

INTRODUZIONE

Tra le tecniche maggiormente diffuse nell'ambito del consolidamento di murature esistenti rientrano i sistemi CRM ed FRCM, consistenti nel placcaggio delle membrature mediante malte strutturali rinforzate con reti in materiale composito. Questi sistemi di consolidamento, la cui comparsa sul mercato è piuttosto recente, vengono di norma applicati in abbinamento a sistemi di connessione che hanno la funzione principale di solidarizzare il rinforzo alla muratura e che, in accordo alle Norme specifiche ([1], [2], [3], [4]), risultano obbligatori nella maggior parte delle applicazioni previste. Il compito delle connessioni è anche quello di realizzare il collegamento trasversale tra eventuali paramenti scollegati della muratura ed in alcune situazioni possono anche introdurre negli elementi rinforzati un effetto di confinamento. I sistemi di connessione che si utilizzano in abbinamento con i placcaggi tipo CRM ed FRCM si compongono di un connettore in FRP e di un ancorante che ha la funzione di solidarizzare il connettore in FRP alla muratura. Le tipologie di connettore ad oggi maggiormente diffuse sul mercato sono rappresentate dai connettori preformati ad L (**Figura 1-a**) e dai connettori semi-impregnati cosiddetti "a fiocco" (**Figura 1-b**) che consistono di una porzione preformata rettilinea ed una o due estremità di sole fibre non impregnate. I primi rappresentano la trasposizione del concetto della barra metallica piegata ad L tipica degli intonaci armati tradizionali nel mondo dei compositi, mentre i secondi riprendono la filosofia dei fiocchi il cui utilizzo ha origine nell'ambito dei sistemi FRP.

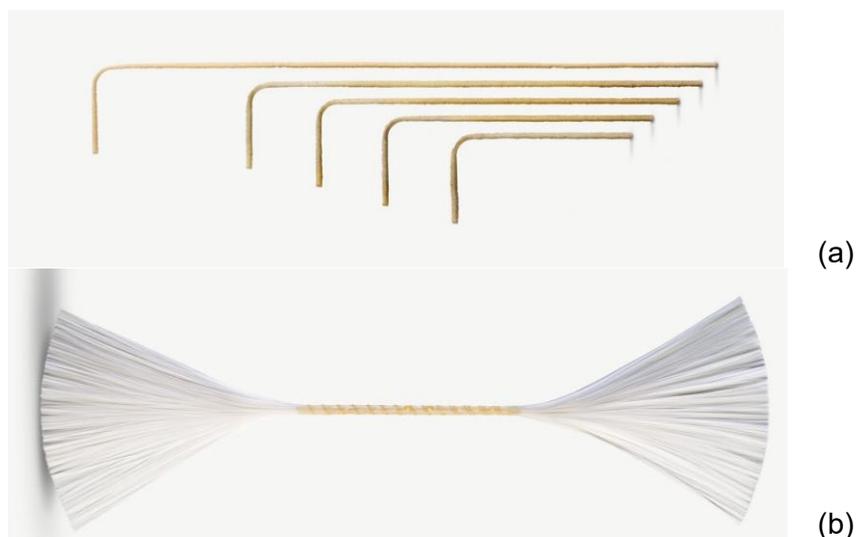


Figura 1. Principali tipologie di connettore presenti sul mercato: a) connettori preformati; b) connettori semi-impregnati (versione con doppia estremità non impregnata).

Entrambe le tipologie di connettore citate hanno caratteristiche che li rendono adatti ed efficienti in diverse casistiche e che ne hanno quindi favorito la diffusione sul mercato. I loro punti di forza sono tuttavia affiancati da una serie di limitazioni e difficoltà applicative che si possono manifestare in modo più o meno rilevante a seconda del tipo di applicazione prevista. Le dimensioni della loro sezione rendono infatti i connettori preformati non adatti all'applicazione in abbinamento a sistemi FRCM per i quali lo spessore complessivo è limitato superiormente dalle Norme ([2], [5]) a 15 mm (il diametro dei connettori preformati è nella maggior parte dei casi compreso tra i 6 ed i 10 mm). A differenza delle barre in acciaio gli elementi preformati in FRP non possono essere piegati in cantiere, di conseguenza la realizzazione di connessioni passanti richiede l'utilizzo di 2 elementi distinti da giuntare per sovrapposizione nello spessore della muratura. La solidarizzazione tra i 2 connettori che formano la connessione passante avviene per mezzo

