

Primi prototipi di un sistema integrato per il rinforzo ed il monitoraggio strutturale

Stefano De Santis¹, Giovanni Moretti¹, Vincenzo Giannetto², Michele Arturo Caponero³, Sara Fares¹, Cristina Mazzotta³, Andrea Polimadei³, Marika Volpe², Stefano Agnetti⁴, Diego Dell’Erba⁵

¹ Università degli Studi Roma Tre

² Indagini Strutturali srl

³ ENEA, Centro Ricerche Frascati

⁴ Kimia SpA

⁵ Ingegneria Integrata srl

I sistemi Composite Reinforced Mortar (CRM) rappresentano una efficace soluzione per il rinforzo delle strutture esistenti e sono particolarmente adatti alle applicazioni sulle strutture murarie e sul patrimonio architettonico. Nonostante l'importanza del monitoraggio continuo della sicurezza strutturale (Structural Health Monitoring, SHM), non sono ancora state sviluppate tecnologie affidabili per gli edifici rinforzati con CRM. In questo articolo è descritta una sperimentazione su un sistema innovativo, che integra il CRM con sensori in fibra ottica a reticolo di Bragg (Fibre Bragg Grating, FBG). Sono state eseguite prove di trazione diretta come prima fase di un più ampio programma di sviluppo del prototipo. Le deformazioni misurate dai sensori FBG sono state validate con quelle fornite dalla correlazione digitale di immagini (Digital Image Correlation, DIC), dimostrando l'affidabilità del sistema integrato CRM-FBG proposto per scopi combinati di rafforzamento e SHM. Lo studio fa parte di un dottorato di ricerca cofinanziato dalla Regione Lazio e da Indagini Strutturali srl sul tema “Tecnologie innovative per il monitoraggio dinamico e il controllo diagnostico di strutture rinforzate in zona sismica” e condotto dall’ing. Giovanni Moretti con la supervisione del Prof. Stefano De Santis dell’Università degli Studi Roma Tre. Questo lavoro vede la collaborazione di un gruppo multidisciplinare che comprende istituti di ricerca (Roma Tre ed ENEA), fabbricanti (Kimia), società di indagini (Indagini Strutturali) e di progettazione (Ingegneria Integrata).

I. INTRODUZIONE



Un approccio sostenibile per la salvaguardia del patrimonio edilizio richiede che i sistemi di rinforzo applicati per l'adeguamento strutturale garantiscano la loro efficacia a lungo termine e che questa, o il loro eventuale deterioramento, sia controllata in qualsiasi momento durante la vita utile dell'opera rinforzata. Tra le tecnologie disponibili per migliorare la sicurezza delle strutture, ed in particolare degli edifici in muratura e dell'edilizia storica, gli innovativi compositi fibrorinforzati a matrice inorganica, come il Fabric Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) [1, 2, 3] e il Composite Reinforced Mortar (CRM) [4, 5], offrono indubbiamente una notevole efficacia. Questi sistemi sono costituiti da tessuti ad alta resistenza (FRCM) o da reti preformate in FRP, realizzati in carbonio, vetro, basalto o acciaio ad altissima resistenza. I tessuti o le reti sono applicati in adesione alla superficie esterna degli elementi strutturali mediante malte di calce, cemento o geopolimeriche. Questi compositi presentano un elevato rapporto resistenza-peso e, quando si utilizzano malte a base di calce, garantiscono anche la compatibilità fisico-chimica con i substrati originali, risultando adeguati alle applicazioni al patrimonio architettonico [6]. La durabilità dei loro componenti è verificata in laboratorio dopo invecchiamento artificiale accelerato, secondo i protocolli di

qualificazione [7, 8]. Sono anche state recentemente sviluppate linee guida per la progettazione [9, 10], le quali, insieme ad un notevolissimo sviluppo industriale e commerciale, cresciuto esponenzialmente nell'ultimo decennio, hanno favorito un ampio utilizzo di questi sistemi da parte di numerosi professionisti nel campo della riabilitazione strutturale.

