

**STRINGHE – Quadrimestrale di divulgazione scientifica dell'Università della Calabria**

**CONTROLLO E MONITORAGGIO: STRUMENTI PER LA VERIFICA  
STRUTTURALE E PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO SISMICO**

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)

**PREMESSA**

Nel presente lavoro sono illustrate alcune metodologie di controllo sperimentale utili per lo studio del comportamento di edifici [1], [2], [14], opere di sostegno e viadotti [5], basate sull'uso di architetture di monitoraggio a fibra ottica. Tali metodologie sperimentali, vedremo nel seguito, costituiscono efficaci strumenti per effettuare verifiche di affidabilità strutturale sia nelle fasi di realizzazione delle opere, sia nel corso della vita utile. In pratica, attraverso protocolli procedurali oramai consolidati, si può determinare la reale affidabilità di una struttura nei riguardi delle condizioni di carico cui essa sarà chiamata a sopportare, compresa quella sismica. Inoltre con la disponibilità in tempo reale dei livelli di deformazione in alcuni punti delle membrature portanti, è possibile valutare in tempi rapidissimi se una struttura, a seguito di un sisma, può ancora assolvere alla sua funzione di progetto o deve essere oggetto di restrizioni all'uso o di interventi di consolidamento.

Nei riguardi del rischio sismico, le attività di controllo e monitoraggio incidono fortemente su uno dei fattori che lo costituiscono, ossia sulla vulnerabilità sismica. Infatti, con efficaci azioni di controllo basate su rilevazioni di deformazioni attraverso dedicate architetture di monitoraggio, sin dalle fasi costruttive si può incidere sulla vulnerabilità delle nostre strutture, innalzandone le prerogative prestazionali, e inducendo come conseguenza, una riduzione della vulnerabilità e quindi del rischio sismico.

**INTRODUZIONE**

Il tema sisma in questi ultimi anni è divenuto un argomento di grande attualità e interesse, coinvolgendo su tutto il territorio Nazionale, non solo componenti tecniche, politiche e produttive del nostro paese, ma anche i singoli cittadini che, in alcune aree sono stati e sono tutt'ora interessati da fenomeni sismici di bassa intensità, ma che si presentano con un alto numero di eventi.

Storicamente gli eventi sismici che hanno interessato il territorio Italiano hanno tutti avuto un unico filo comune, e cioè di mettere in risalto la elevata vulnerabilità sismica delle nostre costruzioni e l'inadeguatezza, almeno fino a qualche anno addietro, della classificazione del

territorio per la valutazione delle azioni sismiche. Partendo dagli eventi più recenti che hanno colpito il territorio dell'Aquilano, in quel contesto, sono emerse carenze strutturali anche su edifici appena realizzati e ancora non entrati in servizio. La vulnerabilità reale di queste strutture è stata enormemente incrementata, rispetto a quella teorica, per effetto di carenze rilevate sui materiali utilizzati, per difetti costruttivi e anche per errate valutazioni progettuali. Il tutto si è tradotto in un incremento del rischio sismico reale rispetto a quello teorico previsto e auspicato.

Gli ultimi eventi che hanno interessato la regione Emilia Romagna hanno invece messo in risalto prepotentemente la elevata vulnerabilità delle aree industriali, realizzate per la quasi totalità con elementi prefabbricati. In tale contesto, a parte la già citata inadeguatezza della classificazione territoriale per la valutazione delle azioni sismiche, oggi sicuramente migliorata con le NTC08, è stato evidenziato che, in alcuni contesti territoriali, particolari tipologie costruttive di prefabbricazione mal si adattano ad assorbire condizioni di carico orizzontali e possono, come è accaduto, essere interessate da rovinosi crolli.

Il concetto di 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, può essere di aiuto per meglio comprendere quali siano le cause dei crolli e dei collassi e quali siano i fattori su cui incidere per ottenere una riduzione di questo fattore, magari utilizzando procedure e metodologie disponibili dal mondo della ricerca. Il rischio sismico 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. 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.

Un'altra variabile che incide e che può incrementare la vulnerabilità sismica è il tempo. Al trascorrere del tempo e cioè dopo l'entrata in servizio, 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 producendone un incremento, di fatto le reali risorse della struttura attivabili contro il sisma subiscono ancora una volta una riduzione, rispetto a quelle attese e quindi teoriche.

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 i reali coefficienti di sicurezza del manufatto, il quale avrà quindi una reale

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.

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[3], [10]. In pratica, su 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[7]. I sistemi sono sostanzialmente costituiti da sensori di spostamento collocati il più delle volte, sulle barre d'acciaio o sui trefoli di precompressione, su una predeterminata base di misura, successivamente inglobati nel getto di calcestruzzo, ed interrogati all'occorrenza. La portata delle attività tecniche di controllo sviluppabili con tali sistemi è estremamente vasta. Restando nel tema della prevenzione sismica, sicuramente con campagne sperimentali dedicate sarà possibile valutare la perfetta rispondenza dell'opera realizzata sulla base di dati oggettivi al progetto originario e sarà possibile escludere eventuali vizi o difetti costruttivi. Inoltre con rilevazioni e controlli eseguiti nel rispetto dei piani di manutenzione, sarà possibile verificare l'immutata consistenza strutturale al trascorrere del tempo ed in esercizio. In ultimo, il sistema di monitoraggio residente costituirà un formidabile strumento da utilizzare a valle di sismi di elevata intensità, per verificare l'oggettiva fruibilità all'uso di una struttura o per inibirne temporaneamente l'uso. In questo campo muove la presente nota, con la quale verranno illustrate le potenzialità di queste metodologie sperimentali applicate agli edifici di civile abitazione, alle opere di sostegno e ai ponti. Considerata la esclusiva finalità divulgativa della nota, si rimanda per gli opportuni approfondimenti tecnici ai diversi articoli specialistici disponibili in letteratura.