dell'ancorante che, oltre ad unire i connettori al supporto, ha in questo caso la funzione di dare continuità all'elemento di connessione. Questa operazione implica la complicazione della procedura applicativa e, per garantire la massima efficacia della giunzione, si deve essere certi che l'ancorante riempia completamente la porzione di foro dove i 2 connettori sono sovrapposti. Dettaglio quest'ultimo tanto fondamentale quanto difficile da verificare a posteriori. Il connettore preformato richiede comunemente l'utilizzo di appositi fazzoletti di ripartizione che hanno lo scopo di diffondere gli sforzi all'interno del sistema di rinforzo, andando quindi ad introdurre un ulteriore articolo e quindi complicando la logistica di cantiere. I connettori semi-impregnati con doppia estremità sfioccabile permettono invece di realizzare connessioni passanti senza dover ricorrere alla giunzione per sovrapposizione, ma la disponibilità di elementi di lunghezza prefissata ne limita l'adattabilità ai diversi spessori di muratura che difficilmente sono corrispondenti alla lunghezza del tratto preformato. In aggiunta, l'operazione di sfiocco e solidarizzazione delle fibre alla malta è laboriosa e comporta un aggravio dei tempi di applicazione rispetto a quanto avviene per i connettori preformati. Per questi motivi la scelta del sistema di connessione più adatto all'applicazione non è un problema dalla soluzione immediata e molto spesso si ricorre ad un compromesso dovendo mediare tra le esigenze tecniche, le esigenze di tipo logistico e l'efficienza di cantiere. Le Norme di riferimento ([1], [2], [3], [4]) non forniscono indicazioni sul numero di connessioni da realizzare in abbinamento ai sistemi CRM ed FRCM ma nella pratica vengono tipicamente disposte 4 connessioni al metro quadrato di parete. Sulla base di questo parametro, andando anche a considerare quelle che sono le lavorazioni richieste per l'applicazione delle connessioni (realizzazione dei fori, iniezione dell'ancorante, eventuale sfiocco o sovrapposizione), è evidente come l'installazione delle connessioni sia un aspetto che influisce in modo importante sulla lavorazione e di conseguenza sull'efficienza e sull'economia delle operazioni di cantiere.

ARMIS ALL-IN-ONE: LA RIVOLUZIONE DI TASSULLO

Lo sviluppo del sistema di connessione ARMIS ALL-IN-ONE di Tassullo nasce quindi nel contesto di un mercato che ad oggi propone diverse soluzioni di connessione valide, nessuna delle quali però in grado di massimizzare l'efficienza applicativa e la compatibilità con tutti i sistemi di rinforzo e con tutte le possibili configurazioni e condizioni al contorno riscontrabili in cantiere. La ricerca che ha portato allo sviluppo di ARMIS ALL-IN-ONE si è posta l'obiettivo di innovare proponendo una soluzione in grado di incorporare i pregi delle tipologie di connessione presenti sul mercato (la denominazione ALL-IN-ONE fa riferimento proprio a questo aspetto) eliminandone le caratteristiche dalle quali nascono le limitazioni esposte nel paragrafo precedente. Il team di Tassullo ha risposto a queste esigenze mediante l'ideazione e la progettazione di un connettore facilmente assemblabile in cantiere che rappresenta un concept rivoluzionario ed esce dagli schemi prefissati con i quali l'attuale mercato si allinea. Il sistema è composto dalla barra rettilinea in GFRP ad aderenza migliorata ARMIS STRONG BAR di diametro 10 mm che si unisce alla specifica flangia ARMIS STRONG BLOCK, appositamente progettata per trasferire efficacemente gli sforzi dalla barra al placcaggio. La barra ARMIS STRONG BAR è fornita in segmenti di lunghezza pari a 120 cm e può essere tagliata in misura ricavando connettori di lunghezza adatta a tutti gli spessori di muratura riscontrabili in cantiere minimizzando gli sfridi sia per applicazioni monolaterale che per applicazioni bilaterale. La lunghezza di ARMIS STRONG BAR è stata selezionata in modo da permettere di realizzare connessioni monolaterale su murature di qualsiasi spessore compreso tra i 20 ed i 110 cm senza produrre sfridi e garantendo una profondità della connessione compresa tra 0.6 e 0.8 volte lo spessore complessivo della parete.

