

Scientific Report

Protezione Sismica delle Strutture in calcestruzzo armato e murature: controlli e verifiche

Authors: G. Porco, F. Forestieri, D. Romano

Scientific Publications by Sismlab s.r.l. Spin-Off University of Calabria Rende (CS), Italy N.07 - I- 2021 ISBN: 979-12-80280-06-0

EDIZIONI SISMLAB Available online at www.sismlab.com

EDIZIONI SISMLAB

Scientific Publications by Sismlab s.r.l. Spin-Off University of Calabria Rende (CS), Italy

N.07 - January 2021 ISBN: 979-12-80280-06-0

(Year II)

Available online at <u>www.sismlab.com</u> info@sismlab.it - sismlab@pec.it Via Ponte Pietro Bucci - Università della Calabria - Rende (CS) P.Iva: 02730000789 - Tel./Fax.:+390984-447093

LA PROTEZIONE SISMICA DELLE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO E MURATURE: CONTROLLI E VERIFICHE - DISPOSITIVI SPERIMENTALI -

G. Porco* - F. Forestieri**- D. Romano**

*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria giacinto.porco@unical.it

**Sismlab s.r.l.- Spin – Off Università della Calabria. info@sismlab.it

SOMMARIO

Il nuovo impianto normativo NTC2018 ha evidenziato la necessità, da parte degli operatori del settore, di disporre di supporti sperimentali per effettuare la verifica del mantenimento dei coefficienti di sicurezza sia per le strutture in calcestruzzo armato che per quelle in muratura. A fianco alle tecniche sperimentali per il controllo dei materiali, sono disponibili ormai da alcuni anni diverse architetture di controllo statico e dinamico le quali però non hanno avuto una massiccia diffusione. È in questo contesto che si colloca il presente articolo, con il quale si intende offrire un contributo alla individuazione di alcune delle cause che oggi rallentano la diffusione delle metodologie di monitoraggio, proponendo strategie risolutive basate sull'impiego di misuratori di deformazione di nuova generazione, che possano risolvere alcune criticità rilevate con i sistemi tradizionali.

Il presente lavoro è stato sviluppato nell'ambito di un progetto POR CALABRIA Fesr-Fse 2014/2020 Obiettivo1.2, Az.1.2.2 di Ricerca Scientifica e Innovazione Tecnologica, denominato *"Dispositivi a fibra ottica residenti per la protezione sismica delle strutture in c.a."*, finanziato dalla Regione Calabria e attuato dalla SISMLAB Spin-off dell'Università della Calabria e dalla SO.P.I. s.r.l.

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, alle ormai consolidate procedure sperimentali per il controllo dei materiali e delle strutture, introdotte con la verifica di sicurezza, per come da cap. 8 delle NTC08 e, successivamente, confermata nelle NTC18, è andata ulteriormente sviluppandosi una tecnica di screening in campo statico che prevede l'osservazione in continuo delle deformazioni. Tale attività, consiste nell'utilizzo di architetture di controllo basate su sensori di rilevamento applicati su opportune basi, che permettono una valutazione complessiva del comportamento dell'opera, in termini di determinazione dei regimi di tensione partendo dalle deformazioni. Questi sistemi, prevedono l'impianto di rilevatori di deformazione sulle barre di armatura in precisi punti individuati come critici e permettono pertanto, di seguire l'evoluzione dei processi di crescita delle sollecitazioni per tutte le fasi realizzative ed in particolare all'entrata in servizio e in esercizio.

Tuttavia ad oggi, il verificarsi dei numerosi e crescenti casi di strutture "*fuori di servizio*", dimostra come ci sia ancora una scarsa penetrazione e quindi un basso impiego nel contesto dell'ingegneria civile di architetture di monitoraggio residenti, che sicuramente rappresentano un formidabile strumento per assicurare l'esercizio in sicurezza di edifici, ponti o opere di sostegno.

Gli elementi di criticità che, ricorrentemente, sono segnalati dagli operatori del settore come causa della mancata diffusione dei sistemi di monitoraggio, sono ascrivibili presumibilmente al costo elevato del singolo sensore e all'alta specializzazione richiesta ai tecnici che propongono e impiegano queste architetture.

Per contestualizzare gli aspetti di criticità citati, nelle sezioni seguenti saranno analizzati due casi di monitoraggio, condotti dagli scriventi su una struttura in muratura e su una struttura in c.a. Verranno illustrate a tal proposito sia le fasi sperimentali che di interpretazione e di emissione del responso tecnico. In tale contesto saranno ripercorse le fasi attuative in modo da mettere in luce le difficoltà insite nelle procedure assunte, la multidisciplinarietà delle competenze richieste e la complessità delle metodologie adottate per l'interpretazione del dato sperimentale.