## **1. CONTROLLO E MONITORAGGIO DI STRUTTURE IN C.A. DI NUOVA REALIZZAZIONE**

Il monitoraggio strutturale, implementato come attività continuativa che segue la struttura portante di un edificio sin dalle fasi costruttive e per tutto il ciclo di vita, sicuramente riduce le incertezze sulle caratteristiche dei materiali utilizzati, garantendo il rispetto della congruenza con i parametri meccanici previsti in fase di progetto, l'assenza di eventuali difetti costruttivi, e con l'ausilio di dati sperimentali, lo stato di mantenimento dei requisiti di progetto dall'entrata in servizio dell'opera.

Queste importanti prerogative incidono fortemente sulla vulnerabilità sismica di una struttura e risultano molto spesso determinanti, concorrendo alla definizione di un alto rischio sismico.

Per come già riportato, il rischio sismico è funzione di tre importanti parametri, ossia la pericolosità, la esposizione e la vulnerabilità. Con le tecniche di controllo è possibile contenere l'influenza della vulnerabilità sismica reale, verificando il corretto impiego di buoni materiali e, nel corso della vita utile dell'edificio, garantire il mantenimento dei coefficienti di sicurezza detenuti dalla struttura all'entrata in servizio.

Inoltre con i sistemi di monitoraggio, si possono risolvere le classiche problematiche che si presentano a valle degli eventi di alta portata, ossia la necessità di eseguire verifiche tecniche al fine di accertare la piena fruibilità degli immobili. Anche in questo caso, la disponibilità di misure di deformazione in tempo reale in punti dedicati delle membrature portanti, aiuta il tecnico a valutare la portata e l'influenza di eventuali danni accertati, sui coefficienti di sicurezza complessivi della struttura, e a stabilire la possibilità d'uso dell'opera o il suo sgombero.

Concretamente, sulle strutture in calcestruzzo armato, l'azione di monitoraggio può essere effettuata seguendo i regimi di tensione presenti sulle armature disposte nelle sezioni resistenti. Infatti, la misura di questa grandezza, anche in via indiretta, consentirà di verificare una graduale crescita dell'impegno statico in fase costruttiva, di rilevare una redistribuzione dei regimi di sforzo quando, per cause non previste e non prevedibili, la struttura monitorata modifica la sua configurazione originaria relativa alla fase di entrata in servizio.

I rilevatori di deformazione o di spostamento sono applicati sulle barre d'armatura durante il corso delle fasi costruttive dell'opera, in corrispondenza di sezioni guida, identificate queste ultime sulla struttura nella fase di ideazione dell'architettura del sistema di controllo

A titolo di esempio, è riproposta nella figura seguente una sezione schematica di un fabbricato dove sono indicate alcune sezioni monitorate e il posizionamento sulle barre d'acciaio dei rilevatori di deformazione.

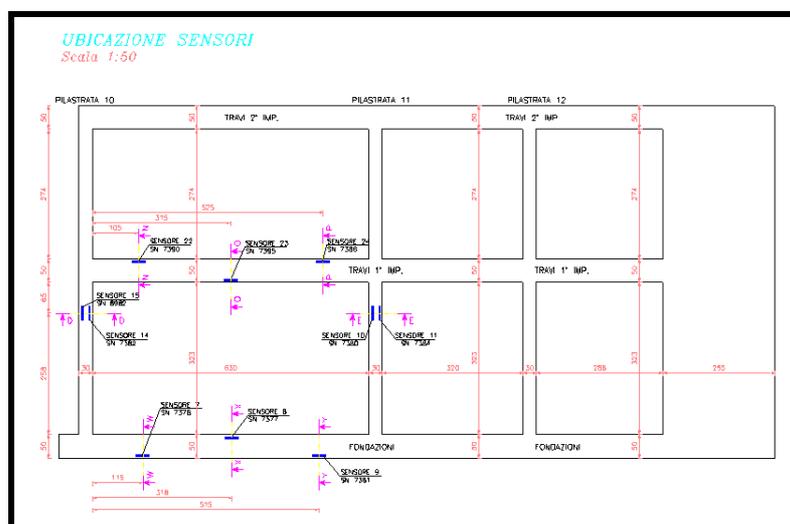
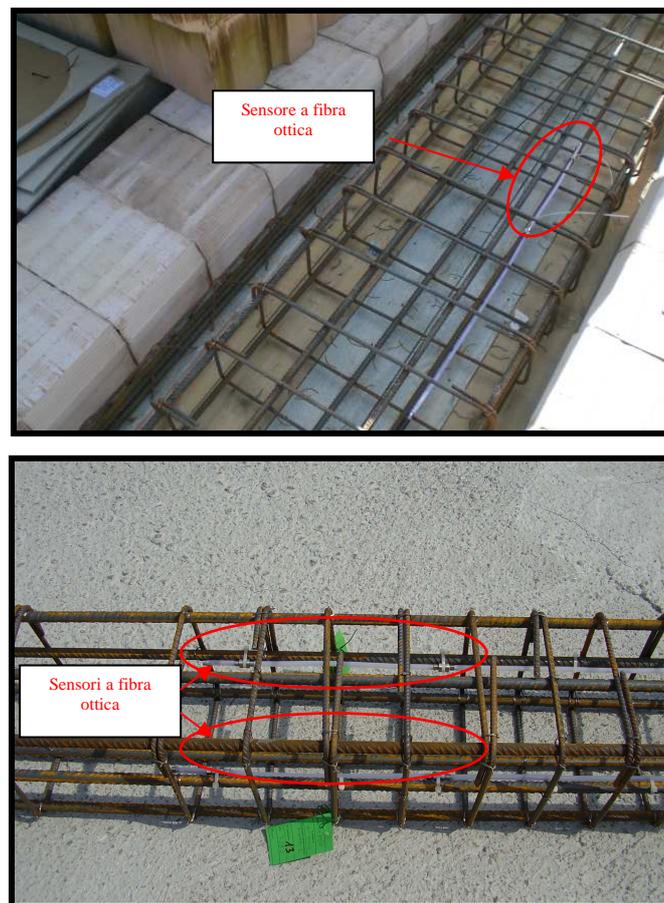


Fig. 1 – Schema di posizionamento dei sensori a fibra ottica in una ossatura portante.