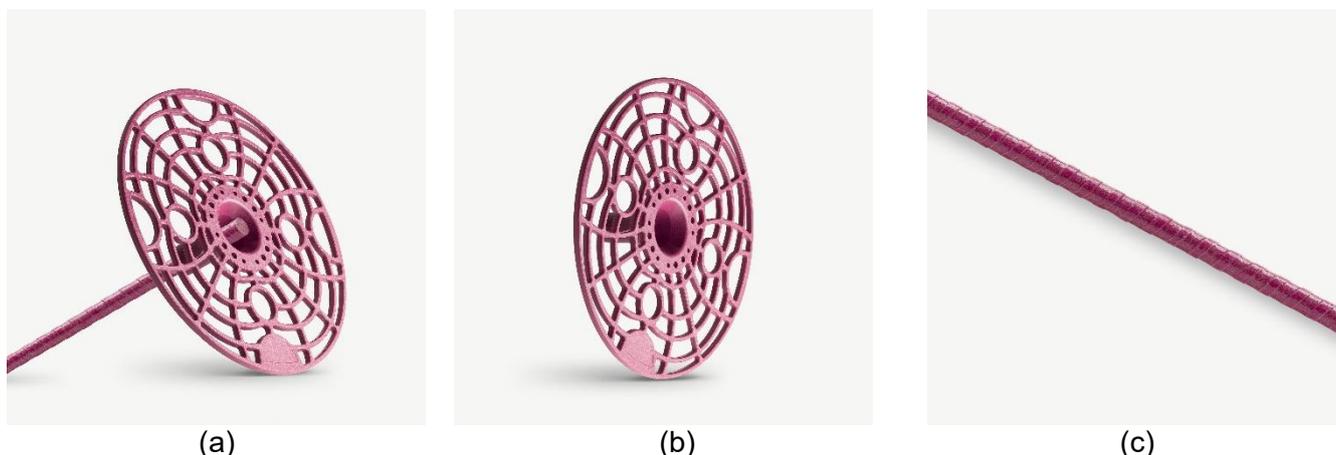


Figura 2. ARMIS ALL-IN-ONE: a) componenti pre-assemblati; b) ARMIS STRONG BLOCK; c) ARMIS STRONG BAR.

La geometria di ARMIS STRONG BLOCK è stata appositamente studiata per massimizzare l'efficacia del collegamento tra gli elementi che compongono il connettore e per massimizzarne la resistenza contenendo gli spessori entro valori compatibili con le limitazioni geometriche che caratterizzano i sistemi FRCC. Non di secondaria importanza sono gli accorgimenti introdotti per facilitare le operazioni applicative, come le specifiche alette che permettono il pre-assemblaggio a secco del connettore. Per quanto riguarda invece l'inghisaggio al supporto il sistema ARMIS ALL-IN-ONE prevede una doppia opzione. Da una parte la miscela di calce idraulica naturale NHL 5 ARMIS BFLUID CONNECT è in grado di offrire la massima compatibilità chimico-fisica con le murature storiche ed è particolarmente indicata per interventi di consolidamento strutturale nell'ambito del restauro, nel contesto di beni tutelati ed in generale in tutti i casi nei quali è richiesta la massima compatibilità dell'intervento. In alternativa è possibile optare per l'utilizzo di RESINA VE, resina vinilestere senza stirene fornita in cartucce bi-componente che permette di massimizzare la rapidità e la facilità di applicazione del sistema. Tutti i componenti sono caratterizzati da ottime caratteristiche di durabilità in ambienti aggressivi caratterizzati dalla presenza di umidità, di sali ed agli ambienti alcalini.



Figura 3. Sistema ARMIS ALL-IN-ONE applicato con sistema CRM RESTAURO.

PROCEDURA APPLICATIVA

La procedura applicativa del sistema ARMIS ALL-IN-ONE è stata studiata in modo approfondito con l'obiettivo di massimizzarne la semplicità, la velocità e conseguentemente l'efficienza.