Con riferimento invece, alla possibilità di impiegare sensori di nuova generazione verranno, di seguito, sempre attraverso la disamina dei casi reali e una prima analisi delle criticità, introdotti i requisiti essenziali che un sensore dovrà assumere, per permetterne l'impiego su strutture di nuova realizzazione o esistenti e rendere possibile anche in questo caso la mitigazione delle difficoltà operative legate all'installazione.

Pertanto, con il presente lavoro si vuole, nell'ambito delle problematiche sollevate, circoscrivere le criticità, che a parere degli scriventi hanno limitato la diffusione di tali architetture, e contestualmente proporre per alcune di esse delle strategie per la mitigazione degli effetti correlati. In particolare, l'argomento centrale del lavoro interessa l'analisi di alcuni sensori innovativi e a basso costo, che a seguito di una campagna sperimentale di validazione potrebbero essere impiegati per il monitoraggio di strutture in c.a. e in muratura. Tale assunto parte dalla considerazione che, questi nuovi rilevatori possono essere installati direttamente presso i centri di trasformazione degli acciai, o presso i centri di produzione delle barre in composito, prima della loro messa a dimora in cantiere, producendo di fatto, una attenuazione delle difficoltà legate alla messa in opera dei sistemi oggi disponibili.

2. IL MONITORAGGIO STATICO SUGLI EDIFICI IN MURATURA ED IN C.A.

Per come suesposto, il presente studio ripercorrerà prioritariamente le fasi di ideazione, di progettazione, di messa in opera e di gestione dei sistemi di monitoraggio in due contesti costruttivi diversi ossia, per un edificio in muratura e uno calcestruzzo armato. In particolare, saranno riportati due esempi di monitoraggio strutturale, un primo di tipo misto, statico e dinamico, su un edificio esistente in muratura, e un secondo di tipo statico su un edificio in calcestruzzo armato di nuova realizzazione. Questi casi studio consentiranno di mettere in luce le difficoltà, che i tecnici sono chiamati ad affrontare, e di circoscrivere una serie di criticità da reputare come le principali cause della mancata diffusione dei sistemi di monitoraggio residenti. Assunte pertanto, tali criticità come riferimento, verranno proposte delle strategie atte a mitigarne gli effetti.

Si inizia nella sezione che segue con il primo caso studio riguardante la progettazione, installazione e gestione di un sistema di monitoraggio su un edificio esistente in muratura.

2.1 Il Monitoraggio su un Edificio in muratura

L'edificio storico in muratura, denominato Palazzo Mannetti è ubicato nel centro storico italiano della città dell'Aquila ed è stato oggetto di interventi di ricostruzione ed adeguamento

sismico a seguito del terremoto dell'Aprile 2009. Il palazzo presenta notevoli peculiarità di interesse storico e risulta pertanto vincolato dalla Soprintendenza.

Su questo edificio è stata prevista l'installazione di un sistema misto statico e dinamico con accelerometri residenti. A tale scopo sono state avviate attività preliminari per l'individuazione di una modellazione che meglio potesse rappresentare il reale comportamento strutturale. Successivamente, attraverso simulazioni di storie di carico, sono state localizzate le aree critiche, su cui installare i rilevatori di accelerazione e di deformazione, ed individuati opportuni parametri di soglia per gestire le fasi routinarie del controllo in esercizio.

A seguire, sono stati ideati e progettati i sistemi di monitoraggio dinamico e statico. Il primo, con la prerogativa di acquisire in continuo, controllando i livelli di accelerazione ai piani di calpestio, ha previsto l'uso complessivo di 12 sensori accelerometrici capacitivi, bidimensionali, dotati di sensibilità nominale, larghezza di banda e range dinamico che ben si prestano a misure di alta qualità. Il fissaggio dei rilevatori è stato previsto con idonee piastre metalliche, Fig.1, che oltre a fornire ai sensori una superficie liscia sulla quale poggiarsi, li vincolano perfettamente al riferimento fisso. In Fig.2 si riporta uno stralcio dei disegni contenuti nel progetto di monitoraggio dinamico per meglio comprendere l'ubicazione dei sensori accelerometrici.



Fig. 1. Piastra di base e Accelerometro SARA SA-10.



Fig. 2. Sensori accelerometrici ubicati e percorso dei cavi al piano terra.

Il secondo sistema statico, che nel presente lavoro, costituisce oggetto principale di studio, ha previsto l'uso di 22 sensori, distribuiti ai vari livelli in elevazione e collocati sulle barre utilizzate

per la cucitura nelle zone di intensificazione degli sforzi. Nelle immagini seguenti sono restituiti degli stralci del progetto dove sono riportate alcune delle ubicazioni dei sensori installati.