Per quanto attiene al montaggio in opera degli strumenti di rilevazione, tale attività non modifica e non interferisce con le attività realizzative della struttura. Il montaggio dei rilevatori avviene nella fase in cui le armature sono già disposte nei casseri e il passaggio dei cavi di collegamento interessa le parti di calcestruzzo ancora da realizzare o le solette dei solai. Nelle immagini riportate di seguito sono riprodotte fasi di montaggio dei sensori in opera su alcune travi e su alcuni pilastri.



*Fig 2 – Fasi di montaggio dei sensori a fibra ottica su travi e pilastri.*

In merito alla campagna sperimentale, essa sarà essenzialmente suddivisa in due grandi fasi. La prima, dedicata alle attività di realizzazione del sistema di monitoraggio ed alle attività di costruzione dell'opera, sarà quella che verificherà la qualità dei materiali e l'assenza di difetti costruttivi attestando che l'edificio possiede le prerogative di progetto e quindi una vulnerabilità sismica secondo quanto imposto dalle norme vigenti.

La seconda fase di misure, sarà orientata principalmente al controllo in esercizio ed a creare un supporto alle verifiche periodiche disciplinate dal piano di manutenzione, attraverso le quali si verificherà la conservazione dello stato di affidabilità dell'opera in riferimento all'entrata in esercizio, assicurando al trascorrere del tempo, il mantenimento dei coefficienti di sicurezza e quindi una vulnerabilità sismica secondo quanto previsto dalle norme tecniche di riferimento.

Nella figura seguente, con riferimento ad una membratura monitorata, ed in particolare al regime di deformazione acquisito su un periodo temporale di ventiquattro mesi e per una singola barra d'acciaio, sono riportate le fasi prima descritte con l'indicazione dei gruppi di lettura.

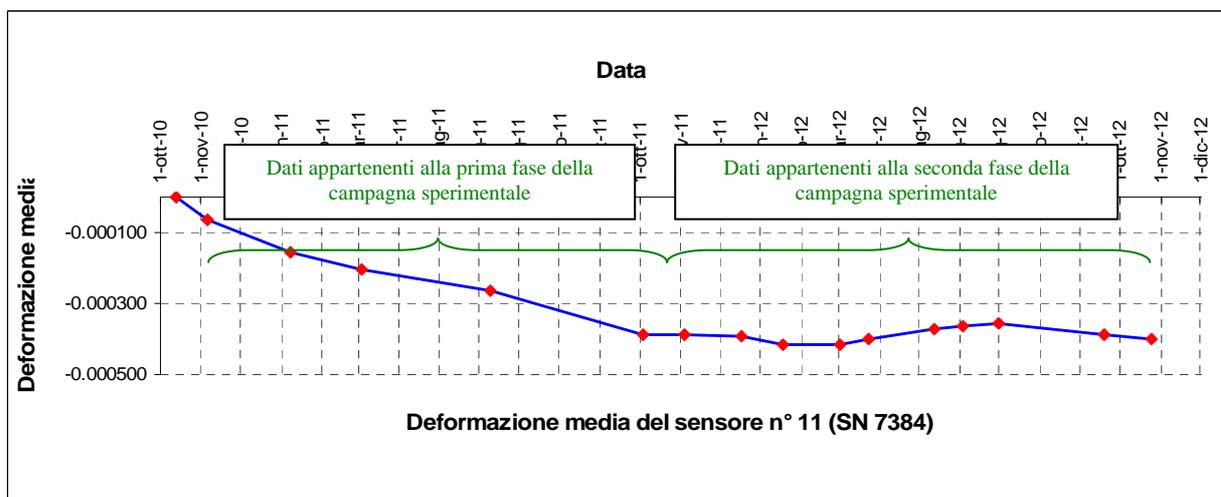


Fig. 3- Andamento delle deformazioni nel tempo con suddivisione in fasi.

La fase di verifica delle modalità costruttive, inizia nel momento in cui il sensore viene installato; durante questa prima attività, sono eseguite le misurazioni iniziali, che hanno anche lo scopo di certificare il buon funzionamento dei rilevatori applicati. Complessivamente in questa fase riconosciamo due gruppi di misura, il primo comprende misure di installazione del sistema e serve a validarne l'affidabilità, nonché l'esistenza di spazi di escursione sufficienti sul singolo sensore in trazione e in compressione. Il secondo gruppo, è invece proprio della campagna sperimentale di verifica costruttiva. L'intervallo temporale durante il quale verrà eseguita questa verifica, si sviluppa secondo preordinati eventi di misura, tali da evidenziare gli effetti di disturbo provenienti dal ritiro del calcestruzzo e presenti sulle deformazioni delle barre d'acciaio monitorate;

L'insieme delle operazioni da compiere possono essere raccolte in un protocollo procedurale nel quale si riconoscono le seguenti azioni principali:

1. Acquisizione di dati sperimentali in opera secondo una prefissata cronologia temporale, creando due gruppi di misure: il primo costituito da valori attestanti la funzionalità del sistema di monitoraggio, il secondo relativo a misure grezze, ossia non depurate, per il controllo delle fasi costruttive.
2. Graficizzazione delle progressioni deformative su intervalli temporali interconnessi con le fasi costruttive.
3. Modellazione teorica della struttura monitorata attraverso l'impiego di un solutore agli elementi finiti per preordinate condizioni di carico e per definite geometrie costruttive intermedie.

4. Valutazione degli effetti secondari sulle misure sperimentali quale il ritiro, in relazione alla membratura monitorata e identificazione dei valori sperimentali filtrati o depurati.
5. Confronto teorico – sperimentale e interpretazione dei percorsi deformativi teorici e sperimentali depurati.