Tuttavia, ad ora nessuno sa davvero stabilire se la loro efficacia durante tutta la vita utile della struttura rinforzata si mantenga a livelli compatibili con la sicurezza. Distacchi, fenomeni di degrado, eventualmente associati all'interazione con il supporto, fessurazioni o concentrazioni locali di deformazione possono infatti compromettere l'efficacia del rinforzo molto prima che questi diventino visibili a occhio nudo, rimanendo dunque non rilevabili con le classiche metodologie di ispezione e rilievo. Anche se è della massima importanza che ciò possa essere verificato (sia durante l'installazione che in qualsiasi momento successivo), finora non sono state svolte ricerche approfondite per risolvere questo problema, che pone certamente sfide impegnative dal punto di vista scientifico e tecnologico. Non è un caso che le linee guida per la progettazione non includano informazioni esaustive sul monitoraggio e sul controllo. Allo stato attuale, la prassi consiste nell'impiegare metodi di prova di routine sviluppati per il calcestruzzo, o semplicemente nel non svolgere alcuna indagine.

Appare quindi necessario migliorare le nostre conoscenze per la valutazione delle condizioni dei sistemi FRCM/CRM e del comportamento complessivo della struttura rinforzata. Da un lato, occorre quindi mettere a punto metodi di prova non distruttivi (Non Destructive Test - NDT) affidabili, che possano essere impiegati su qualsiasi struttura (anche se è già stata rinforzata) per l'ispezione periodica. Dall'altro lato, vale certamente la pena di indagare nella direzione dello sviluppo di sistemi di rinforzo a più alto contenuto tecnologico per il monitoraggio continuo di nuovi sistemi di rinforzo, almeno per le opere particolarmente importanti. A questo scopo, l'uso di fibre ottiche con sensori a reticolo di Bragg (FBG) [11] appare particolarmente promettente, ma finora sono stati fatti solo pochi tentativi di combinarli con l'FRCM, mentre nulla è stato fatto sul CRM.

In questo lavoro, viene proposto una tecnologia integrata che combina rinforzi CRM e sensori FBG. Questo sistema combinato CRM-FBG ha l'ambizione, in prospettiva, di consentire una valutazione continua delle condizioni strutturali e la sua identificazione dinamica, informazioni utili per pianificare gli interventi di ripristino prima che si verifichino danni gravi o crolli. È in corso un ampio programma sperimentale per lo sviluppo prototipale di questi compositi innovativi da parte di un gruppo di ricerca che comprende l'Università Roma Tre, l'ENEA e Indagini Strutturali, responsabili dello sviluppo scientifico della tecnologia e della sua validazione in laboratorio, e Ingegneria Integrata srl, una società di ingegneria molto attiva nel campo della innovazione tecnologica a servizio della sicurezza delle opere di ingegneria civile. In questo articolo viene presentata la fase preliminare di questo lavoro, che prevede prove di trazione diretta su campioni di rete in GFRP dotati di sensori FBG. Le deformazioni rilevate dai sensori FBG sono state validate mediante il confronto con quelle fornite dalla Digital Image Correlation (DIC), dimostrando l'affidabilità del sistema integrato CRM-FBG proposto.

II. L'IMPIEGO DEI SENSORI A FIBRE OTTICHE NELL'INGEGNERIA CIVILE

I sensori FBG sono utilizzati da anni in vari settori dell'ingegneria, come quello aerospaziale, automobilistico, biomedico, meccanico e industriale [12]. Le applicazioni nell'ingegneria civile sono in crescita e molti studi hanno dimostrato la loro efficacia per il monitoraggio strutturale (SHM). I primi lavori hanno riguardato la geotecnica e sono stati dedicati alla misurazione delle accelerazioni e delle pressioni per l'esplorazione petrolifera [13], alla registrazione dei movimenti dei pendii e al controllo dei pali di fondazione [14], e al monitoraggio della stabilità strutturale delle gallerie [15]. Gli FBG sono stati utilizzati anche nell'ingegneria idraulica, per misurare le deformazioni circonferenziali nelle tubazioni in pressione [16] e per il monitoraggio delle strutture sottomarine [17].

Per quanto riguarda le applicazioni strutturali, i sensori FBG si sono dimostrati efficaci per il monitoraggio dei ponti e sono stati applicati per misurare le deformazioni nei ponti ferroviari post-tesi [18] e le vibrazioni delle traversine ferroviarie sotto carico da traffico [19]. Verstrynge e coautori [20] hanno sviluppato una tecnica integrata per il monitoraggio delle fessure nelle strutture in muratura, basata su FBG, sensori di emissione acustica e correlazione digitale delle immagini. Un rinforzo integrato con FRCM e sensori FBG è stato applicato da Valvona e coautori [21] a una volta in muratura, posizionando i sensori FBG in prossimità dei punti ove era attesa la fessurazione o il distacco del rinforzo. Le deformazioni meccaniche e termiche sono state disaccoppiate utilizzando un sensore non caricato, consentendo di rilevare le deformazioni dovute alla variazione di temperatura e di isolare quindi quelle generate dai carichi. I sensori FBG sono stati applicati anche a una parete in muratura di adobe per rilevare l'evoluzione del quadro fessurativo (come trasduttori di spostamento) e per l'identificazione dinamica (come accelerometri) da Antunes et al. [22]. Infine, Shaikh e collaboratori [23] hanno testato travi in cemento armato rinforzate con diversi sistemi FRCM e hanno studiato il possibile uso di due tipi di sensori a fibre ottiche, gli FBG (discreti) e la riflettometria ottica Brillouin nel dominio del tempo (BOTDR, distribuita), che sono stati incorporati nelle travi in c.a. e incollati sia sulle barre di acciaio che sul tessuto FRCM.

III. I MATERIALI UTILIZZATI NELLA SPERIMENTAZIONE IN LABORATORIO

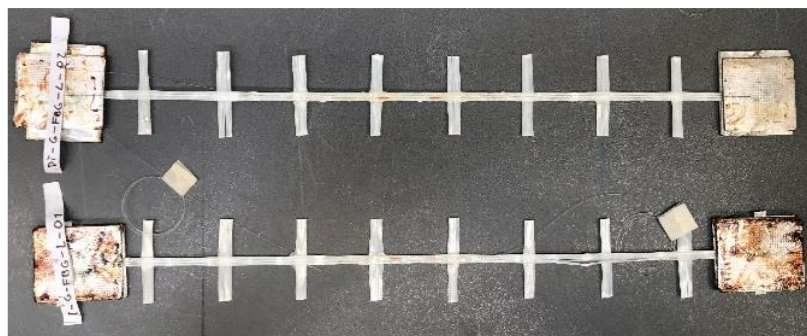
Nell'ambito di questo studio, sono state eseguite prove di trazione diretta su campioni di rete in FRP di vetro, dotati di sensori a fibre ottiche FBG (Fig. 1a). I campioni sono lunghi 50 cm e sono stati estratti da una rete FRP con spaziatura di 50 mm x 50 mm, composta da fibre di vetro e resina termoindurente, con una grammatura di 335 g/m². La rete è bilanciata, il che significa che ha la stessa quantità di fibre in direzione longitudinale (ordito) e trasversale (trama), per ciascuna delle quali lo spessore equivalente è di 0.044 mm. L'area della sezione trasversale di un filo è di 2.19 mm². Vale la pena ricordare che le fibre di vetro, basalto, carbonio e aramide sono attualmente utilizzate per le reti in FRP dei sistemi CRM [24]. Il vetro e il basalto sono considerati particolarmente vantaggiosi per la loro compatibilità meccanica con i supporti in muratura e per la loro economicità (hanno un valore basso del modulo di elasticità a trazione e sono più economici del carbonio e dell'aramide). In questo lavoro è stata utilizzata una rete in vetro perché è la più adottata nel settore e per la sua compatibilità con i cavi in fibra ottica, anch'essi realizzati con fibre di vetro. Sono state utilizzate fibre ottiche SMF28 con rivestimento in acrilato, che incorporano un sensore FBG da 10 mm protetto da un rivestimento in poliammide. Secondo la scheda tecnica, la riflettività del sensore è superiore al 90%, mentre la tolleranza sul valore della lunghezza d'onda centrale è di +/- 0.15 nm.