Fig. 3. Pianta piano terra e piano primo: dislocazione dei sensori sui cantonali.



Fig. 4. Pianta piano secondo: dislocazione dei sensori sui cantonali.



Fig. 5. Prospetti posizione dei sensori sulle zone di bordo.



Fig. 6. Fase di installazione dei sensori sulle barre di cucitura.

Con il riferimento progettuale, la fase successiva ha riguardato la messa in opera dei rilevatori. La preparazione ed installazione dei rilevatori sulle barre di cucitura, secondo un protocollo consolidato di verifica di funzionalità, è stata condotta in cantiere con personale specializzato.

A seguito della solidarizzazione dei sensori all'interno delle membrature resistenti è stato avviato un programma sperimentale secondo una cronologia di acquisizione legata alle fasi costruttive ed alla entrata in esercizio della struttura. Il sistema di controllo residente ha consentito di seguire l'evoluzione delle fasi di rimessa in pristino della struttura e successivamente di effettuare anche controlli di verifica di integrità a seguito dell'evento sismico che ha interessato l'area nel comprensorio di Amatrice.



Fig. 7. – Fase di acquisizione dati.

Le attività condotte in più fasi e riportate per brevità in forma sintetica, hanno previsto diversi elementi di criticità. Primo fra tutti la difficoltà notevole nell'identificazione dei modellatori da assumere per l'analisi. Questa scelta, riferita al contesto della progettazione strutturale, determina esclusivamente l'assunzione di una maggiore approssimazione all'analisi, compensata e neutralizzata di fatto dai coefficienti di sicurezza, mentre, nel contesto sperimentale, potrebbe invece generare falsi messaggi di allarme o di allerta per un non corretto allineamento dei dati sperimentali a quelli teorici predittivi. Inoltre, è chiaro ed evidente che, tutte le fasi di campo siano obbligatoriamente da svolgere con personale specializzato. Infine, vanno considerate le difficoltà proprie della fase di trattamento del dato sperimentale. L'identificazione delle deformazioni, provenienti dai dati acquisiti nei punti critici, deve infatti, necessariamente, prevedere un filtraggio del dato sperimentale per renderlo avulso dalle perturbazioni esterne, quali la temperatura, o di quelle interne, ossia legate al materiale, quali il ritiro dello stesso.

2.2 Il Monitoraggio su un Edificio in c.a.

Un secondo caso di monitoraggio statico ha interessato la tipologia costruttiva di un edificio in calcestruzzo armato di nuova realizzazione, edificato nel comune di Guidonia Montecelio (Roma). Analogamente al caso precedente, la prima attività ha riguardato la scelta di un modellatore con il quale analizzare il comportamento della struttura. Sono state quindi individuate le membrature su cui ubicare i rilevatori di deformazione, Fig.8, e sono stati valutati e fissati i parametri di soglia per gestire le attività di verifica.



Fig. 8. – Individuazione delle membrature strumentate (travi di fondazione e travi primo impalcato).

Le membrature monitorate sono risultate complessivamente nove, di cui 3 travi di fondazione, 3 pilastri e 3 travi del primo impalcato. Il sistema statico ha utilizzato complessivamente 24 sensori. Nelle Fig. 9 e 10 sono riportate alcune posizioni dei sensori istallati sui telai resistenti.



Fig. 9. Ubicazione sensori nelle membrature oggetto di monitoraggio Sezione Q-Q.



Fig. 10. Ubicazione sensori nelle membrature oggetto di monitoraggio Sezione P-P.



Fig. 11. Messa a dimora sensori sulla trave di fondazione, pilastro e trave in elevazione.

La presenza del sistema di monitoraggio ha consentito di seguire l'evoluzione dei regimi di tensione sulle membrature sollecitate per tutte le fasi costruttive fino ai livelli più alti di carico raggiunti con l'entrata in servizio. I valori sperimentali opportunamente trattati, sono stati comparati per ogni step con i valori teorici estratti dalle modellazioni agli elementi finiti. A titolo di esempio si riporta di seguito una tabella e un grafico contenente l'andamento delle deformazioni nel corso delle fasi costruttive.