La seconda fase di verifica relativa allo stato di esercizio invece, ha inizio nel momento in cui l'edificio entra in servizio, che coincide, sotto il profilo giuridico, con il compimento di un iter burocratico che, attraverso la relazione a struttura ultimata e il collaudo, si chiude con il rilascio di un certificato di abitabilità. Per quanto attiene invece, ai regimi di sollecitazione, l'entrata in servizio di una struttura coincide con la presenza di pesi propri, carichi permanenti, accidentali, ma principalmente con la stabilizzazione del regime di sollecitazione interno, il quale, associato ad una configurazione definitiva e stabile della struttura, subirà esclusivamente variazioni indotte dagli effetti stagionali. L'entrata in servizio della struttura sotto il profilo dei regimi di sollecitazione, non sempre coincide, con la chiusura dell'iter giuridico, anzi è proprio a partire dalla entrata in servizio ufficiale dell'opera, che è possibile riconoscere un intervallo temporale transitorio, durante il quale avviene il completamento dei processi di carico incompleti e la stabilizzazione delle configurazioni di equilibrio. Inoltre in questo periodo, essendo le strutture in c.a. a multi iperstatiche, si registra il completamento del fenomeno di adattamento strutturale ai carichi e alle condizioni al contorno, pervenendo ad una distribuzione dei regimi di sforzo secondo un preordinato ordine di rigidzze, ed associato ad una condizione di equilibrio stabile. Il periodo definito transitorio o di stabilizzazione dei regimi di sforzo, ha una estensione variabile ed è funzione della complessità dell'opera in termini di distribuzione di rigidzze; inoltre apprezzabile è l'influenza sull'estensione temporale del transitorio, della natura e della consistenza dei terreni di fondazione.

La determinazione del compimento delle fasi di stabilizzazione e quindi il termine del transitorio, coincide sperimentalmente con un evento a partire dal quale, i valori di spostamento producono forme ad andamento sinusoidale, sovrapponibili all'alternarsi delle stagioni e oscillanti rispetto a valori medi costanti. Tutte le misure, eseguite a partire dal momento in cui è estinto il periodo transitorio, confluiranno in un *database*. Solitamente il periodo di acquisizione successivo alla fine del transitorio, comprende almeno dodici mesi di osservazione in modo da inglobare, nel campione che successivamente sarà utilizzato per la verifica comparativa, le perturbazioni dovute agli effetti stagionali di temperatura e di escursione di falda qualora presente.

Disponendo dell'andamento degli spostamenti nel tempo rilevati sulle basi di misura poste sulle membrature portanti, potranno essere effettuate le verifiche sul perfetto funzionamento strutturale dell'opera in corso di esercizio. In qualsiasi momento quindi, potranno essere confrontati i valori misurati in tempo reale con quelli riferiti allo stesso periodo, e contenuti nel *database*,

valutando anomalie e scostamenti e attivando, se necessario, indagini più approfondite. Anche in presenza di eventi sismici, la disponibilità del *database* diventa un formidabile strumento di confronto, consentendo agli operatori del settore di disporre di dati oggettivi per valutare il livello di danno presente sull'immobile e per stabilire l'affidabilità all'uso dell'edificio. Si può quindi affermare che, con l'ausilio di un sistema di controllo residente, è possibile garantire il mantenimento delle prerogative di progetto e quindi un livello di vulnerabilità sismica in linea con quanto previsto dalle norme tecniche. Inoltre, la disponibilità di misure di riferimento consente, a valle di eventi sismici di grossa portata, di fornire risposte immediate e basate su dati oggettivi, sulla possibile utilizzazione degli edifici o sul loro eventuale sgombero.

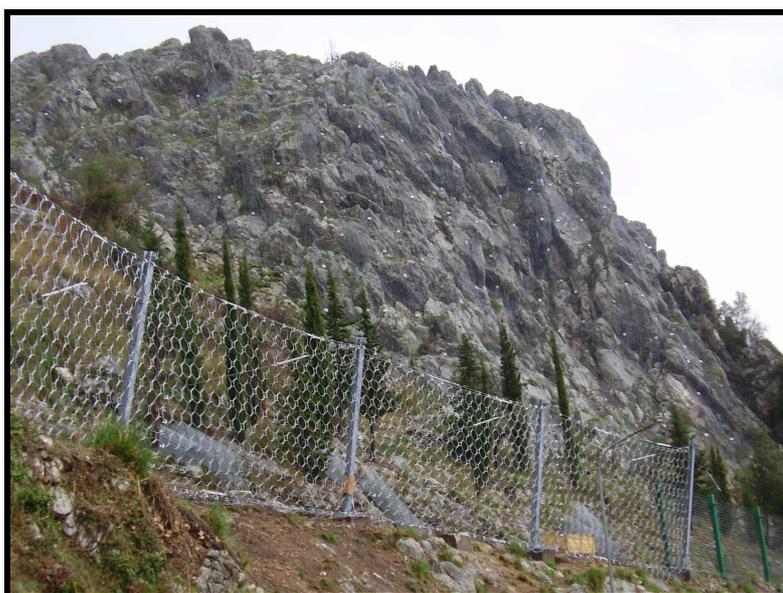
## **2. CONTROLLO E MONITORAGGIO DI OPERE PER LA STABILIZZAZIONE E IL SOSTEGNO DI VERSANTI.**