La prima fase applicativa consiste nell'adeguata preparazione delle superfici di posa e nella successiva realizzazione dei fori per l'alloggiamento dei connettori rispettando gli interessi indicati nel progetto strutturale. Si consiglia di realizzare fori di diametro pari a 16 mm e di profondità pari ai 2/3 - 3/4 dello spessore della parete per l'applicazione del sistema di rinforzo su singolo paramento e passanti nel caso di applicazione su doppio paramento. A seguito di un'adeguata pulizia e bagnatura delle superfici e dei fori si procede al posizionamento dei segmenti di ARMIS STRONG BAR tagliati in misura entro i fori con funzione di marcaforo (**Figura 4-a**) e si applica un primo strato di malta strutturale di spessore pari alla metà dello spessore complessivo del rinforzo (4 – 6 mm per sistemi FRCM e 15 – 25 mm per sistemi CRM, **Figura 4-b**). Le barre vengono successivamente rimosse dai fori esercitando un movimento rotatorio in modo da asportare la malta in eccesso. Si posiziona quindi la rete strutturale inglobandola nella malta fresca esercitando una leggera pressione (**Figura 4-c**).



Figura 4. Procedura applicativa del sistema ARMIS ALL-IN-ONE: a) taglio di ARMIS STRONG BAR in misura; b) inserimento delle barre tagliate nei fori con funzione di marcaforo; c) applicazione del primo strato di malta strutturale; d) posizionamento della rete; e) pre-assemblaggio del connettore e inserimento nei fori precedentemente riempiti di ancorante; f) fissaggio definitivo del connettore ARMIS ALL-IN-ONE mediante RESINA VE.

A questo punto si pre-assemblano i componenti del connettore sfruttando le apposite alette presenti all'interno della svasatura di ARMIS STRONG BLOCK, si inietta l'ancorante ARMIS BFLUID CONNECT oppure RESINA VE nei fori di alloggiamento e si inserisce il connettore pre-assemblato entro gli stessi (**Figura 4-d**). Una volta posizionato il connettore si passa alla solidarizzazione finale dei componenti di ARMIS ALL-IN-ONE andando a riempire con RESINA VE la cavità vuota che si forma tra la barra e la svasatura della flangia (**Figura 4-e**). Per facilitare e velocizzare questa operazione è stato progettato un apposito diffusore da applicare all'estremità del beccuccio miscelatore che permette di riempire completamente la cavità in modo facile e veloce garantendo la massima tenuta del collegamento tra i due

componenti. Atteso il tempo di indurimento della resina è quindi possibile procedere con l'applicazione del secondo strato di malta fino a completare lo spessore del sistema di rinforzo (**Figura 4-f**).

Oltre ad essere rapida ed efficiente la procedura proposta garantisce il corretto posizionamento della rete all'interno della stratigrafia del rinforzo. In caso contrario l'efficacia del sistema di consolidamento può risultare compromessa, basti pensare all'eventualità nella quale la rete viene posizionata a contatto con il supporto murario senza essere correttamente inglobata nella malta strutturale.

VERIFICHE SPERIMENTALI

Il comportamento meccanico del sistema di connessione è stato valutato in collaborazione con il Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e Meccanica dell'Università Degli Studi di Trento a diversi livelli. In prima battuta è stata verificata la tenuta della testa del connettore confrontandola con quella relativa alle tipologie di connessione che ad oggi rappresentano il riferimento di mercato, vale a dire i connettori preformati e quelli semi-impregnati. A seguito del riscontro positivo ottenuto in questa prima fase le prove sperimentali sono state estese a murature rinforzate con sistema CRM applicato in diverse configurazioni mediante prove di taglio diagonale in accordo alla Norma ASTM E519 [8] e successivamente prove cicliche svolte su murature in scala reale.

Prove di tenuta della testa del connettore

La tenuta della testa del connettore intesa come la capacità del connettore di trasferire gli sforzi al placcaggio è stata valutata secondo un metodo interno su provini realizzati come illustrato nello schema di **Figura 5**.