SENSORE 12 - SN = 7385 (\(\Delta Lfabb.= 12,786)\) Pilastro 2						
Data acquisizione	DL misurato (mm)	Deformazione	Note			
12/10/2010	13,316	0,000000	cls pilastri maturato, carpenteria 1º livello realizzata (cls assente)			
05/11/2010	13,302	-0,000047	Solai 1º livello e pilastri 2º ordine realizzati (solai lato strada puntellati)			
07/01/2011	13,286	-0,000100	Struttura in c.a. realizzata, tamponature piano terra eseguite			
03/03/2011	13,278	-0,000127	Struttura in c.a. realizzata, tamponature piano primo quasi totalmente eseguite			
09/06/2011	13,277	-0,000130	Struttura in c.a. realizzata, tamponature piano terra e primo ultimate, pareti divisorie piano terra ultimate, pareti divisorie piano primo in corso di ultimazione			
03/10/2011	13,251	-0,000217	Opere edilizie completate. Struttura non in servizio			

Tab.1. Valori delle deformazioni nel corso delle fasi costruttive.



Fig.12. Andamento delle deformazioni nel corso delle fasi costruttive.

Questa attività, apparentemente semplice da svolgere, ha nascosto invece, una serie di difficoltà interpretative legate al trattamento del dato sperimentale. Infatti, a differenza del caso precedente di edificio in muratura, l'effetto del ritiro del calcestruzzo nelle prime fasi di maturazione ha fortemente perturbato il dato sperimentale acquisito. Inoltre, le misure in situ eseguite sulle membrature portanti hanno subito anch'esse un apprezzabile influenza dalla presenza delle strutture di puntellatura impiegate per la realizzazione degli impalcati. Quindi, solo una volta individuati i valori da depurare, associati alle due cause, è stato possibile restituire i dati sperimentali di deformazione propri dei carichi presenti, ed effettuare le conseguenti valutazioni tecniche.



Fig.13. Andamento delle perturbazioni nel corso delle fasi costruttive.

L'intero processo descritto, nonostante sia stato applicato ad una struttura estremamente regolare ha richiesto, come nel caso precedente l'impiego di tecnici altamente specializzati con conoscenze dei sistemi di monitoraggio e di trattamento numerico del dato sperimentale. Altro aspetto emerso è stato quello di avere, per una così semplice struttura in c.a. con costi realizzativi non elevati, una forte comparazione tra il costo del singolo sensore con quello effettivo, espresso in termini di incidenza a metro quadrato di superficie costruita.

Appare evidente dall'analisi dei due casi studio che, le cause responsabili della mancata diffusione dei sistemi residenti siano sostanzialmente di doppia natura. La prima di tipo economico legata, sia al costo del rilevatore che al costo dell'impiego di manodopera specializzata, chiamata a intervenire a più riprese in funzione delle fasi realizzative dell'opera. La seconda invece, di natura prettamente ingegneristica richiedente, per il trattamento del dato sperimentale, conoscenze che spaziano dall'analisi strutturale, all'analisi geotecnica e al comportamento dei materiali.

A questo punto, focalizzate le problematiche del contesto, nelle sezioni seguenti verranno analizzate alcune proposte operative atte a mitigare gli effetti negativi emersi, partendo dalla verifica sulle possibilità di impiego di nuovi sensori.

3. UNA NUOVA ARCHITETTURA PER LA MISURA DELLE DEFORMAZIONI

3.1 Il Sensore delle deformazioni

I problemi evidenziati precedentemente hanno dato l'input per l'individuazione di nuovi rilevatori di deformazione associati naturalmente ad un nuovo acquisitore appositamente realizzato. Esistono diverse tipologie di sensori a fibra ottica a seconda del principio fisico che sfruttano per trasdurre la grandezza da misurare in segnale ottico decodificabile. Gli scriventi pertanto, attraverso una robusta ricerca bibliografica scientifica e commerciale hanno selezionato un serie di rilevatori non specializzati per l'impiego nel campo civile, ma con la prerogativa di poter essere applicati sulle barre da armatura nei centri di trasformazione e con l'ipotesi di industrializzare successivamente il processo in modo da consentire l'arrivo in cantiere di barre già strumentate.

Il sensore individuato e proposto per la sperimentazione, Fig. 14, possiede le seguenti caratteristiche tecniche:

- La fibra è caratterizzata dal materiale acrilato SMF-28;
- Una copertura in poliammide;
- Lunghezza FBG di 15mm.
- Un costo inferiore di dieci volte rispetto ai sensori impiegati nel campo civile.



Fig. 14. Sensore a fibra ottica selezionato.

Il sensore scelto, sostanzialmente un FBG (*Fiber Bragg Grating*), ha previsto l'impiego di un nuovo interrogatore ottico, il quale è stato messo a punto grazie alla collaborazione con le Aziende Boviar S.r.l. e CELM Snc di Cremona. L'interrogatore durante l'acquisizione dei dati, misura la lunghezza d'onda associata alla luce riflessa dai sensori ottici e quindi la converte in unità ingegneristiche. Le letture vengono quindi trasmesse via Ethernet o FireWire per l'archiviazione, l'analisi o l'esportazione tramite un'interfaccia software. La centralina utilizzata nella sperimentazione è l'interrogatore ottico CELM-S300 raffigurato nella figura seguente.



Fig. 15. Interrogatore ottico CELM-S300.

4. VERIFICHE SPERIMENTALI

La scelta del misuratore di deformazione, la progettazione e la successiva prototipazione dell'interrogatore ottico ha permesso di attivare una procedura che porta alla messa a dimora dei sensori scelti sulle barre d'armatura.

Le dieci fasi da eseguire per installare il sensore innovativo sul supporto dedicato sono le seguenti:

Fase 1: abrasione meccanica della porzione di barra che ospiterà il sensore;

Fase 2: sgrassaggio di una porzione del provino con agente sgrassante (acetone-spray);

Fase 3: carteggio della superficie con carta abrasiva con grana 220/320;

Fase 4: ripetere l'operazione di pulizia con agente sgrassante (acetone-spray);

Fase 5: tracciatura delle linee di riferimento con matita con durezza 4h;

Fase 6: posizionamento del sensore innovativo nella mezzeria del provino e applicazione del nastro kapton;

Fase 7: mascheratura con nastro kapton della zona su cui andrà applicata la colla;

Fase 8: applicazione della colla araldite;

Fase 9: pressione nella zona interessata dalla colla con foglio di teflon;

Fase 10: rimozione dei pezzetti di nastro kapton da 4-1, dopo un'attesa di almeno 14h.

Di seguito si riporta la documentazione fotografica di alcune di queste fasi applicative.



Fig. 16. Abrasione meccanica. e sgrassaggio di una porzione del provino con agente sgrassante.



Fig. 17. Posizionamento del sensore innovativo nella mezzeria del provino e applicazione e mascheratura con il nastro kapton della zona su cui andrà applicata la colla.



Fig. 18. Applicazione della colla araldite e pressione nella zona interessata dalla colla con foglio di teflon.

Dopo aver definito e testato la procedura di installazione, è stata programmata e avviata una campagna sperimentale costituita da tre fasi principali, attraverso la quale è stata verificata la possibilità di impiego del nuovo sensore per la misura della deformazione.

I tre livelli di verifica sperimentale assunti per validare l'utilizzo del sensore sono:

- 1 Verifica della qualità di acquisizione della deformazione su un prototipo in acciaio monodimensionale;
- 2 Verifica della qualità di acquisizione della deformazione su un prototipo in cls con regime di sollecitazione elementare da sforzo normale;
- 3 Verifica della qualità di acquisizione della deformazione su un prototipo in cls con regime di sollecitazione composta, taglio e flessione.

Secondo tale ordine, di seguito, si illustrano le attività sperimentali svolte.

4.1 Verifica sul prototipo monodimensionale

La prima sperimentazione è stata finalizzata a verificare la bontà del campo di spostamento acquisito dal rilevatore proposto. A tal proposito è stata considerata come base di misura una barra in acciaio ad aderenza migliorata, soggetta a regime di sforzo normale di trazione. Il test di trazione è stato condotto su una barra in acciaio ϕ 12 e su una barra ϕ 16.



Fig. 19. Barra strumentata.

Lo sforzo nelle barre è stato indotto con una macchina universale e la misura di deformazione, da comparare con quella rilevata dal nuovo rilevatore a fibra ottica, è stata acquisita mediante un estensimetro meccanico applicato esternamente ai provini.



Fig. 20. Installazione Estensimetro meccanico sul prototipo e posizionamento barra strumentata sulla Macchina Universale.

Per tutti i provini strumentati e testati è stato assunto un predefinito programma di carico step by step e un programma di scarico anch'esso con valori di stazionamento del carico predefiniti. Di seguito, si riportano in tabella i valori della deformazione acquisiti dall'estensimetro meccanico, dal nuovo dispositivo di misura, opportunamente comparati con i valori teorici attesi.

STEP DI CARICO CAMPIONE Φ12						
CARICO [kg]	VALORI ANALITICI	ESTENSIMETRO MECCANICO	SENSORE PROPOSTO			
500	0.000211	0.000218	0.000214			
1500	0.000632	0.000639	0.000835			
2500	0.001054	0.001059	0.001058			
STEP DI CARICO CAMPIONE Φ16						
CARICO [kg]	VALORI ANALITICI	ESTENSIMETRO MECCANICO	SENSORE PROPOSTO			
500	0.000118	0.000121	0.000115			
1500	0.000355	0.000358	0.000351			
2500	0.000592	0.000589	0.000595			
3500	0.000829	0.000831	0.000833			
4500	0.001066	0.001069	0.0010625			

Tabella 2. Valori di deformazione in funzione del carico.