Le tecniche di controllo a fibra ottica e quindi il monitoraggio, anche in campo geotecnico, possono costituire un utile strumento per dare affidabili risposte, non solo in base a quanto richiesto dalla vigente Normativa, ma rappresentare un potente veicolo per contribuire a ridurre, in molte circostanze, la vulnerabilità sismica. Anche su tali opere, la possibilità di incidere in positivo sulla loro risposta sismica, è sempre legata alla buona qualità dei materiali impiegati per la loro realizzazione, al rispetto delle modalità costruttive contenute nelle prescrizioni di progetto e al mantenimento nel tempo dei coefficienti di sicurezza. In effetti, anche per queste tipologie costruttive, disporre di metodologie sperimentali attraverso le quali, si possa controllare la qualità realizzativa, intesa non solo come verifica dei parametri meccanici dei materiali impiegati ma, come verifica complessiva di una risposta strutturale prescritta e mantenuta anche al trascorrere del tempo, assicura livelli di affidabilità noti e quindi una vulnerabilità sismica in linea con quanto previsto dalle normative in materia. Le opere geotecniche, anche quelle ordinarie, rivestono il più delle volte caratteri di alta importanza sul territorio. Infatti, spesso, grazie alla loro affidabilità e al loro corretto funzionamento sono assicurati i collegamenti viari e le vie di accesso ai centri abitati. In altre circostanze, quando si circoscrive l'analisi alle opere di sostegno, poste a tergo di aree o di spazi pubblici, garantiscono l'uso di unità abitative o di aree di ammassamento o di primo intervento. Quindi, la portata dell'affidabilità sismica di queste opere non è fine a se stessa, ma a volte produce in modo indotto, un incremento di vulnerabilità sismica anche su quelle ad esse limitrofe.

In analogia a quanto illustrato per le strutture di nuova realizzazione in c.a., con i sistemi residenti di controllo a fibra ottica è possibile mitigare il rischio sismico inducendo una riduzione della vulnerabilità sismica dell'opera. La vulnerabilità sismica, per come già evidenziato, è la propensione di una struttura, di subire un danno di un determinato livello, a fronte di un evento

sismico di una data intensità. Quindi teoricamente, una nuova costruzione, in fase di progettazione, possiede una vulnerabilità sismica teorica che, a seguito di come successivamente saranno condotte le fasi costruttive, si traduce con una conferma o con una riduzione, in una vulnerabilità sismica reale. Ciò a dire che, solo con il rispetto di quanto contenuto nelle richieste di progetto ed in assenza di difetti costruttivi, all'entrata in servizio l'opera mostrerà un'auspicata convergenza tra le due tipologie di vulnerabilità. Diverso è invece il mantenimento delle prerogative di sicurezza nel corso della vita utile. In questo caso, l'entrata in servizio assegna una vulnerabilità sismica di progetto all'opera che gioco forza, in corso di esercizio, sia per i regimi di sollecitazione presenti, sia per le condizioni al contorno variabili, sarà soggetta a modifiche, già solo per il deterioramento dei materiali. Quindi, molto spesso il trascorrere del tempo ed il lavoro in esercizio della struttura, può essere accompagnato da una riduzione delle prestazioni con un conseguente aumento della vulnerabilità associata ad un incremento del rischio sismico.

Per le opere di stabilizzazione dei versanti e per le opere di sostegno, in genere è possibile garantire le prestazioni di progetto e il mantenimento dei coefficienti di sicurezza all'entrata in servizio, utilizzando protocolli procedurali di verifica basati su sistemi di monitoraggio residenti a fibra ottica. I vantaggi del controllo e del monitoraggio saranno evidenti già dalle fasi realizzative, consentendo di misurare i reali stati di sollecitazione e rilevando, specialmente per gli interventi di stabilizzazione dei versanti, la reale efficacia delle chiodature e il livello di tiro delle barre ancorate nei suoli. Per gli interventi di stabilizzazione dei versanti, sarà possibile monitorare direttamente i tiranti applicando, sulle barre utilizzate per eseguire le cuciture e in diverse sezioni, i sensori di deformazione. In figura n.5, è rappresentato schematicamente un tirante in barre dywidag in opera con alcune sezioni strumentate.