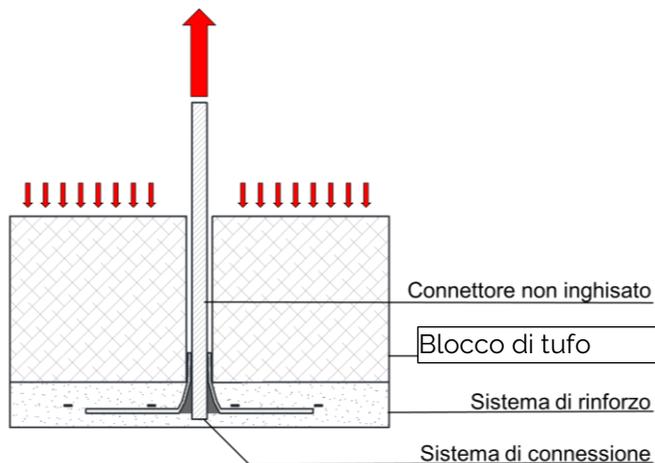


Figura 5. Test di tenuta della testa dei connettori, schema della prova

Su una faccia di un blocco di tufo di dimensioni $37 \times 25 \times 11 \text{ cm}^3$ che funge da supporto è stato applicato un sistema CRM con un unico connettore in posizione centrale inserito entro un foro passante senza inghisaggio. Il provino così realizzato è stato quindi fissato alla macchina di prova ed alla parte sporgente del connettore è stata applicata una forza di trazione. La prova misura la resistenza del collegamento tra il connettore e il sistema di rinforzo e la capacità dello stesso di trasferire gli sforzi normali al sistema di rinforzo. Nonostante non sia annoverata nelle Norme ([1], [6]) tra le caratteristiche essenziali da determinare per i sistemi di connessione, quella valutata è una proprietà meccanica che fornisce una misura della effettiva capacità del connettore di trasferire gli sforzi tra i diversi elementi dallo stesso connessi. Le Norme citate impongono infatti la determinazione della resistenza a trazione del tratto rettilineo del connettore e della capacità del sistema di connessione di trasferire gli sforzi al supporto murario, tralasciando la valutazione del terzo anello della catena rappresentato dall'interazione tra connettore e placcaggio. Al fine di produrre un confronto la campagna di prove ha preso in considerazione il sistema ARMIS ALL-IN-ONE (**Figura 6-a**) e sistemi di connessione che rappresentano lo standard di

mercato per quanto riguarda la categoria dei connettori preformati (**Figura 6-b**) e dei connettori semi-impregnati (**Figura 6-c**). Il sistema ARMIS ALL-IN-ONE ha mostrato in questo senso un ottimo comportamento, facendo registrare valori di tenuta fino al 70% superiori rispetto a quelli relativi ai sistemi che ad oggi rappresentano il riferimento di mercato. Per quanto riguarda invece il confronto tra connettori preformati e semi-impregnati le resistenze misurate sono sostanzialmente confrontabili, con un leggero vantaggio a favore della tipologia preformata.



Figura 6. Tipologie di connettore testate: a) ARMIS ALL-IN-ONE; b) Connettore preformato con apposito fazzoletto di ripartizione; c) connettore semi-impregnato.

Prove su murature rinforzate

L'efficacia del sistema è stata inoltre verificata mediante prove su campioni in muratura di mattoni in laterizio tipo UNI a due teste (spessore 25 cm) allettati con malta di calce (classe di resistenza M2.5) e rinforzata con il sistema CRM RESTAURO della linea rinforzi strutturali Tassullo composto da:

- FORTE CALCE M 10, malta di calce idraulica naturale NHL 5, spessore complessivo del rinforzo pari a 30 mm;
- ARMIS VETROAR 50x50, rete in fibra di vetro alcalino resistente;
- ARMIS ALL-IN-ONE, sistema di connessione inghisato con miscela di calce idraulica naturale NHL 5 ARMIS BFLUID CONNECT.

I test hanno riguardato campioni in configurazione non rinforzata, rinforzata su un singolo paramento e rinforzata su doppio paramento. Per la tipologia di muratura in esame la Tabella C8.5.II della Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 [7] propone di valutare gli effetti del rinforzo tramite intonaco armato applicato su doppio paramento adottando le stesse formulazioni relative alla muratura non rinforzata, moltiplicandone le resistenze meccaniche per un coefficiente correttivo che vale 1.5 (le resistenze meccaniche sono incrementate del 50%). La Norma non fornisce invece indicazioni che permettano di risalire ad un coefficiente correttivo da utilizzare nel caso di rinforzo posato su un singolo paramento della muratura, casistica tutt'altro che rara nella pratica.

