono illustrati i quattro spigoli di un edificio sui quali è prevista una procedura di cucitura per rinforzare le zone di connessione. In queste zone la possibilità di verificare la continuità muraria nel tempo, potrà essere assicurata, applicando sulle barre prima dell’inserimento nella muratura dei sensori di deformazione.



*Fig. 9 – Schema di monitoraggio per il controllo della continuità muraria con gli orizzontamenti*

Analogamente il controllo della continuità tra i maschi murari e i solai potrà essere verificata applicando sulle barre, inserite nella muratura per collegare i cordoli in c.a., dei rilevatori a fibra ottica (fig. 9).

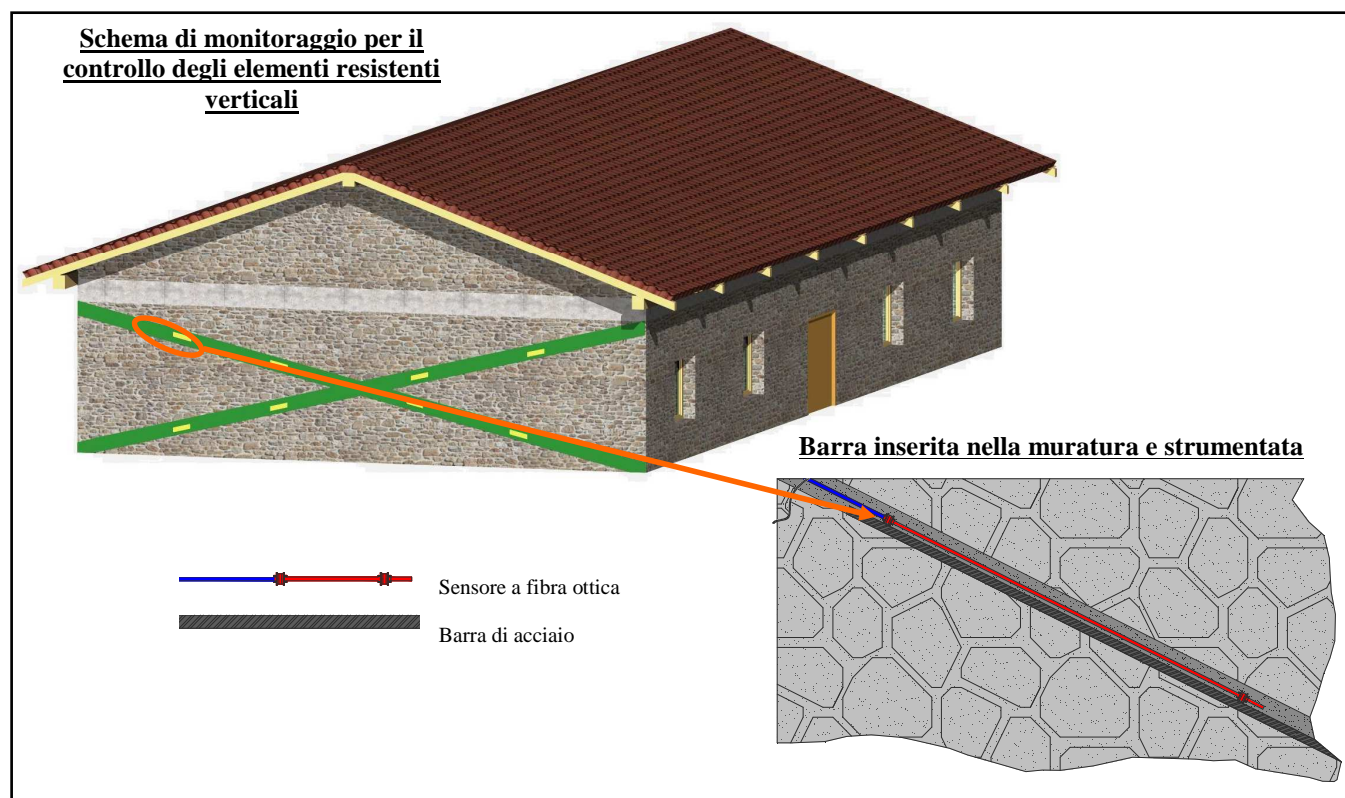


Fig. 10 – Schema di monitoraggio per il controllo degli elementi resistenti verticali

Anche il monitoraggio del comportamento a taglio degli elementi verticali potrà essere garantito attraverso dei sensori applicati su elementi in acciaio inseriti per come illustrato schematicamente nella figura 10 a croce di S. Andrea.

In definitiva, attraverso l'applicazione di elementi guida in acciaio utilizzati come basi di riferimento sui quali applicare dei misuratori di deformazione, è possibile definire un sistema di monitoraggio in opera per il controllo dei livelli di affidabilità delle strutture murarie esistenti. Naturalmente, un sistema efficace di controllo dovrà scaturire da una consistente analisi numerica di simulazione del comportamento dell'edificio sotto sisma, mediante la quale saranno individuati gli elementi resistenti da tenere sotto controllo per poter successivamente installare i rilevatori di deformazione sui supporti in acciaio. Inoltre, sarà indispensabile che i processi di acquisizione, elaborazione e interpretazione dei dati siano disciplinati da protocolli procedurali, dove saranno raccolte in ordine temporale le azioni da porre in essere per raggiungere gli obiettivi prefissi.

## CONCLUSIONI

La pericolosità degli eventi sismici, la probabilità che essi interessino una certa area e la portata dei danni che conseguentemente possono presentarsi, sono solitamente misurati con un indicatore definito rischio sismico. Il rischio sismico è funzione della vulnerabilità sismica delle strutture, ossia più è bassa la vulnerabilità a parità di altri fattori, più è basso il rischio sismico. Dal momento che l'opera entra in servizio, per una serie di fattori legati ai materiali e anche per le eventuali condizioni di carico che possono interessare la struttura, la vulnerabilità sismica può aumentare. Tali variazioni incidono ovviamente, direttamente con la sicurezza dell'immobile e con l'incolumità degli occupanti. Un controllo sperimentale basato su tecniche di monitoraggio residenti a fibra ottica, consente per come è stato illustrato precedentemente, di perseguire gli obiettivi utili a garantire una mitigazione del rischio attraverso il controllo della vulnerabilità. Tali sistemi, oggi sempre più diffusi, rappresentano un potente mezzo per valutare le reali condizioni di conservazione e di prestazione degli edifici, al fine di poter prevenire la reale risposta sotto le azioni dinamiche che si producono a seguito dei terremoti. La proposta di monitoraggio presentata nella presente nota e basata sull'uso dei rilevatori di deformazione a fibra ottica, potrà rappresentare una prima soluzione al problema evidenziato, ma necessariamente, dovrà essere prima validata sul campo in modo da verificarne l'affidabilità dell'impianto e la reale portata dei risultati conseguibili.

*Il presente articolo è stato redatto nell'ambito del Progetto Pon 01\_02701 MASSIMO con il contributo del Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, del Ministero dello Sviluppo Economico e dell'Unione Europea.*

## BIBLIOGRAFIA

- [1] C.I. Merzbacher, A.D. Kersey, E.J. Friebele – “Fiber optic sensors in concrete structures: a review”. *Smart Materials and Structures* 5 (1996) 196-208.
- [2] Ansari F. – “Practical implementation of optical fiber sensors in civil structural health monitoring”. *Intell Mater Syst Struct* 1998;18:879-89.
- [3] H. Li, D. Li, G. Song – “Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering”. *Engineering Structures* 26 (2004) 1647-1657.
- [4] Fu-Zhen Xuan, Hongwei Tang, Shan- Tung Tu – “In situ monitoring on prestress

losses in the reinforced structure with fiber-optic sensors”. *Measurement* 42 (2009) 107-111.

[5] G. Porco, D. Romano, G. F. Valer Montero – “Controllo e monitoraggio: strumenti per la verifica strutturale e per la mitigazione del rischio sismico”. *Stringhe*, Quadrimestrale di divulgazione scientifico culturale dell’Università della Calabria. (In fase di pubblicazione)

[6] Z. Djinovic, M. Tomic, C. Gamauf – “Fiber-optic Interferometric Sensor of Magnetic Field for Structural Health Monitoring”. *Proc. Eurosensors XXIV*, September 5-8, 2010, Linz, Austria. *Procedia Engineering* 5 (2010) 1103-1106.

[7] Paulo Antunes, Humberto Varum, Paulo Andrè – “ Optical FBG Sensors for Static Structural Health Monitoring”. *The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction*. *Procedia Engineering* 14 (2011) 1564-1571.

[8] J.H. Mao, W.L. Jin, Y. He, D.J. Cleland and Y. Bai – “A novel method of embedding distributed optical fiber sensors for structural health monitoring”. *Smart Materials and Structures* 20 (2011) 125018 (9pp).

[9] B. Glisic, D. Inaudi, A. Del Grosso, F. Lanata, G. Brunetti - “Monitoraggio a breve e a lungo termine nelle strutture in calcestruzzo tramite sensori a fibre ottiche”. *22° Convegno Nazionale AICAP 2002*, Pages 531-540, June 6-8, Bologna, Italy.

[10] R.M. Measures, S. Melle, K. Liu – “Wavelength demodulated Bragg grating fiber optic sensing systems for addressing smart structure critical issues”. *Smart mater. Struct.*1.(1992).

[11] H.W. Shenton, M.J. Chajes, G.R. Wenczel - “Indian river inlet bridge structural health monitoring system”. *DelDOT Winter Workshop* February 14, 2013.