Per prima cosa, i fili della rete sono stati puliti con una soluzione alcolica e lasciati asciugare. Quindi, i sensori FBG sono stati incollati utilizzando una resina epossidica bicomponente con una resistenza a trazione di 30 N/mm² e un modulo di elasticità a trazione di 1760 N/mm². I sensori FBG sono stati posizionati nella direzione dell'ordito, al centro tra due fili di trama (posizione "L", Fig. 1b) o all'intersezione tra trama e ordito (posizione "X", Fig. 1c). I campioni sono stati nominati DT-G-FBG-L o DT-G-FBG-X, dove DT sta per Direct Tensile, G sta per Glass FRP mesh, FBG indica la presenza di sensori FBG e, infine, L o X indica la posizione del sensore, come detto sopra. Dopo 7 giorni di polimerizzazione della resina, alle estremità dei provini sono stati incollati talloni di alluminio di 3 mm di spessore per garantire un adeguato afferraggio nelle morse della macchina di prova.

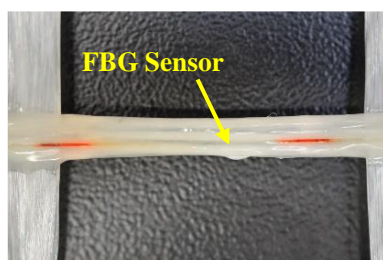
IV. SETUP DI PROVA E STRUMENTAZIONI

Le prove di trazione sono state eseguite con una macchina servoidraulica MTS Landmark con una capacità di carico di 100 kN, in controllo di spostamento ed eseguite con una velocità di 2 mm/s. Il carico è stato registrato da una cella di carico integrata, con frequenza di campionamento di 10 Hz. Lo spostamento della lunghezza d'onda riflessa è stato registrato da un interrogatore ottico FS22 Industrial BraggMETER HBM alla frequenza di campionamento di 1 Hz.

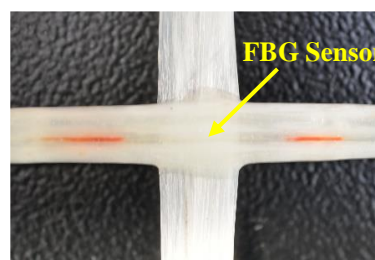
Le misurazioni della deformazione con correlazione digitale d'immagine (DIC) sono state effettuate analizzando le foto digitali scattate con una fotocamera Nikon a un intervallo di tempo di 3s, con il software open source NCorr sviluppato in ambiente Matlab [25]. Due marcatori artificiali (linguette metalliche con un pattern maculato) sono stati incollati al campione, e la DIC ha fornito il loro spostamento relativo, consentendo il monitoraggio della porzione centrale del filo, che comprendeva il sensore FBG (Fig. 2). Prima dell'inizio del test è stato applicato un leggero precarico per migliorare l'allineamento del campione. Le prove comprendevano serie di cicli di scarico-ricarico secondo il seguente protocollo: 5 cicli tra lo 0‰ e l'1‰ di deformazione assiale, 5 cicli tra lo 0‰ e il 2‰, 5 cicli tra lo 0‰ e il 5‰ e una rampa finale dallo 0‰ alla rottura del sensore FBG.