La dispersione dei risultati evidenziata dal confronto tra i valori di deformazione teorici e quelli acquisiti con il nuovo dispositivo FBG applicato sulle barre $\emptyset 12$ e $\emptyset 16$ è estremamente contenuta. Pertanto il rilevatore, vista la risposta positiva espressa anche con i test similari espletati sui provini a diverso diametro, è stato avviato ai controlli di secondo livello.

4.2 Verifica sul prototipo compresso

Una seconda fase di sperimentazione ha riguardato la verifica di risposta del rilevatore proposto su provini in calcestruzzo armato. In pratica, per valutare attentamente la variazione dei diversi parametri da cui dipende la misura di deformazione, si è optato di scegliere un prototipo in c.a. con sezione quasi reale, di monitorarlo con i sensori proposti e di utilizzare anche sensori di pelle applicati sulle superfici laterali. L'altra scelta, operata dagli scriventi, è stata quella di assoggettare il prototipo ad un regime di sollecitazione semplice qual è lo sforzo normale, in modo da poter utilizzare come forma di controllo anche l'approccio teorico nel rispetto del postulato del De Saint Venant.

La campagna sperimentale, ha interessato più prototipi con diversa geometria di armatura, di cui:

 Un primo prototipo, con sezione di dimensioni 30X30 cm e altezza 100 cm, armato con 7 staffe φ10 e 4 barre φ12;



Fig. 21. Progetto prototipo N°1 in scala diversificata.

- Un secondo prototipo, con sezione di dimensioni 30X30 cm e altezza 100 cm, armato con 7 staffe ϕ 10 e 4 barre ϕ 16.



Fig. 22. Progetto prototipo N°2 in scala diversificata.

Sulla barra angolare di entrambi i prototipi è stato messo a dimora il misuratore della deformazione innovativo come riportato in Fig.23. Sulle superfici laterali in posizione mediana sono stati applicati n°4 sensori OBSG-120, per come riportato nella Fig.24.



Fig. 23. Prototipo in c.a.



Fig. 24. Installazione sensori OBSG-120.

Con l'ausilio di un dispositivo di carico, costituito da una cella di carico e da un martinetto idraulico, sui prototipi è stato generato un programma di carico e di scarico in modo da acquisire i valori rappresentativi della deformazione.



Fig. 25. Prototipo sottoposto a prova di compressione.

Di seguito si riportano i valori delle deformazioni acquisiti sul sensore proposto opportunamente comparate con i valori teorici attesi.

STEP DI CARICO CAMPIONE Φ12						
CARICO [kg]	VALORI TEORICI	SENSORE FBG				
5000	0.0000172	0.0000169				
15000	0.0000516	0.0000513				
25000	0.0000860	0.0000858				
35000	0.000120	0.000117				
45000	0.000154	0.000152				
STEP DI CARICO CAMPIONE Φ16						
CARICO [kg]	VALORI TEORICI	SENSORE FBG				
5000	0.0000167	0.0000165				
15000	0.0000502	0.0000499				
25000	0.0000837	0.0000834				
35000	0.000117	0.000115				
45000	0.000150	0.000148				

Tabella 3. Valori di deformazione ricavati dai sensori in funzione del carico.

Anche in questo caso la dispersione dei risultati evidenziata dal confronto tra i valori di deformazione teorici e quelli acquisiti con i nuovi dispositivi e con i rilevatori di pelle è abbastanza confortante ed estremamente contenuta.



Fig. 26. Confronto tra i valori Carico- Deformazione ottenuti dal nuovo dispositivo FBG e i valori teorici.

Pertanto, anche in questo caso il rilevatore proposto, vista la risposta positiva espressa con i test similari effettuati sugli altri provini in cls, è stato avviato ai controlli finali di terzo livello con regimi di sollecitazione composta.

4.3 Verifica sul prototipo soggetto a flessione e taglio

La terza e ultima attività sperimentale condotta ha riguardato la verifica di affidabilità del rilevatore proposto in presenza di regimi di sollecitazione composta e in un ambiente simile per geometria a quello di una sezione resistente di un edificio in c.a.

Per perseguire tali obiettivi sono stati riprodotti alcuni prototipi in calcestruzzo armato, in scala reale con geometrie proprie dei continui monodimensionali. Al fine di non confinare il responso finale di impego del nuovo rilevatore, alla sola comparazione con i dati teorici, gli scriventi hanno ritenuto opportuno strumentare la trave anche con misuratori di deformazione dedicati per il calcestruzzo. Pertanto sulle stesse barre, dove sono stati applicati i nuovi sensori, sono stati installati rilevatori SOFO comunemente impiegati in ambito civile.