*Fig. 4 - Costone roccioso stabilizzato con barre di ancoraggio*

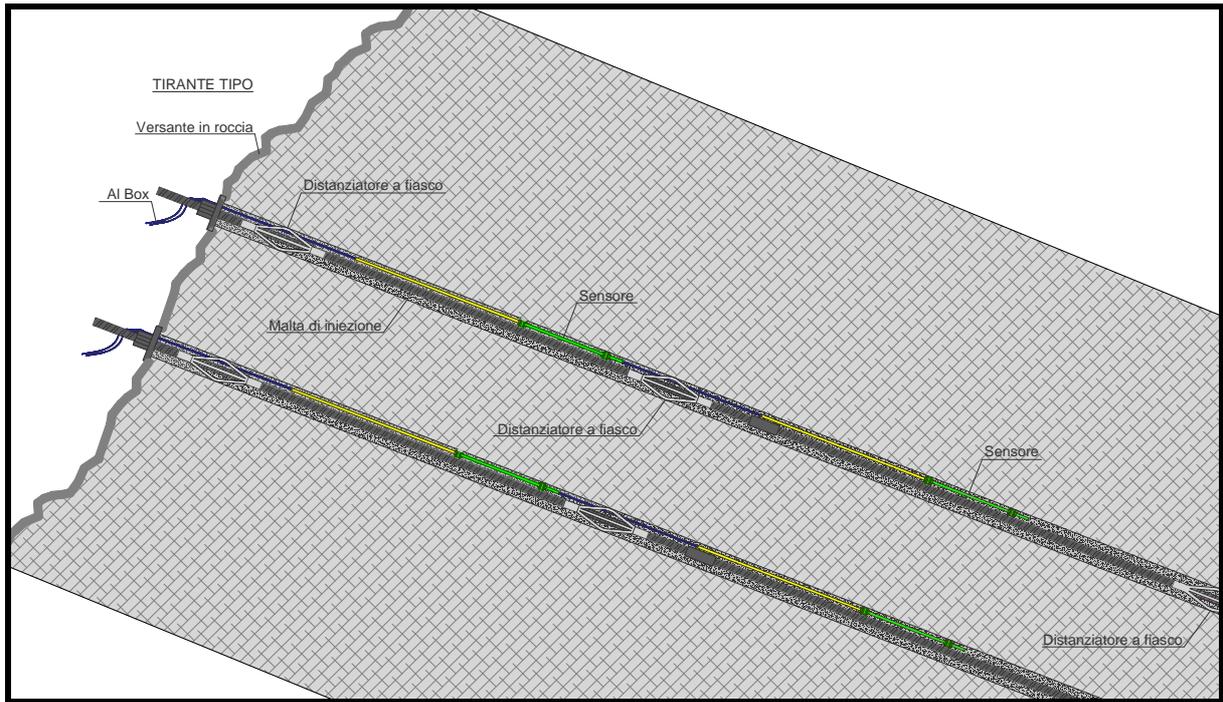


Fig. 5 – Schema di stabilizzazione con tiranti in barre Dywidag strumentate con sensori di deformazione

Nella figura seguente invece è raffigurata una barra con i sensori applicati con riportate alcune misure geometriche, mentre nella successiva, sono riportate alcune barre già strumentate e pronte per essere collocate a dimora.

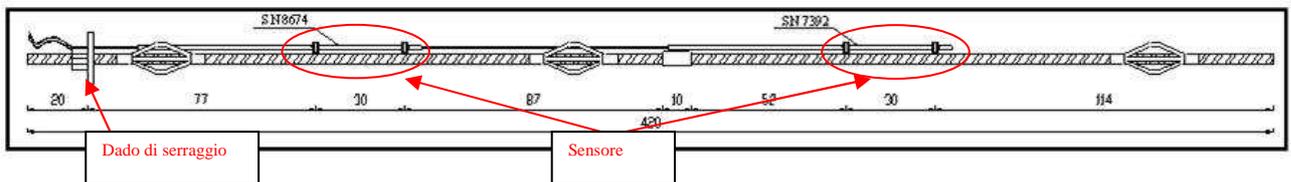


Fig. 6 – Schema di montaggio di due rilevatori di deformazione su un singolo tirante di ancoraggio



Fig. 7 – Barre di ancoraggio pronte per essere inserite nei fori di perforazione

Il sistema di controllo consente di seguire le fasi realizzative e interrogato opportunamente, durante prove di tiro, fornisce utili informazioni per attestare sia la corretta realizzazione delle cuciture, che la presenza dei reali coefficienti di sicurezza richiesti in progetto. In pratica, sarà possibile accertare se la vulnerabilità sismica teorica coincide con la vulnerabilità sismica reale. Per quanto attiene invece ai controlli in esercizio, anche in questo contesto sarà utile tenere sotto monitoraggio l'opera acquisendo parametri di deformazione per un periodo di tempo sufficientemente rappresentativo, tale da comprendere tutte le escursioni delle condizioni al contorno di natura stagionale. Tali valori costituiranno, in un *database*, il campione di comparazione per verificare, il mantenimento dei coefficienti di sicurezza all'origine o per accertare, a seguito di un sisma di alta intensità, se le strutture resistenti sono state danneggiate o se sono ancora, perfettamente funzionanti.

In riferimento alle opere di sostegno classiche e cioè i muri di sostegno in c.a., queste hanno solitamente un comportamento strutturale molto più semplice rispetto alle strutture utilizzate per la stabilizzazione. In pratica, la procedura di controllo delle fasi costruttive si estingue con la misura di un regime di deformazione relativo al ricarico del terreno a monte o alla presenza di eventuali carichi accidentali. Le misure in alcune sezioni spia, vengono effettuate sia sul fusto che nella fondazione. Nella figura n.8, è riportato lo schema di una sezione di un muro di sostegno, con i sensori collocati sul fusto in zona tesa e compressa ed anche in fondazione. Anche in questo caso, la installazione dei rilevatori di deformazione non richiede particolari accorgimenti che modificano le fasi lavorative in cantiere. In figura n.9, è riportato un tratto di muro in c.a dove sono riconoscibili alcune sezioni strumentate.

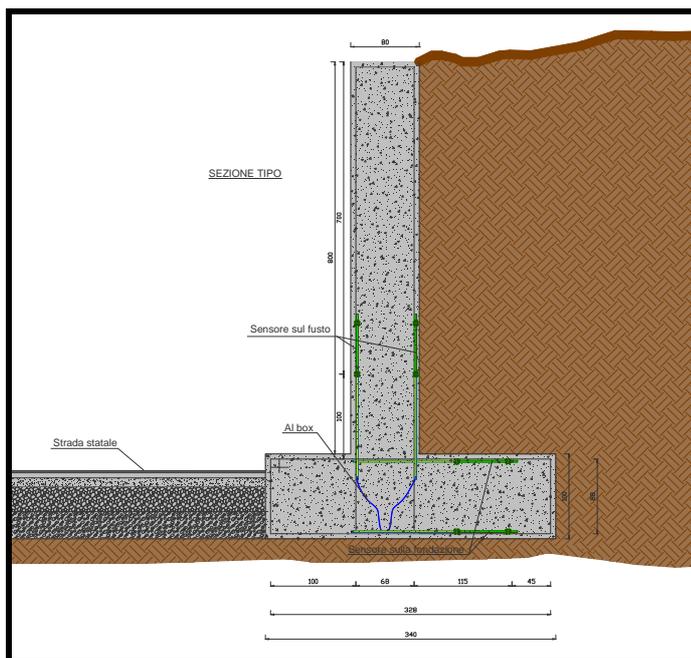


Fig. 8 – Schema tipo di un muro di sostegno in c.a. dotato di sistema di monitoraggio residente



Fig. 9 – Fase di installazione di sensori a fibra ottica su un muro di sostegno

L'attività sperimentale, espletata durante le fasi di stagionatura dei calcestruzzi e nelle fasi di ricarica del materiale a tergo, fino naturalmente alla stabilizzazione dei regimi di sforzo, consentirà di attestare la corretta esecuzione dell'opera e la mancanza di difetti costruttivi.

Successivamente, all'entrata in servizio, l'attività sperimentale potrà essere dedicata alla creazione di una banca dati con la quale potrà essere effettuato il controllo in esercizio e a valle di eventi sismici di alta intensità, per verificare anche in questo contesto la presenza di eventuali danni.

### 3. CONTROLLO E MONITORAGGIO DI VIADOTTI E PONTI IN C.A.P.

Nel monitoraggio di opere infrastrutturali, i sistemi residenti a fibra ottica trovano la loro collocazione naturale, consentendo agli operatori del settore, di svolgere attività sperimentali ad ampio spettro, con il fine di perseguire obiettivi diversificati e utili a garantire la sicurezza strutturale.

In pratica, la disponibilità di misure di deformazione, non solo sulle membrature gettate in opera, ma anche sugli elementi in c.a.p. e sin dalle fasi di realizzazione in stabilimento, risolve uno dei maggiori problemi avuti fino ad oggi nell'espletamento delle attività di manutenzione. E' infatti possibile, con dati oggettivi, garantire e verificare il mantenimento dello stato di precompressione impresso in stabilimento per tutta la durata della vita utile delle travi in c.a.p..

Nei riguardi invece della vulnerabilità sismica, l'attività di monitoraggio utilizzata con le stesse prerogative viste per le strutture geotecniche o per i fabbricati di civile abitazione, può essere un ottimo veicolo per garantire i requisiti di sicurezza previsti in progetto, sia per le pile che per le spalle e per l'intero impalcato. In pratica, sarà possibile in riferimento a spalle e pile seguire il graduale processo di carico per le diverse fasi costruttive, mentre per le travi di impalcato la verifica dei livelli di sollecitazione potrà essere avviata già sulle piste di pretensione dei cavi di

precompressione. Nella figura 10, con riferimento ad un viadotto di nuova costruzione, sono indicati gli elementi trave e la pila oggetto di monitoraggio.

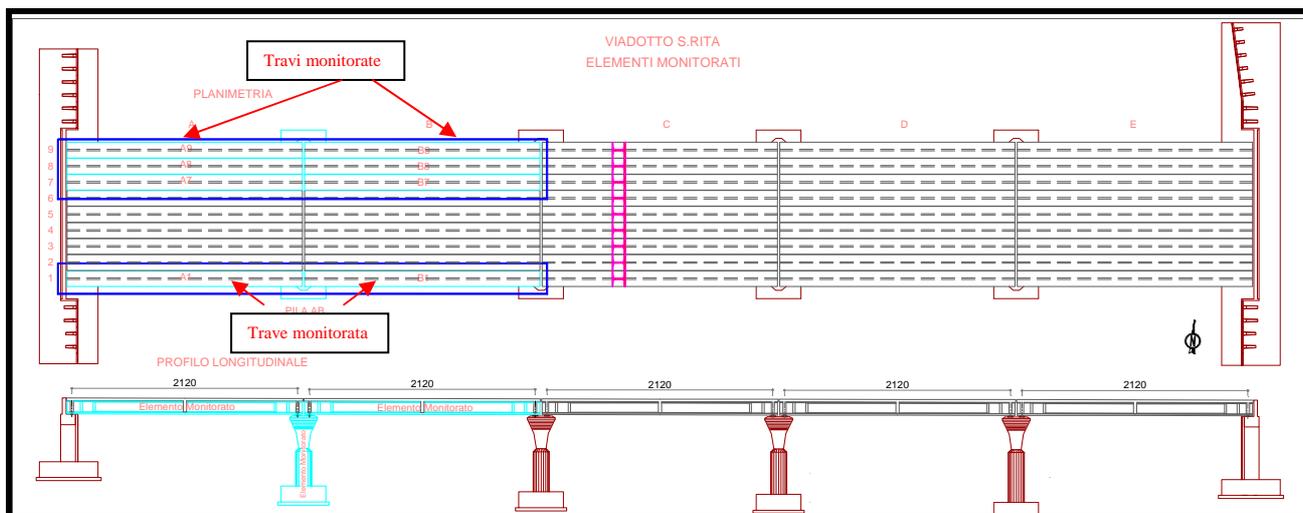


Fig. 10 – Viadotto di nuova costruzione con identificazione delle membrature monitorate

I sensori sono stati inseriti sia sulla pila realizzata in opera che sulle travi in precompresso realizzate in stabilimento. In particolare, per queste membrature, i sensori sono stati applicati sui trefoli di precompressione in stabilimento al fine di determinare i regimi di carico sin dalle fasi di confezionamento e stagionatura delle travi. Nella figura n.11, sono riportate le posizioni dei sensori sui trefoli di precompressione.

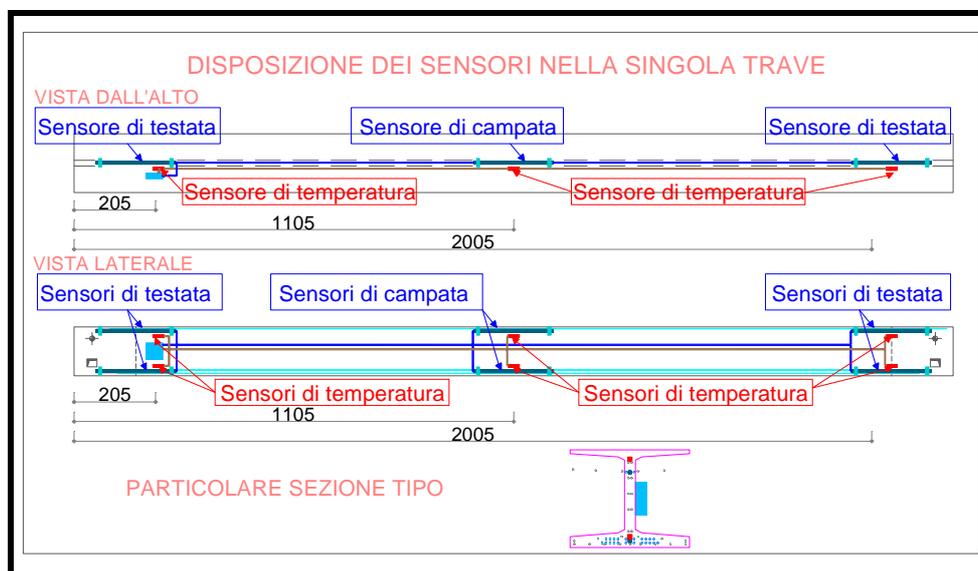


Fig. 11 – Schema per il posizionamento dei sensori nella trave in c.a.p.

Nella figura n.12, sono invece illustrate alcune fasi di montaggio dei rilevatori di deformazione. Le travi, una volta maturate in stabilimento, vengono trasportate e varate sugli apparecchi di appoggio delle strutture verticali resistenti. Anche questa fase, così delicata, potrà essere controllata mediante le rilevazioni sperimentali, al fine di attestare che sugli elementi portanti le lavorazioni non hanno prodotto alcun danno.



*Fig. 12 – Posizionamento dei sensori sui trefoli di precompressione in stabilimento*

Successivamente, durante le fasi di realizzazione degli impalcati sarà possibile far scorrere i cavi di collegamento dei sensori in soletta per attestarli in un box di testata collocato ad una delle estremità del ponte. In fig. 13, sono riportate alcune fasi di sistemazione dei cavi di collegamento dei sensori prima del getto di calcestruzzo.



*Fig. 13 – Sistemazione dei cavi di collegamento dei sensori lungo le campate del viadotto*

Per i ponti e per i viadotti la disponibilità di un sistema residente di monitoraggio a fibra ottica offre innegabili vantaggi. Sicuramente, la verifica del rispetto delle prescrizioni di progetto, prima dell'entrata in servizio, costituisce un ottimo indicatore circa la sicura convergenza tra la vulnerabilità teorica e quella reale. Inoltre, la possibilità di verificare istantaneamente i regimi di sforzo di precompressione presenti nelle travi di impalcato, consente di valutare con dati oggettivi la reale affidabilità della struttura. In analogia con quanto già sottolineato nei paragrafi precedenti è possibile affermare che, un'estesa campagna sperimentale di rilevazione inserita nel contesto manutentivo, consente di verificare il mantenimento dei coefficienti di sicurezza nel tempo e quindi di scongiurare un incremento della vulnerabilità sismica.

## CONCLUSIONI

Il problema dell'affidabilità strutturale degli edifici, dei ponti e delle opere di sostegno, in presenza di azioni sismiche, è stato negli ultimi anni, a seguito degli eventi che si sono succeduti sul Territorio Nazionale, estremamente sentito. Ricorrente è la domanda su cosa il mondo scientifico ed imprenditoriale possa mettere in campo per ridurre i danni alle strutture e per evitare a seguito di crolli, la perdita di vite umane. La pericolosità degli eventi, la probabilità che essi interessino una certa area e la portata dei danni che possono su quell'area essere provocati, sono solitamente misurati con un indicatore definito rischio sismico. Il rischio sismico ha una stretta correlazione con la vulnerabilità sismica delle strutture, che a sua volta dipende dal tipo di materiale impiegato, dal tipo di progettazione eseguita e dal livello di conservazione delle opere al passare del tempo.

Sotto il profilo ingegneristico, un sicuro contributo positivo potrà essere fornito incidendo sulla vulnerabilità, ossia garantendo che le nuove opere siano realizzate con materiali prestazionali e prive di vizi o difetti costruttivi. Inoltre, 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 una riduzione della vulnerabilità strutturale. 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.

## 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] Abdelfateh Kerrouche, W.J.O. Boyle, Tong Sun, K.T.V. Grattan, J.W. Schmidt, B. Taljsten – “*Enhanced FBG sensor-based system performance assessment for monitoring strain along a prestressed CFRP rod in structural monitoring*”. *Sensors and Actuators A* 151 (2009) 137-132.
- [6] T.L. Yeo, Y. Yuan, L.F. Boswell, T. Sun, K.T.V. Grattan – “*Optical fibre sensors for the measurement of concrete sample properties following exposure to freeze/thaw test*”. *Sensors and Actuators A* 153 (2009) 166-170.

- [7] G. Porco, D. Romano, F. Morrone – “*Structural health monitoring with fibre optic sensors: a studying case*”. APCNDT 2009- The 13th Asia-Pacific Conference on Destructive Testing, 8-13 Novembre 2009 Yokoama – Japan.
- [8] 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.
- [9] Rodrigues C., Fèlix C., Lage A., Figueiras J. – “*Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges*”. Eng. Struct 2010;32:1993-2002.
- [10] Paulo Antunes, Humberto Varum, Paulo André – “*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.
- [11] Dongsheng Li, Zhi Zhou, Jinping Ou – “*Development and sensing properties study of FRP-FBG smart stay cable for bridge health monitoring applications*”. Measurement 44 (2011) 722-729.
- [12] 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).
- [13] J.M. Henault, M. Quiertant, S. Delepine-Lesoille, J. Salin, G. Moreau, F. Taillade, K. Benzarti – “*Quantitative strain measurement and crack detection in RC structures using a truly distributed fiber optic sensing system*”. Construction and Building Materials 37 (2012) 916-923.
- [14] G. Porco, D. Romano, G. F. Valer Montero – “*Le tecniche NDT per il controllo dei materiali e delle strutture in ingegneria civile*” . Estratto da: Il Ruolo dei Controlli NDT per le verifiche di affidabilità e per le attività di manutenzione. Raccolta delle memorie presentate in occasione del convegno AIPnD - MADEexpo 2012 – Milano, volume primo.