(a)



(b)



(c)

Fig. 1 – Fili di rete in FRP con sensori FBG e pronti per il test (a), e dettaglio degli FBG nelle posizioni L (b) e X (c).

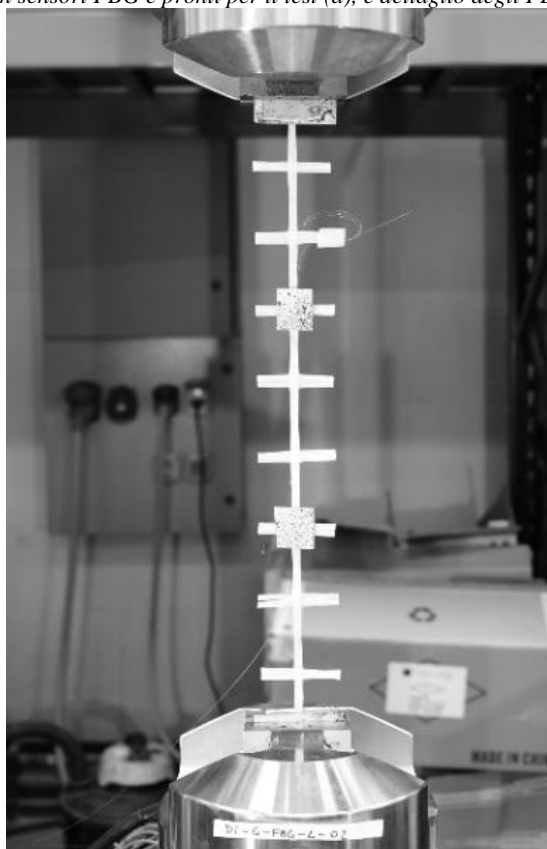


Fig. 2 – Setup sperimentale.

V. I RISULTATI DELLE PRIME PROVE SPERIMENTALI

Le prove di trazione hanno mostrato una risposta elastica lineare della rete, anche nei cicli di carico-scarico, fino a una rottura puramente fragile, con una resistenza media alla trazione di 1321 N/mm^2 , una deformazione ultima dell'1.50% e un modulo di elasticità di 100.8 kN/mm^2 . Le misure DIC e FBG sono riportate nella Fig. 3, in cui ogni grafico si riferisce a un singolo campione di rete. Il primo valore di deformazione (ϵ_{DIC}) è stato calcolato come lo

spostamento relativo tra i due marcatori artificiali diviso la loro distanza iniziale, mentre il secondo (ε_{FBG}) è stato ottenuto dalla variazione della lunghezza d'onda con la seguente relazione:

$$\varepsilon_{FBG} = \frac{\Delta\lambda_B}{0.78\lambda_B} \quad (1)$$

dove $\Delta\lambda_B$ è la variazione della lunghezza d'onda centrale associata alla deformazione del sensore FBG e λ_B è la lunghezza d'onda centrale iniziale. L'errore dei dati di deformazione FBG rispetto a quelli DIC, indicato nei grafici, è stato calcolato attraverso la deviazione quadratica media (Root Mean Square Deviation, *RMSD*):

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^T (\varepsilon_{DIC,i} - \varepsilon_{FBG,i})^2}{T}} \quad (2)$$

dove i indica l'istante di tempo i -esimo e T è il totale degli istanti di tempo presi in considerazione per il calcolo.

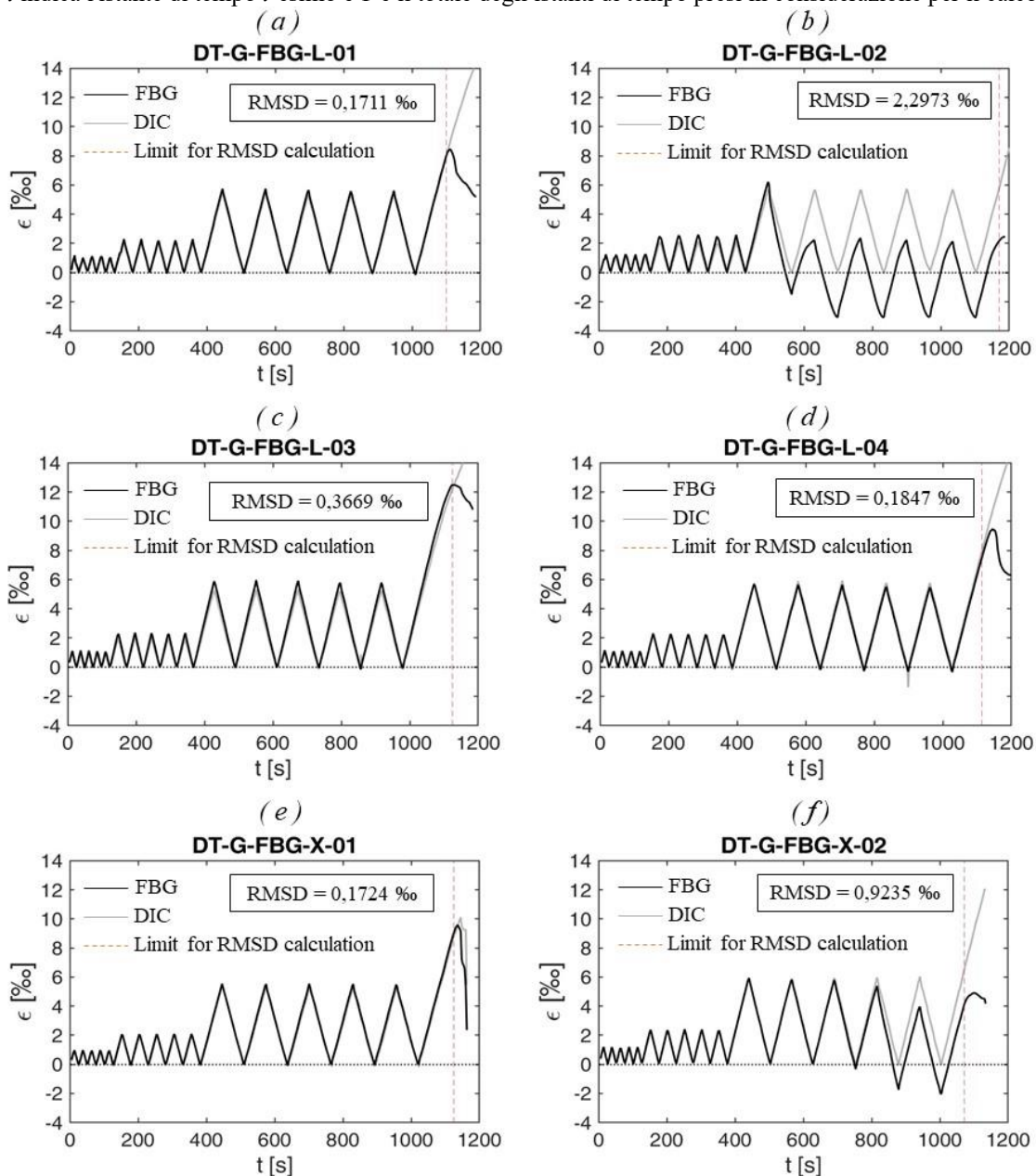


Fig. 3 – Curve di risposta sperimentali deformazione-tempo.

I grafici mostrano che le deformazioni FBG e DIC sono risultate sempre in buon accordo tra loro nelle fasi iniziali della prova. Poi, a valori di deformazione compresi tra il 5% e il 12%, si è verificato, in alcuni casi, uno scorrimento del sensore FBG, all'interfaccia tra fibra e resina oppure tra nucleo e rivestimento, peraltro rilevato chiaramente dai ricercatori che hanno condotto il test, che ha portato a una differenza non trascurabile tra le due misure. Si noti che questi valori di deformazione corrispondono a un $\Delta\lambda$ superiore a 7 nm, che è la deformazione limite dichiarata del rivestimento in poliammide. L'RMSD è stato calcolato fino all'attivazione di questo scorrimento e varia tra lo 0.05 % e il 2.3%. Andando ad analizzare le singole prove nel dettaglio, nel campione DT-G-FBG-L-01, la sovrapposizione tra le misurazioni è buona fino alla rampa finale, in cui si verifica uno scorrimento alla deformazione dell'8%. Questo provino ha mostrato il valore minimo di RMSD pari a 0.17%. Nel DT-G-FBG-L-02, il sensore ha funzionato correttamente fino al primo ciclo al 5%, mentre il provino DT-G-FBG-L-03 ha mostrato un picco alla fine del quarto ciclo al 5% dovuto a una rotazione del filo, che non è stata rilevata dal sensore FBG. In questo caso, lo scorrimento si è verificato al 12%. Il DT-G-FBG-L-04 ha mostrato la stessa rotazione nello stesso momento, ma lo scorrimento è avvenuto al 10%. Nel campione DT-G-FBG-X-01 non si è verificato alcuno scorrimento prima della rottura del filo al 10% ed infine nel campione DT-G-FBG-X-02, lo scorrimento si è attivato all'inizio del terzo ciclo al 5%

VI. CONCLUSIONI

La ricerca in corso presso l'Università degli Studi Roma Tre, con il coinvolgimento di ENEA, Kimia SpA, Indagini Strutturali ed Ingegneria Integrata sta sviluppando un sistema integrato CRM-FBG, combinando i rinforzi a matrice inorganica Composite Reinforced Mortar ed i sensori a reticolo di Bragg in fibra ottica. Il sistema è ancora in una fase iniziale dello sviluppo ma i primi prototipi sembrano dare risultati promettenti, con l'obiettivo ambizioso di mettere a punto una tecnologia integrata per il rinforzo auto-monitorante delle costruzioni esistenti, con grandi potenzialità soprattutto per le applicazioni al patrimonio architettonico.

VII. BIBLIOGRAFIA

- [1] S.De Santis, F.Roscini, G.de Felice, "Retrofitting of masonry vaults by basalt-textile reinforced mortar overlays", *International Journal of Architectural Heritage*, vol.13, No.7, 2019, pp.1061-1077.
- [2] S.Babaeidarabad, F.De Caso, A.Nanni, "Out-of-Plane Behavior of URM Walls Strengthened with Fabric-Reinforced Cementitious Matrix Composite", *J Compos Constr*, vol.4, No.18, 2013.
- [3] S.De Santis, G.De Canio, G.De Felice, P.Meriggi, I.Roselli, "Out of plane seismic retrofitting of masonry walls with Textile Reinforced Mortar composites", *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol.17, No.11, 2019, pp.6265-6300.
- [4] N.Gattesco, L.Boem, A.Dudine, "Diagonal compression tests on masonry walls strengthened with a GFRP mesh reinforced mortar coating", *Bull Earthquake Eng* 13, 2015, pp.1703-1726.
- [5] S.De Santis, G.de Felice, "Shake table tests on a tuff masonry structure strengthened with composite reinforced mortar", *Composite Structures*, vol.275, No.114508, 2021.
- [6] P.Meriggi, G.de Felice, S.De Santis, "Design of the out-of-plane strengthening of masonry walls with fabric reinforced cementitious matrix composites", *Construction and Building Materials*, vol.240, No.117946, 2020.
- [7] CSLPP, "Linee Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturali di costruzioni esistenti", 2018.
- [8] EAD 340392-00-0104, "CRM (Composite Reinforced Mortar) Systems for strengthening concrete and masonry structures", 2018.
- [9] CNR-DT 215/2018: Guide for the design and construction of Externally Bonded Fibre Reinforced Inorganic Matrix systems for strengthening existing structures.
- [10] ACI 549.6R-20: Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) and Steel-Reinforced Grout (SRG) Systems for Repair and Strengthening Masonry Structures.
- [11] K.Bremer, M.Wollweber, F.Weigand, M.Rahlvesa, M.Kuhnec, R.Helbig, B.Roth, "Fibre optic sensors for the structural health monitoring of building structures", in *3rd International Conference on System-integrated Intelligence: New Challenges for Product and Production Engineering*, 2016.
- [12] J.Chen, B.Liu, H.Zhanh, "Review of fiber Bragg grating sensor technology", *Frontiers of optoelectronics in China*, vol.4, No.2, 2011, pp.204-212.
- [13] X.Qiao, Z.Shao, W.Bao, Q.Rong, "Fiber Bragg Grating Sensors for the Oil Industry", *Sensors*, vol.17, No.429, 2017.
- [14] H.Cheng-Yu, Z.Yi-Fan, Z.Meng-Xi, L.M. G.Leung, L.Li-Qiang, "Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques", *Sensors and Actuators A* 244, 2016, pp.184-197.
- [15] L.Jinxing, Q.Junling, F.Haobo, Z.Qian, H.Zhinan, W.Junbao, C.Jianxun, "Fiber Bragg Grating Sensors-Based In Situ Monitoring and Safety Assessment of Loess Tunnel", *Journal of Sensors* ID 8658290, 2016.
- [16] L.Ren, Z.G.Jia, H.N.Li, G.Song, "Design and experimental study on FBG hoop-strain sensor in pipeline monitoring", *Optical Fiber Technology*, vol.20, 2014, pp.15-23.
- [17] B.Glisic, "Fiber optic sensors for subsea structural health monitoring", in *Subsea Optics and Imaging*, 2013, pp.434-470.
- [18] R.Scott, P.Banerji, S.Chikermane, S.Srinivasan, M.Basheer, "Commissioning and Evaluation of a Fiber-Optic Sensor System for Bridge Monitoring", *IEEE SENSORS JOURNAL*, vol.13, No.7, 2013, pp.2555-2562.

- [19] K.Yüksel, D.Kinet, V.Moeyaert, G.Kouroussis, C.Caucheteur, "Railway monitoring system using optical fiber grating accelerometers", *Smart Materials and Structures* , vol.27, 2018.
- [20] E.Verstrynge, K.De Wilder, A.Drougkas, E.Voet, K.Van Balen, M.Wevers, "Crack monitoring in historical masonry with distributed strain and acoustic emission sensing techniques", *Construction and Building Materials*, vol.162, 2018, pp.898-907.
- [21] F.Valvona, J.Toti, V.Gattulli, F.Potenza, "Effective seismic strengthening and monitoring of a masonry vault by using Glass Fiber Reinforced Cementitious Matrix with embedded Fiber Bragg Grating sensors", *Composites Part B*, vol.113, 2017, pp.355-370.
- [22] P.Antunes, H.Lima, H.Varum, P.André, "Optical fiber sensors for static and dynamic health monitoring of civil engineering infrastructures: Abo de wall case study", *Measurement*, vol.45, 2012, pp.1695-1705.
- [23] A.Shaikh, L.J.Butler, "Self-sensing fabric reinforced cementitious matrix systems for combined strengthening and monitoring of concrete structures", *Construction and Building Materials* , vol.331, 2022.
- [24] CSLLPP, "Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione dei sistemi a rete preformata in materiali compositi fibrorinforzati a matrice polimerica da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti con la tecnica dell'intonaco armato CRM (Composite Reinforced Mortar)", Rome, Italy 2019.
- [25] J.Blaber, B.Adair, A.Antoniou, "Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software", *Experimental Mechanics*, vol.55, No.6, 2015, pp.1105-1122.