I diversi prototipi progettati e successivamente realizzati hanno le seguenti caratteristiche geometriche comuni: base di 30 cm, altezza 40cm e lunghezza 480 cm. Tutti gli elementi sono stati armati con barre longitudinali e staffe ϕ 10, in particolare per il prototipo N°3 l'armatura longitudinale superiore è costituita da 2 barre ϕ 12 e quella inferiore da 3 barre ϕ 12; per il prototipo N°4 si hanno invece 2 barre ϕ 16 superiormente e 3 barre ϕ 16 inferiormente. Sulla barra mediana inferiore di entrambi i prototipi sono stati installati i due sensori per la misura della deformazione, come si evince dalle Fig. 27 e 28.





Fig. 27. Progetto dei prototipi N°3 e N°4 in scala reale.



Fig. 28. Messa a dimora dei sensori.



Fig. 29. Prototipo in scala reale in c.a.

Il test predisposto con l'ausilio di un opportuno telaio di contrasto, Fig. 30, ha riproposto una prova a quattro punti. La scelta dello schema a quattro punti ha ovviamente consentito di annullare gli effetti delle deformazioni a taglio nelle zone di misura delle deformazioni.



Fig. 30. Telaio di contrasto.

Nell'esecuzione della prova sono stati impiegati per la produzione delle forze un martinetto idraulico e una cella di carico; mentre per l'acquisizione delle grandezze rappresentative sono stati utilizzati:

- Una centralina per i sensori proposti;
- I sensori di nuova concezione;
- Una centralina per i sensori SOFO
- I sensori SOFO con base da 25 cm;
- Comparatori Centesimali

Nella Fig.31 è restituito lo schema del sistema di carico con il prototipo inserito e pronto per l'esecuzione del test.



Fig.31. Configurazione schematica della prova a flessione e taglio.

L'attività sperimentale è stata svolta secondo un preciso programma di carico e di scarico basato sui seguenti dati:

- Carico massimo di prova: 5600Kg;
- Valore di precarico: 350 Kg;

e seguendo il programma preordinato che è consistito in:

- 1. Predisposizione del sistema;
- 2. Applicazione del precarico;
- 3. Verifica delle simmetrie e della presenza di regimi di sollecitazioni e di spostamento nel piano;
- 4. Verifica strumentale;
- 5. Avvio del test mediante l'esecuzione di cicli di carico e scarico utilizzando i seguenti step:350 Kg.; 1400 Kg; 2800 Kg; 4200 Kg; 5600 Kg.
- 6. Acquisizione per ogni step di carico e di scarico dei valori di deformazione e di spostamento.

Le fasi di acquisizione delle grandezze sono state gestite sotto carico costante e con i valori di spostamento e di deformazione in condizione di stabilizzazione.



Fig. 32. Test a quattro punti su prototipo in scala reale.

Di seguito nella Tabella 4 sono restituiti i valori delle deformazioni relativi al regime di sollecitazione flettente prodotta, con riferimento al carico applicato che l'ha indotta. Dall'analisi dei dati di deformazione, utilmente comparati anche con il dato teorico atteso, è evidente la loro buona convergenza.

STEP DI CARICO CAMPIONE N°3						
CARICO [kg]	VALORI ANALITICI	SENSORE FBG	SENSORE SOFO			
350	0.000104	0.0000101	0.0000102			
1400	0.000417	0.000402	0.000409			
2.800	0.000835	0.000810	0.000823			
4.200	0.00125	0.000112	0.000118			
5.600	0.00167	0.000163	0.000161			
STEP DI CARICO CAMPIONE N°4						
CARICO [kg]	VALORI ANALITICI	SENSORE FBG	SENSORE SOFO			
350	0.0000594	0.0000576	0.0000592			
1400	0.000238	0.000235	0.000236			
2.800	0.000476	0.000462	0.000463			
4.200	0.000714	0.000705	0.000704			
5.600	0.000953	0.000924	0.000933			

Tabella 4. Valori di deformazione ricavati dai sensori in funzione del carico.

In particolare, è utile anche sottolineare che, i due rilevatori, applicati sulla stessa barra e messi a dimora nello stesso cls, acquisiscono valori di deformazione molto simili, evidenziando pertanto la stessa risposta una volta immersi nel cls. Per completezza è restituita nella Fig.33, la corrispondenza tra carico e deformazioni acquisite sui due rilevatori di deformazione.



Fig.33. Confronto tra i valori Carico-Deformazione ottenuti dal nuovo dispositivo FBG e dal sensore SOFO.