Prove di taglio diagonale

Il primo step delle verifiche sperimentali su murature rinforzate è stato svolto mediante prove di compressione diagonale secondo lo standard definito nella Norma ASTM E519/E519M-15 [8] (**Figura 7-a**). I campioni prismatici di dimensioni $1.2 \times 1.2 \text{ m}^2$ vengono sollecitati da una forza di compressione diretta lungo una diagonale e vanno in crisi quando la tensione secondaria di trazione lungo la diagonale opposta supera la resistenza a trazione del materiale (**Figura 7-b**). La procedura permette quindi di stimare la resistenza a taglio della muratura nelle diverse configurazioni. Dai confronti emerge che il rinforzo applicato su singolo paramento comporta incrementi di resistenza superiori al 70%, mentre gli incrementi di resistenza relativi a campioni con rinforzo simmetrico superano il 150%.

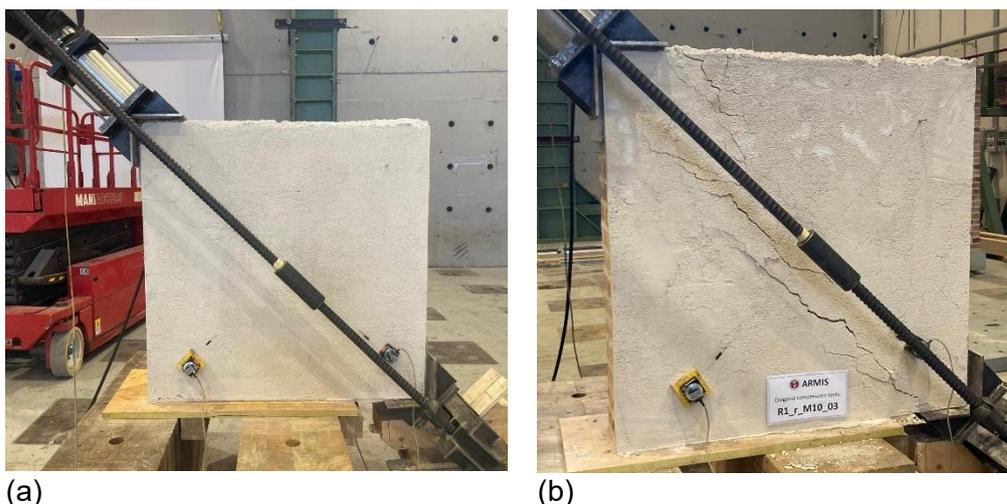


Figura 7. Prove di compressione diagonale: a) Vista del setup di prova; b) provino danneggiato a seguito della sequenza di prova.

Prove in scala reale

La sperimentazione ha successivamente riguardato pareti in scala reale caratterizzate da diversi rapporti di snellezza caricate nel piano (**Figura 8-a**). Il protocollo di prova adottato ha previsto l'applicazione di un precarico di compressione verticale e la successiva introduzione di una forza orizzontale ciclica in corrispondenza della sommità della parete applicata in controllo di spostamento con ampiezze via via crescenti fino a portare il campione a rottura (**Figura 8-b**). Lo sforzo verticale applicato nella fase di precarico schematizza la presenza delle azioni gravitazionali verticali derivanti dalle porzioni di edificio sovrastanti, mentre la forza ciclica applicata in modo quasi statico rappresenta l'azione sismica che può investire la parete.