Appare evidente grazie ai risultati ottenuti che i sensori innovativi ben si prestano all'applicazione per la misura di deformazione nelle strutture in c.a. Pertanto, la messa a dimora di questi rilevatori può garantire il controllo dei regimi di deformazione di barre collocate in sezioni sensibili. Inoltre, questi rilevatori garantiscono, con le modalità attuate dagli scriventi, una messa in opera standardizzabile, inseribile in un processo industriale con un costo molto contenuto rispetto ai misuratori di deformazione oggi disponibili sul mercato. Per quanto attiene invece, alle difficoltà insite nelle procedure di interpretazione e di trattamento del dato sperimentale, che anch'esse limitano la penetrazione dei sistemi di monitoraggio nel contesto realizzativo, tali criticità possono essere aggredite e superate muovendosi verso i sistemi autodiagnosticanti intelligenti. Infatti, per quanto i processi di trattamento e di filtraggio del dato sperimentale siano estremamente complessi sono connotati di una alta ripetibilità. Per cui attraverso l'implementazione di software dedicati si potrà dare supporto ai tecnici sia nelle fasi decisionali che di gestione delle modalità di allarme e allerta.

5. CONCLUSIONI

In conclusione è possibile affermare che, tra gli elementi di criticità che hanno limitato negli anni l'impiego dei sistemi di monitoraggio statico assumono un ruolo preminente il costo del singolo sensore e il costo relativo all'impiego di manodopera specializzata. Altro aspetto di criticità, esposto nel presente lavoro, è quello di natura prettamente ingegneristica, ossia la richiesta di conoscenze dedicate per il trattamento del dato sperimentale. La mitigazione di tali elementi ostativi può essere demandata, per ciò che attiene ai rilevatori, all'impiego di sensori alternativi con possibilità di implementazione in filiere industriali, che prevedano l'applicazione del sensore direttamente nei centri di trasformazione degli acciai. Per quanto attiene invece, alle difficoltà relative alle procedure di interpretazione e di trattamento del dato sperimentale, una possibile soluzione è da ricercare nell'impiego di sistemi autodiagnosticanti intelligenti. Infatti, sfruttando l'alta ripetibilità degli approcci complessi sarà possibile implementare software dedicati per governare le fasi decisionali e per gestire tali sistemi anche alla presenza di tecnici con formazione non specialistica.

Le attività sperimentali presentate all'interno del lavoro sono state svolte con il supporto del Progetto Por Calabria Fesr-Fse 2014/2020 "*Dispositivi a fibra ottica residenti per la protezione sismica delle strutture in c.a.*" Asse I - Promozione della Ricerca e della Innovazione.

BIBLIOGRAFIA

- [1] D. Inaudi, Casanova N., Glisic B., Kronenberg P., Lloret S., Pflug L., Vurpillot S., 1998, *"SOFO: Structural Monitoring with Optical Fiber Deformations Sensors"* FIB, "Monitoring and Safety Evaluation of Existing Concrete Structures", 12-13.2., Vienna, Austria.
- [2] H. Li, D. Li, G. Song, 2004, "*Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering*". Engineering Structures 26, 1647-1657.
- [3] F. Morrone G. Porco D. Romano, 2009, "*Structural health monitoring with fiber optic sensors: a studying case*", APCNDT 2009 The 13th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing November 8-13, 2009 Yokohama, Japan.
- [4] Fu-Zhen Xuan, Hongwei Tang, Shan- Tung Tu, 2009 "In situ monitoring on prestress 12 losses in the reinforced structure with fiber-optic sensors". Measurement 42,107-111.
- [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.
- [6] Z. Djinovic, M. Tomic, C. Gamauf, 2010 "Fiber-optic Interferometric Sensor of Magnetic Field for Structural Health Monitoring". Proc. Eurosensors XXIV, September 5-8, Linz, Austria. Procedia Engineering 5, 1103-1106.
- [7] P. Antunes, H. Varum, P. Andcrè, 2011 "Optical FBG Sensors for Static Structural Health Monitoring". The Twelfth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction. Procedia Engineering 14, 1564-1571.
- [8] J.H. Mao, W.L. Jin, Y. He, D.J. Cleland and Y. Bai, 2011 "A novel method of embedding distributed optical fiber sensors for structural health monitoring". Smart Materials and Structures 20, 125018 (9pp).
- [9] G. Porco, D. Romano, G. F. Valer Montero, Dicembre 2012, "*Il monitoraggio strutturale per il controllo delle fasi costruttive e per la verifica di affidabilità delle strutture in c.a.*". Il Giornale delle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica, n. 4. ISSN 1721-7075.

N.07 - January 2021 ISBN: 979-12-80280-06-0

EDIZIONI SISMLAB Available online at www.sismlab.com