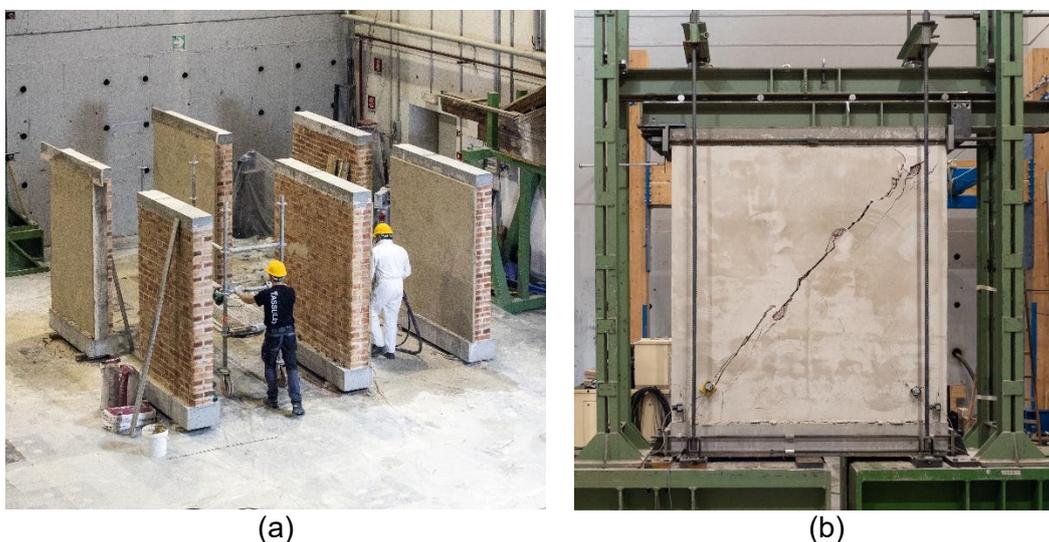


Figura 8. Prove sperimentali in scala reale: a) gruppo di provini in scala reale; b) setup di prova e modalità di rottura tipica.

I test in scala reale hanno sostanzialmente confermato le evidenze riscontrate nella fase precedente, con incrementi di resistenza superiori al 50% nel caso di rinforzo su singolo paramento e superiori al 100% per rinforzi applicati su doppio paramento. Incrementi simili sono stati misurati anche per quanto riguarda la capacità di spostamento delle pareti.

CONCLUSIONI

In un mercato dei rinforzi strutturali compositi che ad oggi propone diverse tipologie di sistemi di connessione, ciascuno dotato di punti di forza ma anche di importanti limitazioni, trova spazio il progetto ARMIS ALL-IN-ONE. Il team di Tassullo si è posto l'obiettivo di progettare una soluzione definitiva in grado di far confluire in un unico sistema i vantaggi delle tipologie di connessione ad oggi maggiormente diffuse sul mercato andandone ad eliminare i punti deboli. Il risultato del progetto di sviluppo è una tecnologia innovativa ed unica sul mercato che prevede l'utilizzo di un connettore certificato assemblabile in cantiere ed in grado di rispondere alle principali esigenze tecniche ed applicative. Il sistema ARMIS ALL-IN-ONE propone tecniche e componenti dal design innovativo e porta sul mercato un nuovo concetto di sistema di connessione, massimizzando le resistenze meccaniche e l'interazione con i sistemi CRM ed FRCM e l'efficienza applicativa dei sistemi di rinforzo con i quali si integra.

CERTIFICAZIONE DEL SISTEMA

Il sistema di connessione ARMIS ALL-IN-ONE è conforme alle Linee Guida Ministeriali per la qualificazione dei sistemi CRM [1] ed FRCM [2] ed è in possesso di Certificato di Valutazione Tecnica Europeo ETA-23/1019 rilasciato in accordo all'EAD 340392-00-0104 – "CRM (Composite Reinforced Mortar) systems for strengthening concrete and masonry structures" [6].

NOTE

La documentazione tecnica relativa al sistema ARMIS ALL-IN-ONE e a tutti i sistemi Tassullo è disponibile per il download sul sito www.tassullo.it. Per informazioni contattare il servizio tecnico Tassullo all'indirizzo tecnico@tassullo.it.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Consiglio superiore dei Lavori Pubblici – Servizio Tecnico Centrale (CSLLPP – STC), 2019 "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)";
- [2] Consiglio superiore dei Lavori Pubblici – Servizio Tecnico Centrale (CSLLPP – STC), 2022 "Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti";
- [3] Consiglio superiore dei Lavori Pubblici – Servizio Tecnico Centrale (CSLLPP – STC), 2019 "Linea Guida per la progettazione, l'esecuzione e la manutenzione di interventi di consolidamento strutturale mediante l'utilizzo di sistemi di rinforzo FRCM";
- [4] Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), 2018 "CNR-DT 215/2018 – Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a matrice inorganica";
- [5] European Organisation for Technical Assessment (EOTA), 2018 "EAD 340275-00-0104 – Externally-bonded composite systems with inorganic matrix for strengthening of concrete and masonry structures";
- [6] European Organisation for Technical Assessment (EOTA), 2018 "EAD 340392-00-0104 – CRM (Composite Reinforced Mortar) systems for strengthening concrete and masonry structures";
- [7] Ministero Delle Infrastrutture e Dei Trasporti, 2018 "Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. - Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.";
- [8] American Society for Testing and Materials (ASTM), 2015 "ASTM E519-15 - Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages";