



UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA
Dipartimento di Strutture

Assunta Venneri

COMPORTAMENTO A TAGLIO DI ELEMENTI MURARI RINFORZATI CON COMPOSITI *FRCM* IN FIBRE NATURALI

Tesi di Dottorato in Ingegneria dei Materiali e delle Strutture
Scuola Pitagora in Scienze Ingegneristiche
Ciclo XXIV (2008 - 2011)
S.S.D. ICAR 08 - Scienza delle Costruzioni



Coordinatore: prof. Renato S. Olivito
Tutor: prof. Renato S. Olivito

UNIVERSITÀ DELLA CALABRIA
Dipartimento di Strutture

Assunta Venneri

**COMPORTAMENTO A TAGLIO DI ELEMENTI MURARI
RINFORZATI CON COMPOSITI *FRCM* IN FIBRE NATURALI**

Tesi di Dottorato in Ingegneria dei Materiali e delle
Strutture

Sezione: Ingegneria dei Materiali e delle Strutture

Scuola Pitagora in Scienze Ingegneristiche

Ciclo XXIV (2008 - 2011)

S.S.D. ICAR 08 - Scienza delle Costruzioni

Coordinatore: prof. Renato S. Olivito

Tutor: prof. Renato S. Olivito

A mia madre e mio fratello Carmine

INDICE

<i>Sommario</i>	1
<i>Abstract</i>	3
1. IL RINFORZO DELLE MURATURE CON I MATERIALI COMPOSITI	
1.1. Generalità	5
1.2. Istruzioni e Normativa	8
1.3. Tipologie di rinforzo di elementi murari con FRP	11
1.4. Materiali di rinforzo	13
1.4.1. Fibre dei compositi FRP	17
1.4.1.1. Fibre di vetro	19
1.4.1.2. Fibre di carbonio	21
1.4.1.3. Fibre aramidiche	24
1.4.2. Cenni sulle principali tipologie di matrici	26
1.4.3. Confronto tra le caratteristiche dei materiali di rinforzo	27
1.5. Nastri e tessuti non impregnati	30
1.6. Problemi di aderenza con il supporto murario	33
1.7. Bibliografia	38
2. I COMPOSITI <i>FRCM</i> IN FIBRE NATURALI PER IL RINFORZO ESTERNO DELLE MURATURE	
2.1. Introduzione	41
2.2. Caratteristiche fisico-meccaniche delle fibre naturali vegetali	45
2.2.1. Fibre di lino	49
2.2.2. Fibre di canapa	50
2.3. Matrici cementizie e resine epossidiche a confronto	52
2.4. Posa in opera dei rinforzi <i>FRCM</i>	54
2.5. Bibliografia	59

3. CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI DI BASE E PROVE SU

MICROELEMENTI

3.1. Premessa	61
3.2. Prove sperimentali sui materiali costituenti la muratura	62
3.2.1. Laterizio pieno	62
3.2.2. Malta cementizia	64
3.2.3. Proprietà meccaniche ed elastiche	68
3.3. Prove di scorrimento su triplete	68
3.4. Caratterizzazione meccanica dei compositi impiegati	73
3.4.1. Prove di trazione su nastri e tessuti in fibre naturali	76
3.4.2. Il problema della delaminazione all'interfaccia tra gli strati	84
3.4.2.1. Descrizione delle modalità di crisi	86
3.4.2.2. Prove di tipo <i>pull-out</i> su laterizi fibrorinforzati	88
3.4.2.3. Risultati sperimentali	91
3.4.2.4. Confronto con le linee guida <i>CNR-DT 200</i>	98
3.5. Bibliografia	101

4. COMPORTAMENTO SPERIMENTALE A TAGLIO NEL PIANO DI PANNELLI

RINFORZATI

4.1. Prove di taglio sulle murature	103
4.2. Prove di compressione diagonale	105
4.2.1. Strumentazioni e modalità di prova	109
4.2.2. Interpretazione della prova secondo <i>ASTM 519-07</i>	113
4.2.3. Interpretazione della prova secondo <i>RILEM TC 76-LUM</i>	115
4.2.4. Curve sforzo-deformazione e modulo di rigidezza	116
4.2.5. Sperimentazione su pannelli non rinforzati (<i>URM</i>)	117
4.2.6. Sperimentazione su pannelli rinforzati	122
4.2.6.1. Provini rinforzati con nastri in fibre di vetro	124

4.2.6.2. Provini rinforzati con tessuti in fibre naturali	131
4.2.7. Riepilogo dei risultati	138
4.3. Bibliografia	141
5. MODELLAZIONE NUMERICA CON IL CODICE DI CALCOLO <i>LMGC90</i>	
5.1. Introduzione	143
5.2. Il metodo NSCD	144
5.2.1. Parametrizzazione ed equazione della dinamica	145
5.2.2. Leggi di contatto attritivo	148
5.2.3. Struttura dell'approccio NSCD	150
5.2.4. Schema numerico per l'integrazione nel tempo	151
5.3. Individuazione del contatto	153
5.4. Micro e macro-modellazione	157
5.4. Indagine numerica	159
5.4.1. Modellazione della muratura	161
5.4.1.1. Calibrazione dei modelli volumetrici	161
5.4.1.2. Calibrazione dei modelli di interfaccia e di danneggiamento	164
5.4.1.3. Validazione dei modelli su un elemento murario semplice	169
5.4.2. Modello proposto per il rinforzo	172
5.4.2.1. Configurazione in diagonale	173
5.4.2.2. Configurazione a griglia ortogonale	175
5.5. Bibliografia	177
<i>Conclusioni</i>	179

Sommario

Nel presente lavoro, svolto nell'ambito del dottorato di ricerca, si è affrontato l'argomento della progettazione strutturale sostenibile attraverso lo studio di un sistema di rinforzo costituito da materiali a basso impatto ambientale. È stata analizzata, in particolare, la possibilità di sviluppo di un nuovo composito a matrice cementizia da impiegare nel campo della riabilitazione strutturale e dell'adeguamento sismico come rinforzo esterno di elementi in muratura. La fase fibrosa è rappresentata anch'essa da materiali non convenzionali ed eco-sostenibili, composti da fibre naturali di canapa e di lino nella forma di nastri e tessuti uni e bi-direzionali.

Riguardo l'uso dei sistemi FRCM (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*), costituiti da leganti inorganici idraulici in sostituzione delle resine epossidiche dei più tradizionali FRP (*Fiber Reinforced Polymer*), numerosi sono ormai gli studi sperimentali presenti nella letteratura scientifica che li vedono accoppiati a fibre di natura sintetica (vetro, carbonio, PBO, etc.). Tali indagini hanno dimostrato buone caratteristiche di adesione alla muratura, buona resistenza alle alte temperature e, con un'opportuna scelta della fase di rinforzo, buone caratteristiche meccaniche. Meno apprezzabile è risultata invece la compatibilità con le fibre. Prove sperimentali di delaminazione eseguite su murature e/o su elementi resistenti in laterizio/pietra rinforzati, hanno evidenziato, infatti, la frequenza di una modalità di crisi per perdita di aderenza tra la matrice e l'elemento di rinforzo. Il problema dello "scollamento" delle fibre dall'adesivo (*debonding*) è alla stregua del fenomeno del distacco del materiale composito dalla parte superficiale del supporto murario (*peeling*, tipico dei sistemi con FRP), poiché entrambe le tipologie di rottura si manifestano all'interfaccia tra gli strati impedendo al materiale di rinforzo di lavorare al massimo delle proprie prestazioni a trazione.

Nell'ambito delineato, la scelta di impiegare fibre lunghe naturali (*NF*) in sostituzione delle fibre artificiali sintetiche comunemente impiegate nel campo dei rinforzi strutturali con compositi rappresenta un'innovazione assoluta. Si tratta di materiali con modeste caratteristiche meccaniche ed elastiche ma del tutto paragonabili alle fibre di vetro di medie prestazioni. L'attività sperimentale condotta per il presente studio ha avuto lo scopo di

indagare preliminarmente la compatibilità di tali fibre con una matrice cementizia specifica per sistemi di consolidamento esterno e, successivamente, di valutare l'efficacia del materiale composito ottenuto (NFRCM) quando applicato a elementi in muratura di mattoni pieni sottoposti ad azioni di taglio nel piano.

Più specificamente, dopo una prima fase di caratterizzazione a trazione dei nastri, affiancata a una campagna di prove di tipo *pull-out* su elementi in laterizio fibrorinforzati, si è proceduto a una serie di prove di compressione diagonale su campioni di muratura privi di rinforzo e su campioni rinforzati, consentendo di rilevare l'efficacia del rinforzo in termini di capacità resistente e rigidità al taglio. Le strisce di materiale composito sono state applicate su ambo le superfici regolarizzate dei pannelli murari secondo le disposizioni geometriche in diagonale e a reticolo a maglie quadrate. Le prove di aderenza e quelle di taglio nel piano sono state ripetute utilizzando un tessuto in fibre di vetro immerso nella stessa matrice in cui sono state impregnate le fibre naturali, allo scopo di eseguire un confronto con i materiali di rinforzo comunemente impiegati nei sistemi FRCM.

Alla campagna sperimentale, infine, è stata accostata un'analisi numerica atta a fornire dei modelli capaci di descrivere il comportamento sperimentale esibito dai provini murari durante le prove di laboratorio. In particolare, i pannelli sono stati discretizzati all'interno del codice di calcolo LMGC90 e le strisce di composito modellate tenendo conto solo della modalità di rottura a trazione delle fibre nell'ipotesi di perfetta aderenza al supporto murario. Il codice risulta essere particolarmente adatto alla modellazione della muratura, basandosi su un metodo agli elementi distinti (DEM) che adotta un algoritmo di risoluzione completamente implicito (*Non Smooth Dynamic Contact method*). In particolare, esso è utilizzato per modellare il comportamento globale di sistemi discreti considerando il comportamento dinamico proprio di ogni componente in interazione con gli altri elementi. Le analisi numeriche risultano in buon accordo con le risultanze sperimentali, mostrando la validità di questo primo approccio di modellazione numerica per la muratura rinforzata.

Parole chiave: Muratura, Rinforzo, FRCM, Fibre naturali, Compressione diagonale, Modellazione.

Abstract

This Ph.D. thesis research deals with the topic of the sustainable structural design through the study of a reinforcement system made of low environmental impact materials. In particular, the possibility of developing a new cement-matrix composite to be used as external reinforcement of masonry in structural rehabilitation and seismic adjustment was analyzed. The fibrous phase is also represented by non-conventional and eco-friendly materials, made by natural fibers, such as hemp and flax, in form of uni and bi-directional fabrics.

Scientific literature annoverates many experimental works concerning the use of FRCM (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*) systems consisting of inorganic hydraulic binders in place of epoxy resin matrix typical of traditional FRP (*Fiber Reinforced Polymer*), in which they are coupled to synthetic fibers (glass, carbon, PBO, etc.). These investigations have shown good adhesion properties to masonry, good resistance to high temperatures and, with an appropriate selection of the reinforcement phase, good mechanical properties. On the other hand, fiber-matrix compatibility is less appreciable than that between composite and masonry support. In fact, delamination tests performed on fiber-reinforced masonry walls and/or masonry units, such as bricks or stones, have highlighted the frequency of occurrence of a failure mode for loss of adhesion between matrix and reinforcing element. Fiber detachment from adhesive (*debonding*) is undesirable as well as the separation of the composite material from the substrate surface (*peeling*, typical of FRP systems), because both failure modes occurring at layers interfaces prevent reinforcement material from working at its full tensile performances.

In such context, the choice of using long natural fibers (*NF*) replacing the artificial synthetic ones commonly used in the field of composite structural reinforcement is an absolute innovation. These are materials with low mechanical and elastic characteristics but quite comparable to glass fibers with medium performances. The aim of the experimental work was to investigate, firstly, the compatibility of these fibers with a cement matrix specific for external strengthening systems and, subsequently, to evaluate the effectiveness of the composite material obtained (NFRCM) when applied to

full brick masonry walls subjected to in-plane shear actions.

More specifically, after an initial tensile characterization phase of the strips, coupled with an experimental campaign of *pull-out* tests on fiber-reinforced bricks, several diagonal compression tests on masonry samples with and without reinforcement were conducted, allowing the detection of the reinforcement effectiveness in terms of shear strength and stiffness. The composite material strips were applied on both regularized surfaces of masonry panels according to two different geometric reinforcement configurations: diagonally or as a squared grid. Adhesion tests and in-plane shear ones were repeated using a glass fiber fabric impregnated in the same matrix used for natural fibers, in order to perform a comparison with reinforcing materials commonly used in FRCM systems.

Moreover, a numerical modeling campaign was conducted together with the experimental one with the aim of providing numerical models capable of describing the experimental behavior exhibited by walls during laboratory tests. Masonry panels were discretized in the LMG90 code and composite strips were modeled as elastic wires taking into account only the fiber tensile failure mode with the hypothesis of perfect adhesion between reinforcement and masonry support. The software is well suited for modelling masonry structures as it is based on a distinct element method (DEM) adopting a fully implicit resolution algorithm (*Non Smooth Contact Dynamic method*). Specifically, it is used to model the global behavior of discrete systems by considering the dynamic behavior of components interacting with each other. The numerical analysis are in good agreement with experimental data, showing the validity of this first numerical modeling approach for the reinforced masonry.

Keywords: Masonry, Reinforcement, FRCM, Natural Fibers, Diagonal compression, Numerical Modeling.

Capitolo 1

Il rinforzo delle murature con i materiali compositi

1.1. Generalità

Gli edifici in muratura in Italia costituiscono un patrimonio edilizio che è rappresentato in larga parte da costruzioni di carattere storico monumentale degne di significativo interesse e che pertanto vanno conservate e preservate. Il problema della riabilitazione strutturale di edifici esistenti, infatti, riveste nel nostro Paese un ruolo di particolare importanza per la numerosità e la varietà delle strutture potenzialmente interessate.

Nell'ambito del rinforzo strutturale, gli interventi di consolidamento e di ripristino hanno avuto da sempre una grande importanza, poiché sono presidi di sicurezza grazie ai quali la struttura può continuare a vivere espletando le funzioni per cui era stata progettata. Già in epoca antica si provvedeva a contrastare l'azione delle forze mediante l'utilizzo di catene, chiavi e opere di cinturazione per gli elementi sottoposti a sovraccarichi, cedimenti o eventi naturali eccezionali, quali per esempio i terremoti. Questo campionario di rinforzi è tutt'oggi visibile e in funzione in molte costruzioni in muratura,

anche di epoca recente. Si tratta per lo più di dispositivi realizzati in ferro e fissati nelle strutture mediante malte o incastri meccanici (Fig. 1.1a). Interventi più recenti riguardano invece la realizzazione di collegamenti fra le pareti murarie mediante cordoli di incatenamento in c.a., allo scopo di sostenere lo scuotimento provocato dal sisma che tenderebbe altrimenti a ribaltarle o a farle scorrere fra di loro (Fig. 1.1b).



(a)



(b)

Figura 1.1 Esempi di rinforzo tradizionale:
(a) Tirante metallico; (b) Cordolo in c.a.

D'altra parte, proprio gli eventi sismici degli ultimi anni hanno portato ad avere minori certezze sulla reale efficacia di questi interventi di consolidamento che trasformano la fabbrica muraria in un ibrido a comportamento misto fra quello della muratura storica e quello degli elementi in c.a. o in acciaio ivi inseriti, con tutte le incoerenze, le incompatibilità e i maggiori pesi che ne conseguono.

La comprensione di queste problematiche sta portando, in particolare nella ricostruzione-consolidamento delle aree terremotate, a una nuova sensibilità e a una nuova cultura. Abbandonate le tecniche di consolidamento che tendono a trasformare un organismo murario in un edificio intelaiato in c.a. con tamponature in muratura, si privilegiano oggi soluzioni leggere ma resistenti e con funzioni dissipanti, che riescano quindi a coniugare la

richiesta di sicurezza con il rispetto delle autenticità del bene, evitando tecniche invasive, poco reversibili o che non diano garanzia di un buon funzionamento nel tempo (durabilità).

Nell'ambito delineato risulta particolarmente rilevante l'interesse suscitato dai materiali compositi fibrorinforzati a fibre lunghe continue, comunemente noti con l'acronimo inglese FRP (*Fiber Reinforced Polymer*). Essi consentono, infatti, di realizzare interventi efficaci, rapidi e poco invasivi, il più delle volte in armonia con i principi del restauro, non comportando perdita di autenticità dell'opera e non stravolgendone la concezione originale. Dai risultati di prove *in situ* e di sperimentazioni condotte in laboratorio, risulta accertato che gli FRP sono in grado di aumentare significativamente le caratteristiche prestazionali delle strutture, tanto da risultare particolarmente adeguati per il rinforzo sismico di elementi strutturali, soprattutto di conglomerato cementizio armato o di muratura. In altri termini, essi consentono di incrementare la duttilità di alcune membrature strategiche, al fine di conferire all'intera struttura una maggiore deformabilità e nel contempo di eliminare il pericolo derivante dalla formazione di meccanismi di collasso fragile [1]. I motivi che hanno reso possibile il successo nell'impiego di tali materiali sono contenuti nelle seguenti proprietà peculiari:

- Elevata elasticità e resistenza dei materiali impiegati;
- Notevole leggerezza, in grado di non alterare le masse sismiche in gioco;
- Sostanziale reversibilità delle applicazioni;
- Facilità e brevi tempi di installazione, anche in condizioni obiettivamente difficili.

Proprio la rapidità e semplicità delle operazioni di messa in opera rendono spesso tale tecnica vantaggiosa anche dal punto di vista economico,

nonostante il costo, ancora relativamente elevato ma in via di diminuzione, dei materiali.

A fronte di qualità strutturali certamente notevoli, si hanno tuttavia problematiche specifiche, non sempre evidenti, le quali, se non ben valutate, possono ridurre notevolmente o addirittura annullare i benefici degli interventi realizzati con questi materiali innovativi. Pertanto, risulta indispensabile per una corretta progettazione una adeguata conoscenza delle caratteristiche di base e delle peculiarità di tali materiali, unitamente a una approfondita comprensione del comportamento fisico-meccanico dell'elemento rinforzato. L'uso consapevole rappresenta la condizione necessaria per il successo di tali interventi di rinforzo e di restauro, permettendo un uso ottimale sia dal punto strutturale che economico.

I compositi proposti nel settore civile per il rinforzo strutturale sono disponibili in varie forme, dai laminati pultrusi prodotti mediante un processo industriale ai tessuti non impregnati che possono essere facilmente applicati a elementi di forma qualsiasi a cui sono resi aderenti attraverso l'applicazione di resine polimeriche.

Più specificamente, il presente capitolo riporta informazioni utili ed essenziali concernenti le proprietà fisiche e meccaniche di questi materiali, contenute in maniera chiara e descrittiva nell'unico riferimento normativo italiano CNR-DT 200/2004. L'intento è quello di fornire indicazioni più dettagliate sul tipo di composito in forma di nastri e tessuti con particolare riferimento agli interventi di placcaggio strutturale su strutture in muratura.

1.2. Istruzioni e Normativa

Dalla metà degli anni Novanta esistono, a livello internazionale, diverse istruzioni per l'utilizzo dei materiali compositi nelle costruzioni. Queste riguardano i rinforzi sia in forma di barre di armatura per il calcestruzzo, che in forma di rinforzi esterni da applicare alle strutture esistenti [2].

Fra le prime specifiche tecniche meritano di essere menzionate le istruzioni giapponesi (JSCE) [3], quelle americane (ACI 440) [4] e quelle europee (CEB-FIB) [5]. Tali raccomandazioni riguardano esclusivamente

strutture di c.a. e di c.a.p. che rappresentano la tipologia costruttiva più diffusa nei Paesi che le hanno rilasciate.

La possibilità di impiego degli FRP per interventi di tipo selettivo è stata consentita per la prima volta in Italia con l'emanazione dell'Ordinanza P.C.M. n. 3274 del 2003 [6], in cui l'utilizzo dei materiali compositi veniva essenzialmente citato per il rinforzo a taglio di travi e pilastri di conglomerato cementizio armato e per il confinamento di questi ultimi. Si enfatizzava quindi la possibilità di conferire mediante i compositi una più elevata duttilità e una corretta gerarchia delle resistenze alle strutture. Ad ogni modo, anche nel nostro Paese veniva ufficialmente riconosciuta a questi materiali una vocazione specifica per il consolidamento strutturale, con l'attribuzione di una potenzialità industriale e commerciale di tutto rilievo [2].

La particolare situazione dell'Italia, dove il patrimonio edilizio esistente, ampiamente variegato, comprende anche strutture murarie di interesse storico, artistico e monumentale, ha indotto il Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) ad avviare un ampio progetto prenormativo avente per oggetto l'utilizzo degli FRP nel rinforzo strutturale delle varie tipologie costruttive di interesse per il Paese. Il primo risultato dell'attività intrapresa è rappresentata da un documento tecnico dal titolo: "Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati. Materiali, Strutture di c.a. e di c.a.p., Strutture murarie", contrassegnato dalla sigla "CNR-DT 200/2004".

Le Istruzioni del CNR sono oggi esplicitamente citate anche da diverse altre normative e istruzioni. La versione modificata n. 3431 del 2005 dell'Ordinanza P.C.M. succitata, rinvia al Documento quale possibile insieme coordinato di principi e regole applicative da utilizzare nel campo del rinforzo strutturale con FRP, rispettoso dei criteri di sicurezza alla base degli Eurocodici [7]. Specificatamente per il caso del rinforzo delle strutture storiche, il Documento viene richiamato anche nelle linee guida [8]. Più recentemente, il D.M. del 14/01/2008 [9] ha confermato la possibilità di utilizzare, per le costruzioni esistenti, materiali e prodotti non tradizionali, come gli FRP, purché nel rispetto di normative e documenti di comprovata validità, tra i quali figurano anche le Istruzioni del CNR [10].

Queste ultime, per loro genesi e natura, non sono quindi delle norme cogenti ma rappresentano esclusivamente un aiuto per i tecnici a filtrare con

discrezione la ponderosa bibliografia, nazionale e internazionale, che la letteratura specifica mette a disposizione, lasciando comunque a essi la responsabilità finale delle scelte operate. Un primo aspetto innovativo del Documento è riscontrabile nel capitolo dedicato ai Materiali. In esso è definito il formato di specifiche schede tecniche dei prodotti che gli stessi produttori dovrebbero fornire per consentire agli utilizzatori di entrare in possesso delle informazioni indispensabili per poter istituire i necessari confronti tra prodotti differenti disponibili sul mercato. Inoltre, sia nel capitolo dedicato ai Materiali che in quello dedicato ai Concetti basilari del progetto di rinforzo e problematiche speciali, è opportunamente introdotto il concetto di “sistema completo di rinforzo”. Tale aspetto costituisce una ulteriore peculiarità del CNR-DT 200/2004, dal momento che al successo di un intervento di rinforzo con FRP contribuiscono molteplici fattori, anche legati alla compatibilità dei singoli prodotti utilizzati tra loro e con lo specifico substrato strutturale al quale devono essere applicati (calcestruzzo, muratura, etc.). Ancora, oltre alle indicazioni su quali debbano essere gli obblighi e le responsabilità degli operatori nel settore, nelle Istruzioni sono puntualmente descritti metodi e regole pratiche da seguire per l’installazione di rinforzi di FRP, per il loro monitoraggio e il relativo controllo. La trattazione delle suddette problematiche risulta di prezioso ausilio nella pratica tecnica supportando progettisti, direttori dei lavori e stazioni appaltanti in delicate valutazioni connesse all’uso degli FRP nel placcaggio strutturale.

Le Istruzioni CNR, dopo circa cinque anni dall’approvazione della prima versione, sono state oggetto di approfondite riflessioni da parte della comunità scientifica nazionale. La commissione di studio del CNR per la predisposizione e l’analisi di norme tecniche alle costruzioni si è avvalsa dell’originario Gruppo di studio e dei risultati delle più recenti ricerche internazionali, sia teoriche che sperimentali, condotte nell’ultimo quinquennio. In particolare di quelle sviluppate nell’ambito del progetto di ricerca ReLUIIS (2005-2008), la cui Linea 8 è stata dedicata allo specifico argomento dal titolo “Materiali innovativi per la riduzione della vulnerabilità nelle strutture esistenti”, quindi al tema degli interventi di riabilitazione strutturale con materiali FRP.

1.3. Tipologie di rinforzo di elementi murari con FRP

Un aspetto decisamente caratterizzante e peculiare del CNR-DT 200/2004, è l'aver trattato, in forma organica, i principali interventi con FRP su strutture murarie, comprendendo sia quelli su pannelli che quelli su strutture curve a semplice e doppia curvatura.

Con specifico riferimento quindi alle strutture in muratura, possono citarsi i seguenti interventi tipici di rinforzo con materiali compositi (Fig. 1.2):

- a) Rinforzo di archi e volte, in particolare in presenza di azioni sismiche, carichi verticali concentrati o disposti in modo non simmetrico;
- b) Rinforzo di pannelli murari per le sollecitazioni derivanti da azioni sismiche nel piano e fuori dal piano;
- c) Rinforzo a compressione per confinamento di colonne murarie;
- d) Realizzazione di cinturazioni di piano;
- e) Realizzazione di collegamento tra i paramenti di murature a sacco;
- f) Realizzazione o miglioramento del collegamento tra pannelli di muratura ortogonali.

Nei casi a), b), c) e d) il rinforzo consiste, in genere, nell'incollaggio di un prodotto mono o bidimensionale di materiale composito sulla superficie dell'elemento da rinforzare; nei casi e) ed f) è invece più frequente l'utilizzo di barre.

In riferimento proprio agli interventi che prevedono l'uso di barre in materiale composito, spesso si assiste a una ripetizione di metodologie e tecniche di rinforzo con l'acciaio nel beton plaquè, al posto delle barre di acciaio come armature nel c.a. o come armature dei perfori nelle murature, etc. Innovative e di grande efficacia sono, invece, le cinturazioni, che, con finalità e meccanismi di funzionamento diversi, possono trovare importanti applicazioni sia a singoli elementi strutturali (pilastri, maschi murari) che a

interi edifici o complessi di edifici, raggiungendo gli obiettivi di rafforzare i meccanismi resistenti dei vari elementi e di contenerne le deformazioni, con interventi leggeri e di rapida esecuzione. Innovativo, anche nelle finalità, è il placcaggio di archi e volte, soprattutto quando inteso come elemento di presidio (con i vantaggi della leggerezza e della reversibilità) capace di intervenire sui possibili meccanismi di collasso di queste strutture.

In ogni caso, per quanto riguarda le applicazioni agli edifici in muratura, tenendo conto delle intrinseche carenze di resistenza a trazione di questo materiale, ne deriva che il naturale utilizzo dei materiali FRP è quello di rispondere proprio a questa carenza di resistenza a trazione, disponendo le fibre orientate in modo da assorbire tali tensioni.

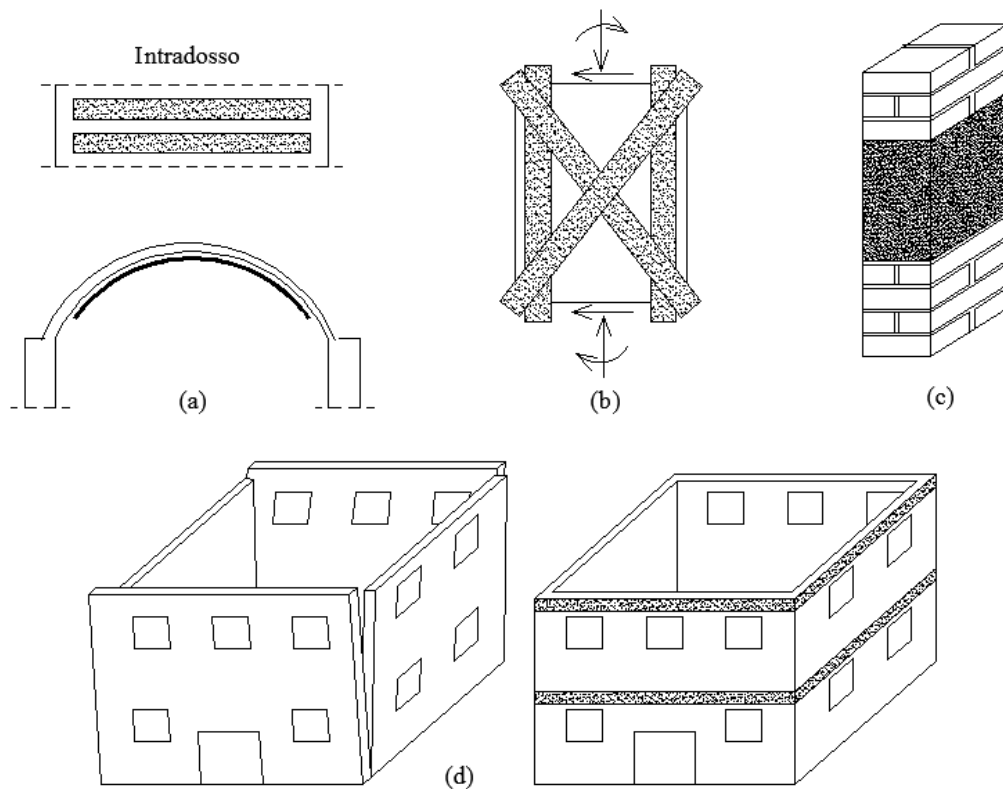


Figura 1.2 Rinforzi con FRP su strutture in muratura:
 (a) Rinforzo di volte; (b) Rinforzo di pannelli;
 (c) Confinamento di colonne; (d) Cinturazione

Nel presente lavoro di tesi viene analizzato il caso b) (Fig. 1.2b), soffermandosi, in particolare, sullo studio e l'analisi delle problematiche inerenti al rinforzo a taglio di pannelli murari sollecitati da azioni nel piano. Qui viene fornita una breve ma esaustiva descrizione dei materiali di rinforzo comunemente utilizzati.

1.4. Materiali di rinforzo

I prodotti di materiale composito normalmente impiegati per il rinforzo delle strutture sono costituiti da *fibre* lunghe, vale a dire che esse si estendono per tutta la lunghezza del manufatto, immerse in una fase continua, detta *matrice*.

Le fibre sono dotate di elevate resistenza a trazione e rigidità assiale e costituiscono l'effettivo rinforzo degli elementi strutturali. La matrice deve invece garantire una uniforme distribuzione degli stati tensionali tra le singole fibre; in molti casi funge anche da legante con il supporto (superficie dell'elemento strutturale da rinforzare) e le fibre, garantendo il trasferimento degli stati tensionali (aderenza). Inoltre, la matrice stessa ha una funzione di protezione di queste ultime dall'usura, nonché quella di assicurare un loro buon allineamento.

Le fibre sono, in genere, di carbonio, di vetro o aramidiche, anche se esistono prodotti realizzati con altri tipi di fibre (PVA, PBO). La matrice è normalmente costituita da resine di tipo termoindurente, frequentemente epossidica o al poliestere.

Una schematica classificazione dei prodotti fibrosi utilizzati per il rinforzo delle strutture, basata sulla morfologia, è riportata di seguito (Fig. 1.3) [2]:

NASTRI O FOGLI	Prodotti costituiti da sole fibre parallele, di spessore generalmente inferiore a 1 mm, con piccolissima rigidità flessionale; i nastri si applicano impregnandoli con la matrice all'atto dell'incollaggio sulla struttura da rinforzare; la matrice (in genere resina epossidica) ha quindi
----------------	---

anche la funzione di rendere aderente il rinforzo alla struttura.

TESSUTI

Prodotti costituiti da sole fibre (senza matrice) disposte in diverse direzioni (almeno due tra loro ortogonali, trama e ordito), di spessore generalmente inferiore a 1 mm, con piccolissima rigidità flessionale; anche i tessuti si applicano impregnandoli con la matrice all'atto dell'incollaggio sulla struttura da rinforzare; la matrice (in genere resina epossidica) ha quindi anche la funzione di rendere aderente il rinforzo alla struttura.

RETI DI FIBRE

Prodotti costituiti da sole fibre raccolte in piccoli mazzi e disposti in modo da formare una rete a maglia quadrata o rettangolare (di dimensioni generalmente poco superiori al centimetro), di spessore inferiore a 1 mm, con piccolissima rigidità flessionale; le reti sono impregnate con la matrice all'atto dell'incollaggio della struttura da rinforzare; la matrice (in genere resina epossidica, ma anche malta a base cementizia) ha quindi anche la funzione di rendere aderente il rinforzo alla struttura.

LAMINE O LAMELLE

Prodotti costituiti da fibre parallele e matrice, generalmente ottenuti per pultrusione¹, di spessore superiore a 1 mm, dotate di una certa rigidità flessionale; le lamelle vengono di

¹ La pultrusione è un processo produttivo automatizzato e continuo che permette di ottenere profili di composito a sezione costante. Strati continui di fibra vengono fatti passare attraverso un bagno di resina liquida in uno stampo metallico a temperatura controllata, usando un apposito macchinario che “tira” il materiale composito.

solito incollate alla struttura da rinforzare mediante resina epossidica.

Si osserva che nel caso di nastri, tessuti e reti, il materiale composito (inteso come accoppiamento di fibre e matrice) è realizzato *in situ*, all'atto dell'incollaggio sulla struttura; mentre nel caso delle lamine il rinforzo che viene incollato sulla struttura è già un composito.

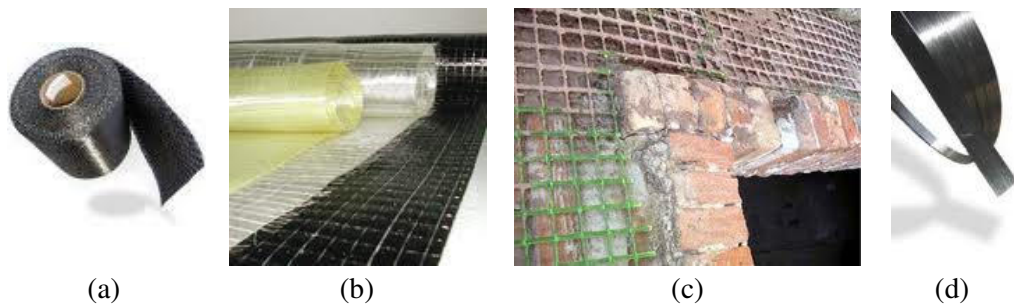


Figura 1.3 Vari tipi di prodotti in FRP:
(a) Nastri; (b) Tessuti; (c) Reti; (d) Lamine

Esistono poi, come già accennato, barre di materiale composito (prodotte per pultrusione) che possono essere utilizzate come armature per il calcestruzzo, anche se in Italia questo utilizzo è ancora poco diffuso. Per questo tipo di applicazione è possibile fare riferimento alle Istruzioni tecniche CNR-DT 203/2006 [11]. Nel rinforzo delle murature, le barre possono essere vantaggiosamente utilizzate per la realizzazione di connettori che aumentano la collaborazione tra i nastri, i tessuti e le reti, e la struttura da rinforzare, o come elementi trasversali di collegamento, ad esempio nel caso di murature a più paramenti o per il confinamento di colonne con sezione rettangolare avente una dimensione nettamente prevalente sull'altra (rapporto tra i lati superiore a due).

Si può osservare come gli FRP a fibre lunghe rappresentino un elemento di sostanziale innovazione ed evoluzione nei materiali strutturali, a differenza dei compositi a fibra corta dove, sostanzialmente, l'obiettivo è quello di conseguire un miglioramento nelle prestazioni e nelle caratteristiche di materiali già esistenti.

I nastri, i tessuti e le reti, grazie alla modestissima rigidità flessionale, si prestano bene a essere applicati anche su superfici con piccoli raggi di curvatura, mentre le lamine sono di più agevole applicazione se la superficie è molto regolare.

Alla base delle applicazioni degli FRP con qualunque tipo di struttura sta di fatto che questi materiali, in particolare i compositi a fibre lunghe, lavorano molto bene a trazione, con elevate resistenza e rigidità esclusivamente in direzione delle fibre, mentre, in genere, non possono lavorare a compressione (almeno i tessuti), a trazione in direzione ortogonale alle fibre e a taglio. È pertanto di interesse tecnico il legame costitutivo a trazione che è, in ottima approssimazione, elastico lineare fino a rottura.

Meccanicamente quindi un rinforzo di materiale composito è caratterizzato da due delle seguenti quantità:

ϵ_{fu} = dilatazione di rottura;

f_{fu} = resistenza a trazione;

E_f = modulo elastico a trazione in direzione delle fibre.

Questi parametri meccanici sono riferiti a una sezione nominale o, equivalentemente (pensando a una larghezza unitaria), a uno spessore nominale, talvolta denominato *spessore di calcolo*.

Nel caso dei prodotti impregnati *in situ* (nastri, tessuti, reti), lo spessore nominale è relativo alle sole fibre presenti in una certa direzione e si determina con la relazione:

$$t_f = \frac{p_f}{\gamma_{fibre}},$$

in cui p_f è il peso di fibre in una certa direzione per unità di superficie di rinforzo e γ_{fibre} è il peso specifico delle fibre.

Un tessuto con fibre disposte secondo due direzioni ortogonali x e y (tessuto bidirezionale), avrà spessori nominali relativi alle due direzioni. Nel

caso di compositi preformati (lamine pultruse), lo spessore nominale, invece, è lo spessore del prodotto, e quindi comprende le fibre e la matrice. Detto spessore deve essere fornito dal produttore.

Si riportano di seguito informazioni più dettagliate sui tipi di fibra maggiormente impiegati nel rinforzo strutturale con FRP e sulle caratteristiche delle matrici nelle quali le fibre vengono immerse *in situ* o durante il processo di pultrusione.

1.4.1. Fibre dei compositi FRP

Le fibre sono commercialmente disponibili nelle seguenti forme di assemblaggio di filamenti elementari (Fig. 1.4):

- Cavo di filatura (*tow*): è il prodotto della macchina di filatura ed è costituito da un fascio formato da un gran numero di filamenti, senza torsione, destinato a essere filato, ritorto o strappato per l'utilizzazione sotto forma di fibra discontinua;
- Filo o filato (*spun yarn*): filo formato da fibre tenute insieme da torsione;
- Filo assemblato (*roving*): fascio costituito da filati assemblati parallelamente e senza torsione intenzionale.

Combinando insieme alcune centinaia di *tows* o *yarns* si ottiene il *tape*, in cui i *tows* o gli *yarns* possono essere semplicemente affiancati oppure cuciti tra loro o fissati su un supporto.

La classificazione delle fibre è analoga a quella tradizionalmente utilizzata per le fibre tessili. I filamenti costituenti i filati sono caratterizzati essenzialmente dalla composizione chimica e dalla massa per unità di lunghezza. L'unità di misura della massa lineare o titolo è il Tex, equivalente a 1 g per km di fibra. Per determinare o verificare il titolo di un filato se ne preleva dal tessuto un campione di lunghezza definita e se ne effettua la pesatura; il valore del titolo è dato dal seguente rapporto:

$$T_x = \frac{P \cdot 1000}{L},$$

essendo T_x il titolo del filato, espresso in Tex [g/km]; P la massa del campione, espresso in grammi; L la lunghezza del campione, espressa in metri. L'area A , in mm^2 , della sezione trasversale di un filo o di una matassa (*yarn*, *tow* o *roving*), è determinabile a partire dal titolo e dalla densità del filato mediante la seguente relazione:

$$A = \frac{T_x}{\rho \cdot 1000} \quad [1.1]$$

essendo ρ la densità di massa del filato, espressa in g/cm^3 , e T_x il titolo, espresso in Tex. La valutazione di dette quantità può essere utile per un controllo di qualità del prodotto fornito.

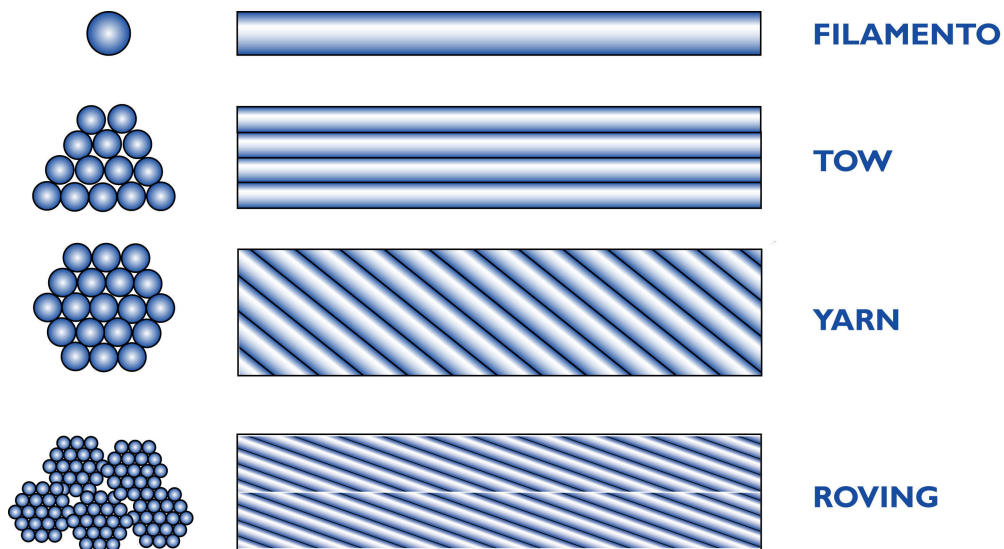


Figura 1.4 Tipologie di fibre

1.4.1.1. Fibre di vetro

Il componente fondamentale del vetro è la silice (SiO_2) in struttura tetraedrica (SiO_4). Altri componenti sono generalmente i silicati di sodio, di potassio, di calcio, nonché l'anidride borica e l'anidride fosforica, oltre agli ossidi di alluminio e ad altri ioni metallici. Queste sostanze aggiuntive hanno lo scopo di facilitare le operazioni di lavorazione o di modificare alcune proprietà meccaniche del prodotto finito.

Le fibre di vetro prodotte nella forma standard presentano la sigla E, mentre con la sigla S vengono denominate le fibre che esibiscono una resistenza a trazione più elevata (circa il 33% più grande rispetto al tipo E).

In Tabella 1.1, tratta dalle istruzioni CNR [10], si riporta la composizione tipica del vetro impiegato per la fabbricazione delle fibre.

Tabella 1.1 Composizione tipica delle fibre di vetro (% in peso)

	VETRO E	VETRO S
Ossido di silicio	54.3	64.20
Ossido di alluminio	15.2	24.80
Ossido di ferro	-	0.21
Ossido di calcio	17.2	0.01
Ossido di magnesio	4.7	10.27
Ossido di sodio	0.6	0.27
Ossido di boro	8.0	0.01
Ossido di bario	-	0.20
Varie	-	0.03

Alcuni tra i vantaggi derivanti dall'impiego delle fibre di vetro sono la buona stabilità dimensionale, l'alta resistenza al calore, il basso assorbimento di umidità, le notevoli proprietà elettriche e l'alta resistenza alla fiamma. A parità di peso, inoltre, la fibra di vetro è due volte più resistente di un filo di acciaio.

La tecnologia di produzione è basata sulla filatura di una miscela costituita principalmente da sabbia, allumina e calcare. I componenti sono miscelati a secco e portati a fusione in una fornace a refrattari. Il vetro fuso viene alimentato direttamente su filiere di platino e fatto passare per gravità attraverso appositi fori praticati sul fondo. I filamenti, prodotti per filatura da

fuso, sono quindi raggruppati, con l'imposizione eventuale di una leggera torsione, a formare una treccia o fibra, tipicamente costituita da 204 filamenti. I singoli filamenti presentano un diametro medio dell'ordine dei 10 μm e sono ricoperti da un legante o bozzima. I filati sono raccolti, perlopiù senza ritorcitura, in *roving*. I valori della massa lineare tipici del *roving* per applicazioni nel settore civile sono superiori a 2000 Tex. I filamenti possono anche essere raccolti in fogli sottili, detti *mat*, in forma continua o discontinua con disposizione casuale delle fibre tenute insieme da un legante chimico.

Le fibre di vetro presentano un modulo di elasticità normale inferiore a quello delle fibre di carbonio o a quello delle fibre aramidiche (da 72 a 85 GPa) ed esibiscono una resistenza all'abrasione relativamente modesta, che richiede una certa attenzione nelle operazioni di manipolazione prima dell'impregnazione. Inoltre, esse presentano una pronunciata attitudine allo scorrimento viscoso e una modesta resistenza a fatica.

La designazione tecnica delle fibre di vetro viene effettuata secondo le norme ISO 1139:1973 (E) e ISO 2078:1993 (E) e consta dei seguenti elementi:

- una lettera che identifica il tipo di vetro utilizzato;
- una seconda lettera che indica il tipo di fibra: C sta per "Continuo" e D per "Discontinuo";
- un numero che indica il diametro nominale (in μm) del filamento;
- un numero, separato da uno spazio, che indica la massa lineare della fibra in Tex;
- il senso e il valore di torsione, espresso in giri/m (opzionale). Il senso è indicato con le lettere Z o S, a indicare, rispettivamente, la torsione positiva e quella negativa;
- il numero di fili costituenti i ritorti (opzionale);

- un codice del produttore contenente tutte quelle ulteriori informazioni ritenute indispensabili per caratterizzare il prodotto (opzionale).

Un esempio di designazione è il seguente: EC9 34 Z 40. Si tratta dunque di una treccia o fibra costituita da filamenti continui di vetro E, aventi un diametro di 9 μm con massa lineare totale della fibra pari a 34 Tex, ritorta con torsione positiva a 40 giri/m. Se si considera che il peso specifico del vetro E è pari a 2,6 g/cm^3 si può facilmente ricavare dalla [1.1], considerando che l'area A è uguale al prodotto della sezione circolare del singolo filamento per il numero di filamenti incognito, che quest'ultimo è pari a 204, il valore tipico accennato in precedenza.

Spesso le trecce vengono unite in numero di 2 o 4 a formare dei filati (*yarns*) tramite ulteriore ritorcitura di solito in senso opposto a quello usato per formare la treccia. Se ad esempio ci si trova davanti a una designazione del tipo: EC9 34 Z 160 x 4 S 150, vuol dire che lo *yarn* è costituito da 4 trecce tipo EC9 34 Z 160, avvolte a torsione negativa (S) a 150 giri/m. Molto diffusi in ambito civile sono i filati corrispondenti alle sigle EC5 10 x 2 e SC5 4 x 2.

1.4.1.2. Fibre di carbonio

Per lungo tempo le fibre più usate in applicazioni strutturali con compositi sono state quelle di vetro. Sebbene abbiano buone caratteristiche di resistenza e bassa densità, presentano un modulo di elasticità relativamente basso. Per questo motivo, circa 25 anni fa, si iniziò a sperimentare convertendo compositi organici in fibre e tessuti di carbonio e grafite.

Le fibre di carbonio, infatti, si distinguono per l'alto modulo di elasticità normale e l'elevata resistenza. Sottoposte a prove di trazione, esibiscono un comportamento meccanico pressoché lineare fino alla rottura che si presenta di tipo fragile con valori modesti dell'energia assorbita. A confronto con le fibre di vetro e con quelle aramidiche, le fibre di carbonio risultano essere meno sensibili ai fenomeni di scorrimento viscoso (*creep*) e di fatica e sono contraddistinte da una modesta riduzione della resistenza a lungo termine.

Industrialmente le fibre di carbonio vengono prodotte per lavorazioni ad alta temperatura di particolari polimeri detti "precursori". Il precursore attualmente più utilizzato è il *poliacrilonitrile* (PAN), impiegato sia in campo

tessile (i ben noti tessuti “acrilici” sono in larga parte costituiti da copolimeri PAN) che in edilizia (molte delle fibre polimeriche usate per prevenire le fessure da ritiro plastico nelle malte e nei calcestruzzi sono in poliacrilonitrile). Fibre di qualità inferiore possono essere prodotte utilizzando *pece* o *rayon* quali precursori in sostituzione del PAN.

La produzione delle fibre di carbonio, a partire dal poliacrilonitrile, viene effettuata attraverso un processo industriale che prevede in un primo stadio il riscaldamento delle fibre alla temperatura di circa 300 °C in presenza di aria, con il risultato di ottenere l'ossidazione e la rottura di molti legami idrogeno instauratisi tra le lunghe catene polimeriche. Durante il trattamento termico la struttura molecolare delle fibre di PAN subisce un'orientazione preferenziale nella direzione del carico applicato. Il prodotto dell'ossidazione viene quindi posto in una fornace e riscaldato a circa 2000 °C in atmosfera di gas inerte (trattamento di carbonizzazione), ottenendosi in tal modo un cambiamento radicale della struttura molecolare con formazione di grafite. Effettuando il processo di riscaldamento nelle corrette condizioni richieste, si ha la condensazione delle catene polimeriche con produzione di ristretti fogli di grafene che infine si fondono generando un singolo filamento.

La struttura cristallina della grafite è di tipo esagonale e piana. Com'è noto, questo aspetto la differenzia dal diamante, l'altra forma cristallina in cui può trovarsi in natura il carbonio, che presenta una cella cristallina elementare tetraedrica e spaziale. Ne consegue che, mentre il diamante ha un comportamento essenzialmente isotropo, ossia con caratteristiche meccaniche identiche in tutte le direzioni, la grafite, al contrario, ha un comportamento fortemente anisotropo, ossia esibisce una grande resistenza meccanica (soprattutto a trazione) nel piano in cui si sviluppano i cristalli, mentre risulta estremamente debole se sottoposta a trazione in direzione ortogonale a tale piano. Gli atomi di carbonio organizzati nella grafite in strutture essenzialmente planari, infatti, sono tenuti insieme da forze trasversali di interazione del tipo Van der Waals, di gran lunga più deboli rispetto a quelle che agiscono tra gli atomi di carbonio nel piano (legami covalenti). Per tale motivo il loro modulo di elasticità normale e la loro resistenza sono estremamente elevati nelle direzioni contenute nei suddetti piani, mentre risultano notevolmente inferiori nella direzione trasversale.

La struttura delle fibre di carbonio non è completamente cristallina come quella della grafite. Il termine “fibre di grafite” viene tuttavia utilizzato nel linguaggio comune, anche se in modo improprio, per indicare fibre con un contenuto di carbonio maggiore del 99%. Il termine “fibre di carbonio” indica, invece, fibre con contenuto variabile tra l’80 e il 95%. Il numero di filamenti contenuti nel cavo di filatura (*tow*) può variare tra 400 e 160000.

Le fibre di carbonio commercialmente disponibili sono caratterizzate, al variare dei parametri utilizzati durante il processo di produzione, da una struttura chimica che varia da quella del carbonio allo stato amorfo a quella della grafite cristallina. In dipendenza di ciò, variano anche le caratteristiche fisico-meccaniche delle fibre. Ad esempio, il modulo di elasticità normale può variare tra 35 GPa e 700 GPa. Più alto è il modulo più pregiate e costose sono le fibre di carbonio. Normalmente la resistenza meccanica a trazione e la deformazione ultima non crescono in maniera proporzionale all’aumentare del modulo elastico, anzi, dopo un certo valore della rigidità (tra 210 e 250 GPa), tendono a diminuire al crescere del modulo di Young delle fibre.

In dipendenza delle caratteristiche meccaniche delle fibre, queste vengono designate nella pratica tecnica come *Carbonio ad Alta Resistenza*, *Carbonio ad Alto Modulo* e *Carbonio ad Altissimo Modulo*.

Il parametro che differenzia più marcatamente le fibre di carbonio da un materiale tradizionale come l’acciaio, è la cosiddetta resistenza specifica, ossia il rapporto tra la resistenza meccanica a trazione e il peso specifico, che nelle prime risulta da 10 a 40 volte maggiore rispetto al secondo. Questa caratteristica rende i compositi in fibra di carbonio particolarmente utili in settori come quello civile in cui la leggerezza è un parametro fondamentale per facilitare e quindi economizzare il trasporto e la movimentazione dei sistemi di rinforzo, nonché per limitare la massa aggiunta alla struttura originaria ai fini della riduzione degli effetti dovuti alle azioni sismiche.

Per quanto concerne le forme di commercializzazione delle fibre di carbonio, si è soliti classificare i filati in termini di “k” dove il simbolo k sta per “migliaia”: ad esempio un filato da 1k sarà costituito da 1000 filamenti (tenendo conto della densità e del diametro del filamento elementare, si giunge al titolo di 66,6 Tex). Valori tipici sono: 0,5k, 1k, 3k, 6k, 12k, 18k, 24k, 48k. Oltre che nella forma di *yarn* o di *roving*, le fibre sono anche disponibili in composizione opportunamente arrangiate in modo da formare

una grande varietà di tessuti (*fabric*) (Fig. 1.5). In tal caso la disposizione delle fibre può essere tale da conferire ai corrispondenti compositi delle caratteristiche di quasi isotropia nel piano. Nei tessuti si distingue una direzione principale, detta ordito (*warp*), e una trasversale alla prima, detta trama (*weft*).

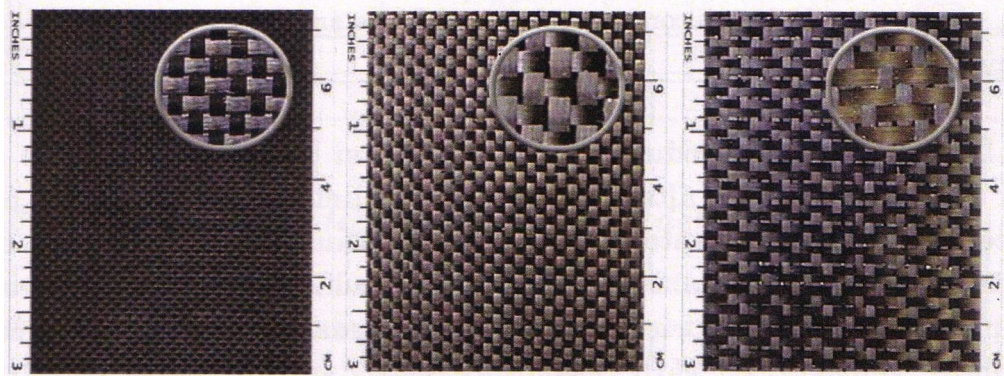


Figura 1.5 Esempi di tessuti in fibra di carbonio

1.4.1.3. Fibre aramidiche

Le fibre aramidiche sono fibre di natura organica, costituite da poliammidi aromatiche ad altissimo grado di orientazione.

Le prime fibre prodotte risalgono agli anni '60 e sono state commercializzate con la denominazione di *Nomex*. Questo polimero presenta un modulo elastico relativamente basso ma le sue caratteristiche meccaniche si mantengono costanti anche a temperature elevate. Le fibre, infatti, vengono ottenute direttamente in forma fibrosa da un processo di polimerizzazione in quanto non possono essere trattate termicamente (a temperature superiori ai 400 °C il polimero degrada prima di fondere).

Nel 1971, nei laboratori *Dupont*, gli stessi studiosi che avevano inventato il *Nomex* hanno messo a punto e brevettato un processo per ottenere fibre aramidiche caratterizzate da prestazioni meccaniche decisamente superiori e confrontabili con quelle di alcuni tipi di fibre in carbonio. Il materiale ottenuto è stato commercializzato con il nome *Kevlar* e rappresenta la quasi totalità delle fibre oggi utilizzate nei compositi a base aramidica. La novità del brevetto della *Dupont* per la produzione delle fibre di *kevlar*, non sta tanto

nella struttura molecolare del prodotto finale quanto nel processo produttivo messo a punto per consentire la lavorazione di una particolare sostanza aramidica, già nota e utilizzata da tempo, caratterizzata da struttura spiccatamente cristallina e, quindi, di notevoli prestazioni meccaniche. Si riuscì a dissolvere il polimero in un liquido polare con l'aiuto di semplice cloruro di sodio consentendo di inibire la formazione di forti catene idrogeno che lo rendevano insolubile. Il polimero così venne lavorato in modo da dare vita a un prodotto fibroso con elevate prestazioni meccaniche.

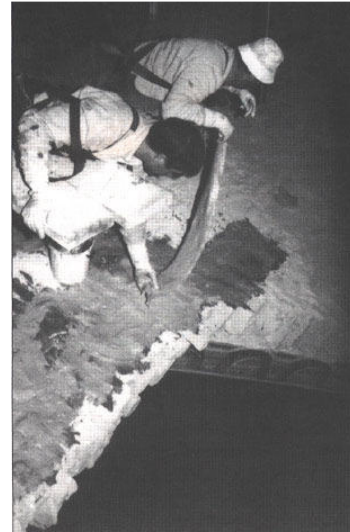
Il processo produttivo oggi si basa quindi sull'estrusione ad alta temperatura e alta velocità del polimero in soluzione con successivo raffreddamento veloce ed essiccamento; la sintesi del polimero viene effettuata a monte dell'apparecchiatura di estrusione con l'impiego di soluzioni fortemente acide. In alcuni casi, le fibre così prodotte vengono sottoposte a un trattamento di orientazione a caldo per avvolgimento su bobine rotanti a elevata velocità allo scopo di migliorarne le caratteristiche meccaniche.

Il modulo di elasticità normale e la resistenza a trazione sono intermedi tra quelli delle fibre di vetro e quelli delle fibre di carbonio (Fig. 1.7 e Fig. 1.8). La loro resistenza a compressione è di norma pari a 1/8 di quella a trazione. Il comportamento viscoso (*creep*) è simile a quello delle fibre di vetro, ma rispetto a queste ultime la resistenza a rottura è più elevata e la deformazione a lungo termine (rilassamento) è più marcata e progressiva nel tempo. Anche la resistenza a fatica flessionale è più elevata di quella delle fibre di vetro.

Nel settore delle costruzioni civili, l'aramide non trova grande impiego nel restauro delle strutture in c.a. dove le fibre in carbonio provvedono, a parità di costi, un più alto modulo elastico e, quindi, maggiore capacità di assumere carichi a parità di deformazioni imposte alla struttura rinforzata. L'impiego delle fibre in aramide è per lo più indicato nel rinforzo di strutture in muratura dove un elevato modulo elastico non è necessario e, spesso, può costituire un problema (come l'insorgere di pericolose concentrazioni di tensioni in prossimità dei rinforzi). Un esempio interessante di utilizzo di fibre aramidiche nel restauro di strutture in muratura è quello che è stato effettuato negli interventi di messa in sicurezza e di ripristino delle volte della Basilica di S. Francesco di Assisi a seguito dei noti eventi sismici (Fig. 1.6).



(a)



(b)

Figura 1.6 Rinforzo delle volte nella Basilica di S. Francesco di Assisi:
(a) Nervature e (b) fasciature delle lesioni con materiali in fibra aramidica

1.4.2. Cenni sulle principali tipologie di matrici

Le matrici più utilizzate per la manifattura dei compositi fibrorinforzati sono costituite da resine polimeriche termoindurenti. Sono comunque disponibili in commercio materiali compositi fibrorinforzati con matrici termoplastiche.

Caratteristica delle prime è quella di essere disponibili in forma parzialmente polimerizzata presentandosi liquide o pastose a temperatura ambiente. Per miscelazione con un opportuno reagente, detto *hardener*, esse polimerizzano dando luogo a un materiale solido a struttura vetrosa (reticolazione). Tale caratteristica costituisce uno dei principali vantaggi delle resine termoindurenti, assieme a una bassa viscosità esibita allo stato fluido e quindi una maggiore facilità di impregnazione delle fibre, ottime proprietà adesive e buona resistenza agli agenti chimici. Di contro, i principali svantaggi sono rappresentati dall'ampiezza del campo di temperature di esercizio, limitato superiormente dalla temperatura di transizione vetrosa,

nonché dalla modesta tenacità a frattura e dalla sensibilità all'umidità in fase di applicazione sulla struttura.

Le resine termoplastiche, infatti, oltre a una migliore tenacità e a una buona resistenza nei confronti dei fattori ambientali, presentano la capacità di fluire se riscaldate oltre la temperatura di transizione vetrosa, permettendo la loro formazione a caldo senza subire alcun deterioramento delle proprietà meccaniche. Le resine termoindurenti, al contrario, si infragiliscono fino a distruggersi se esposte oltre tale temperatura, peraltro generalmente più bassa di quella caratteristica dei materiali termoplastici.

In ambito civile, comunque, l'elevata viscosità esibita non permette attualmente alle resine termoplastiche di essere impiegate come matrici per sistemi di rinforzo in accoppiamento con tessuti a causa delle difficoltà di impregnazione. Una loro promettente utilizzazione è quella relativa alla realizzazione di barre per il calcestruzzo armato.

Le resine termoindurenti più impiegate nel rinforzo strutturale sono quelle epossidiche, seguite, in ordine di diffusione, dalle resine poliestere e vinilestere. Queste ultime, rispetto alle prime, esibiscono una minore resistenza meccanica e inferiori qualità adesive. Inoltre, a differenza di quelle epossidiche, le resine poliestere si presentano come una sostanza solida a temperatura ambiente. Per poter essere impiegate devono quindi essere preliminarmente disciolte in un opportuno solvente che ne riduce la viscosità facilitando il processo di impregnazione delle fibre. Le resine vinilestere sono state sviluppate per impieghi a elevate temperature ed esibiscono caratteristiche prestazionali intermedie tra quelle delle resine epossidiche e quelle delle matrici poliestere.

1.4.3. Confronto tra le caratteristiche dei materiali di rinforzo

Ricapitolando, le principali caratteristiche meccaniche delle fibre per rinforzi con FRP sono: resistenza e modulo elastico a trazione elevati, basso rilassamento meccanico, stabilità chimico-fisica a temperatura ambiente; esse, inoltre, a differenza dell'acciaio non mostrano nessun fenomeno di snervamento, avendo un comportamento elastico fino a rottura (Fig. 1.7).

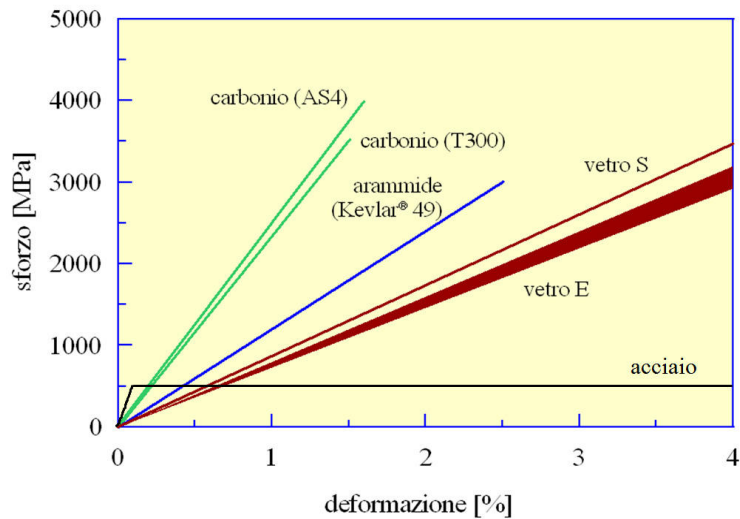


Figura 1.7 Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo FRP e l'acciaio da costruzione: comportamento a trazione monoassiale

In Figura 1.8 si riporta ancora un confronto tra le fibre comunemente utilizzate per interventi con compositi e l'acciaio da costruzione, rapportando le quantità considerate alla densità dei materiali.

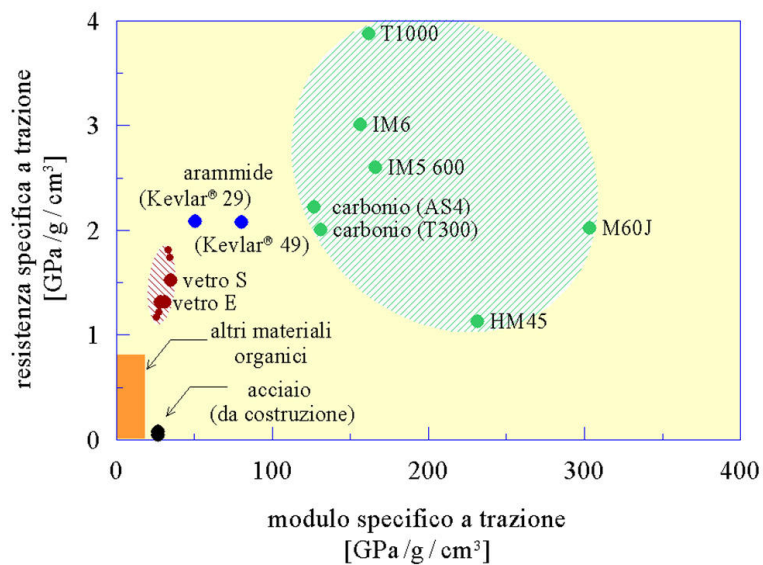


Figura 1.8 Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo FRP e l'acciaio da costruzione: valori "specifici" del modulo e della resistenza

Le fibre occupano una percentuale del volume del composito generalmente compresa tra il 50% e il 60%. Le principali proprietà di entrambi i materiali costituenti il composito (fibre e matrice) sono quantificabili attraverso i valori indicativi riportati in Tabella 1.2, contenente anche intervalli di valori riferiti alle proprietà dell'acciaio da costruzione.

Tabella 1.2 Confronto tra le proprietà delle fibre di rinforzo e delle matrici più comuni e dell'acciaio da costruzione

	Modulo elastico normale E	Resistenza a trazione σ_T	Deformaz. a rottura ϵ_T	Coeff. di dilatazione termica α	Densità ρ
	[GPa]	[MPa]	[%]	[$10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$]	[g/cm^3]
Fibre di vetro E	70 – 80	2000 – 3500	3.5 – 4.5	5 – 5.4	2.5 – 2.6
Fibre di vetro S	85 – 90	3500 – 4800	4.5 – 5.5	1.6 – 2.9	2.46 – 2.49
Fibre di carbonio (alto modulo)	390 – 760	2400 – 3400	0.5 – 0.8	-1.45	1.85 – 1.9
Fibre di carbonio (alta resistenza)	240 – 280	4100 – 5100	1.6 – 1.73	-0.6 – -0.9	1.75
Fibre aramidiche	62 – 180	3600 – 3800	1.9 – 5.5	-2	1.44 – 1.47
Matrice polimerica	2.7 – 3.6	40 – 82	1.4 – 5.2	30 – 54	1.10 – 1.25
Acciaio da costruzione	206	250 – 400 (snervamento) 350 – 600 (rottura)	20 – 30	10.4	7.8

Per indicare i diversi tipi di FRP si fa riferimento al tipo di fibra in essi contenuto. Comunemente la simbologia adottata è la seguente:

- GFRP: composito a base di fibre di vetro (Glass);
- CFRP: composito a base di fibre di carbonio (Carbon);
- AFRP: composito a base di fibre aramidiche (Aramid).

Vale la pena ricordare che, a causa della differenza tra le caratteristiche meccaniche delle due fasi del composito, un prodotto FRP ha sempre un comportamento meccanico anisotropo; in particolare, le proprietà meccaniche sono molto più elevate nella direzione delle fibre rispetto alla direzione ortogonale ad esse. Nel prossimo paragrafo vengono approfonditi più specificatamente gli aspetti peculiari dei compositi FRP prodotti nella forma di nastri e tessuti, trattandosi del tipo di rinforzo impiegato durante il lavoro sperimentale.

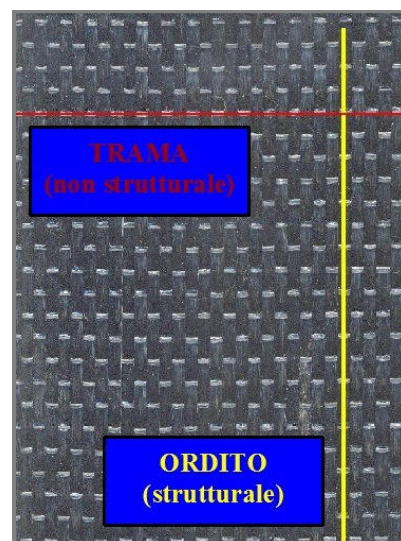
1.5. Nastri e tessuti non impregnati

Le fibre descritte nei paragrafi precedenti, che siano esse di carbonio, vetro o aramidiche, in genere trovano applicazione dopo essere state trasformate in tessuti. La tecnologia utilizzata poco si discosta da quella tessile per l'abbigliamento.

Il tessuto non impregnato di resina è comunemente contraddistinto dall'attributo "secco". I tessuti per il rinforzo strutturale sono comunemente distribuiti, infatti, allo stato secco, e in rotoli, da utilizzare per l'impregnazione in cantiere con apposite resine. La configurazione geometrica dei tessuti è di tre tipi:

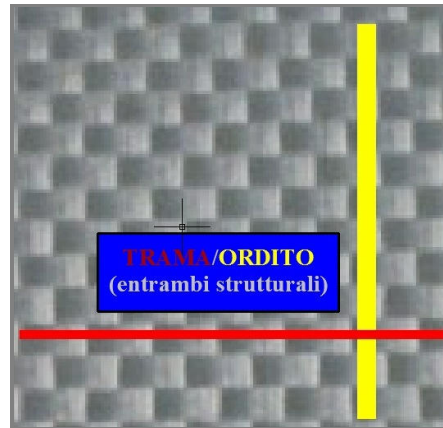
1. *Tessuti UNIDIREZIONALI:*

le fibre sono orientate tutte nella stessa direzione della lunghezza e sono tenute insieme da una trama leggera di tipo non strutturale. In questo caso il materiale si designa più correttamente con la denominazione di "nastro";



2. *Tessuti BIDIREZIONALI:*

le fibre sono orientate in due direzioni preferenziali a formare una tessitura trama-ordito ortogonale di solito bilanciata (stessa percentuale di fibre nelle due direzioni);

3. *Tessuti MULTIASSIALI:*

le fibre sono orientate in diverse direzioni del piano senza una direzione preferenziale.



Naturalmente i prodotti biassiali e multiassiali si prestano meglio alla riparazione di elementi con isostatiche di trazione curve o variabili. Essi sono da preferire rispetto all'applicazione multipla di tessuti monoassiali perché consentono di ridurre le fasi operative di lavorazione dovute a una eventuale sovrapposizione di più strati di con il fine di realizzare un rinforzo che funzioni in più direzioni.

Oltre alla disposizione delle fibre, i tessuti sono caratterizzati da alcuni parametri fisici e meccanici che è opportuno conoscere per poter progettare un rinforzo con FRP. Normalmente la scheda tecnica di un tessuto da impregnare in opera negli interventi di rinforzo strutturale dovrebbe contenere difatti le seguenti informazioni:

- p_f = peso per unità di superficie (grammatura) [g/m^2];
- T_f = titolo del filato (in una generica direzione) [$\text{Tex}=\text{g}/\text{km}$];

- N_f = numero di filati per unità di larghezza (in una generica direzione) [n°/cm];
- E = modulo elastico [MPa];
- f_{frp} = resistenza a trazione [MPa];
- ϵ_{frp} = allungamento a rottura [%];
- S_e = area resistente unitaria [mm²/m];
- ρ = peso specifico del materiale del tessuto [g/cm³].

In particolare, in riferimento all'area resistente unitaria di un tessuto, questa rappresenta la sezione complessiva delle fibre aventi una determinata direzione, riferita all'unità di larghezza. È un parametro che viene calcolato come segue:

$$S_e = \frac{P_f}{n \cdot \rho} \quad [1.2]$$

dove n è il numero di direzioni del tessuto (es. $n = 2$ per tessuti biassiali).

I parametri meccanici (resistenza meccanica a trazione, modulo elastico e allungamento a rottura) vengono determinati sottoponendo campioni del materiale a una prova di trazione diretta che, per l'assenza di un'adeguata normativa europea, viene condotta secondo le direttive della norma americana ASTM D3039 [12]. Tale norma richiede che le prove di trazione diretta vengano eseguite su una provetta di composito appositamente realizzata impregnando il tessuto con resina epossidica, in modo da distribuire gli sforzi in maniera sufficientemente omogenea su tutte le fibre. Generalmente alle estremità del campione vengono incollate, sempre con resina epossidica, delle placchette metalliche allo scopo di trasferire al composito lo sforzo trasmesso dalle ganasce (Fig. 1.9a, 1.9c).

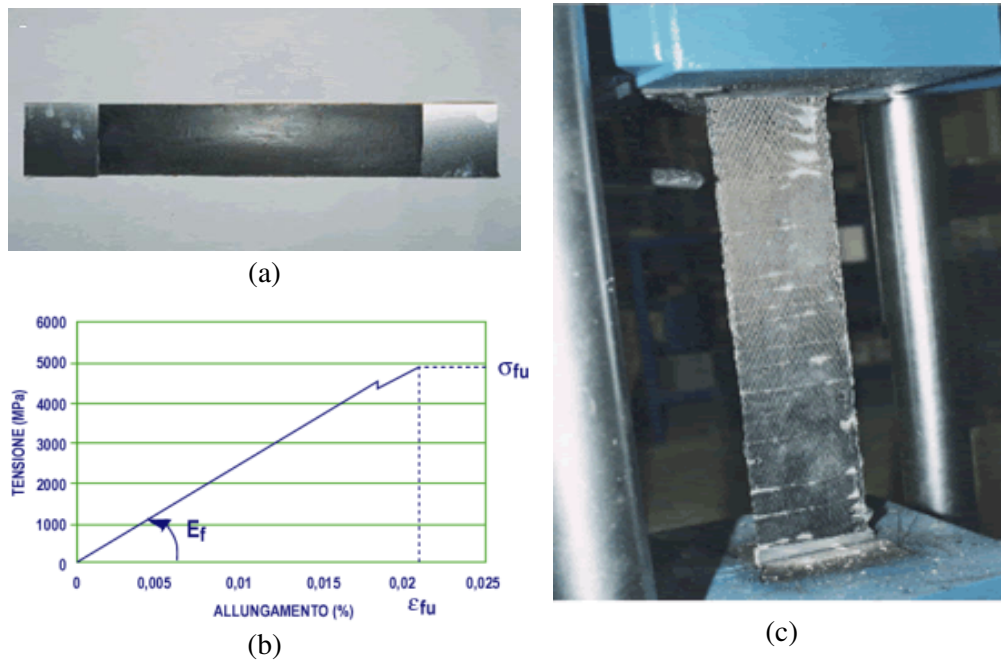


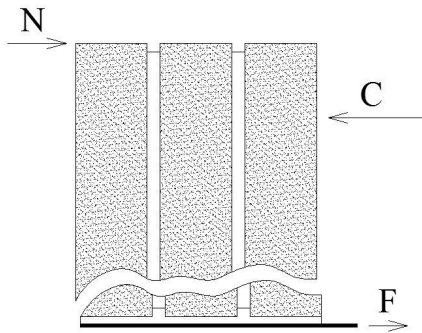
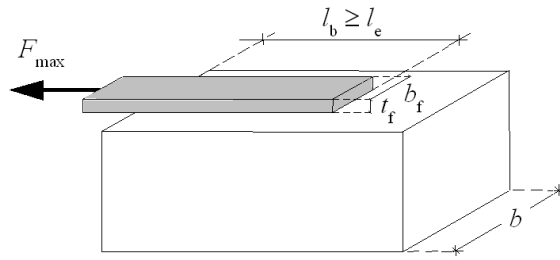
Figura 1.9 Prova di trazione su tessuto:

(a) Provino pronto per il test; (b) Diagramma σ - ϵ ; (c) Esecuzione della prova

La norma prescrive che la tensione di rottura e il modulo elastico del tessuto debbano riferirsi alla sola sezione trasversale delle fibre, trascurando quindi l'apporto irrigidente esercitato dalla resina. Ciò è dovuto al fatto che nelle condizioni di cantiere, è assolutamente impossibile determinare con sufficiente esattezza il quantitativo di resina impiegato per impregnare il tessuto.

1.6. Problemi di aderenza con il supporto murario

Il collasso di una struttura in muratura rinforzata con materiale composito può avvenire per raggiungimento di uno stato di crisi in uno dei due materiali (muratura o rinforzo), ovvero per raggiungimento di una crisi di interfaccia. Quest'ultima modalità di crisi è detta anche *delaminazione*.

**Figura 1.10***Crisi per delaminazione***Figura 1.11***Forza massima trasmissibile dal rinforzo*

È da precisare che il distacco del rinforzo dal supporto avviene molto raramente per rottura dell'adesivo sulla superficie di interfaccia; nella grande maggioranza dei casi, la superficie di distacco è approssimativamente parallela a quella di interfaccia ed è situata all'interno del supporto, a una distanza dall'interfaccia compresa tra qualche decimo di millimetro e qualche millimetro. Si tratta pertanto di una crisi del materiale di supporto (Fig. 1.10).

Si comprende quindi come sia indispensabile disporre di affidabili modelli meccanici relativamente al fenomeno dell'aderenza tra rinforzi e supporto e di affidabili valori delle caratteristiche meccaniche del materiale di supporto per prevedere i carichi che producono la delaminazione.

Le sperimentazioni più comuni condotte per valutare l'aderenza tra il rinforzo e il supporto sono eseguite su provini del tipo rappresentato in Figura 1.11. Queste prove sono condotte per valori del carico crescenti, fino alla delaminazione del rinforzo.

Le sperimentazioni relative all'aderenza con la muratura [13, 14, 15] indicano come il fenomeno sia qualitativamente simile a quello dell'aderenza rinforzo/calcestruzzo, a parte l'entità dei parametri meccanici in gioco (la presenza dei giunti, che certamente ha un certo effetto locale, sembra non avere apprezzabili effetti globali).

Così come per il calcestruzzo, infatti, anche per la muratura esiste una lunghezza limite l_e , detta *lunghezza ottimale di ancoraggio*, che assicura la trasmissione del massimo sforzo di aderenza (Fig. 1.11). Tale quantità può essere stimata mediante la seguente formula:

$$l_e = \frac{s_u}{k_b^2} \sqrt{\frac{\pi^2 E_f t_f}{8 \cdot \Gamma_F}},$$

dove E_f e t_f sono, rispettivamente, il modulo di elasticità normale nella direzione della forza e lo spessore del composito fibrorinforzato; s_u è il valore ultimo dello scorrimento tra FRP e supporto, che in assenza di dati sperimentali diretti può essere posto pari a 0.3 mm; k_b e Γ_F sono, nell'ordine, un coefficiente correttivo di tipo geometrico e il valore dell'energia specifica di frattura. Il coefficiente k_b può essere valutato come segue:

$$k_b = \sqrt{\frac{3 - b_f / b}{1 + b_f / b}} \quad [1.3]$$

con b e b_f , rispettivamente, le larghezze dell'elemento rinforzato e del rinforzo (Fig. 1.11). Nel caso di muratura regolare, il calcolo di b può essere determinato sommando la quantità b_f con la dimensione del blocco costituente il supporto nella direzione ortogonale all'asse del rinforzo (Fig. 1.12).

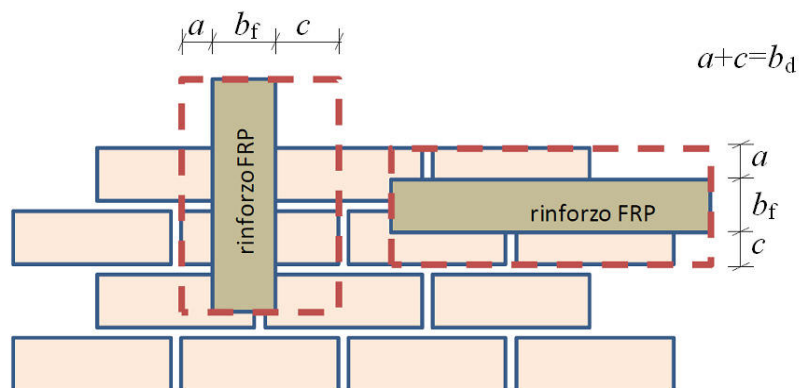


Figura 1.12 Diffusione delle tensioni di aderenza nel caso di murature regolari

L'energia specifica di frattura Γ_F è esprimibile, in funzione della tensione tangenziale limite per taglio puro, mediante la seguente espressione:

$$\Gamma_F = k_b k_G \tau_{b,\max} = k_b k_G \frac{f_{bm} \cdot f_{btm}}{f_{bm} + f_{btm}},$$

o, in alternativa:

$$\Gamma_F = k_b k_G \sqrt{f_{bm} \cdot f_{btm}},$$

dove f_{bm} e f_{btm} sono i valori medi delle resistenze, rispettivamente, a compressione e a trazione dei blocchi che costituiscono la muratura; in mancanza di dati sperimentali, la resistenza media a trazione dei blocchi può essere assunta pari a $0.10 f_{bm}$. La quantità k_G è un ulteriore coefficiente correttivo tarato sulla base di risultati di prove sperimentali, espresso in mm e dipendente dal tipo di muratura. Nel caso di rinforzi impregnati *in situ* e per murature in laterizio, vale:

$$k_G = 0.108 \text{ mm (in alternativa } k_G = 0.031 \text{ mm)}$$

in alternativa:

$$k_{G(\text{caso2})} = k_G \frac{\sqrt{\alpha}}{1 + \alpha} \quad \text{con } \alpha = \frac{f_{btm}}{f_{bm}}.$$

Nel caso in cui la rigidezza dell'elemento di muratura sia molto più grande di quella del rinforzo, la meccanica della frattura fornisce la seguente relazione per determinare la resistenza alla delaminazione F_{\max} , nel caso di ancoraggio superiore a l_e (Fig. 1.11):

$$F_{\max} = b_f \sqrt{2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_F}.$$

Le informazioni riportate nel presente paragrafo sono contenute nelle Istruzioni CNR [10]. In particolare, nella versione aggiornata del Documento sono state apportate delle modifiche proprio sulla valutazione delle quantità

sudette che concorrono a determinare la massima forza trasferibile per aderenza dal rinforzo.

1.7. Bibliografia

- [1] L. Ascione, A. Giordano, *Riabilitazione strutturale con materiali compositi fibrorinforzati. Interventi su edifici di conglomerato cementizio armato*, Polipress (2009).
- [2] F. Focacci, *Rinforzo delle murature con materiali compositi. Progettazione – Calcolo – Esempi applicativi*, Dario Flaccovio Editore (2008).
- [3] JSCE, 1997. *JSCE - Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials*, Japan Society of Civil Engineering.
- [4] ACI, 2000. *ACI Committee 440, Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars*, American Concrete Institute..
- [5] CEB - FIP, 2001. *FIP - CEB FIB Bulletin 14/2001, Externally bonded FRP reinforcement for RC structures*, Comité Euro-International du Béton – Fédération Internationale de la Précontrainte.
- [6] OPCM n. 3274 del 20/03/2003, *Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica*, (2003).
- [7] OPCM n. 3431 del 03/05/2005, *Ulteriori modifiche ed integrazioni all'ordinanza del presidente del Consiglio dei Ministri del 20/03/2003 recante "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica"*, (2005).
- [8] Dipartimento della Protezione Civile, Dipartimento per i beni culturali e paesaggistici, *Linee guida per l'applicazione al patrimonio culturale della normativa tecnica di cui all'Ordinanza P.C.M. 3274/2003*.

- [9] DM del 14/01/2008, Norme Tecniche per le Costruzioni, (2008).
- [10] CNR, 2004. *CNR-DT 200/2004, Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati – Materiali, Strutture di c.a. e di c.a.p., Strutture murarie*, Consiglio Nazionale delle Ricerche.
- [11] CNR, 2006. *CNR-DT 203/2006, Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Calcestruzzo armato con Barre di Materiale Composito Fibrorinforzato*, Consiglio Nazionale delle Ricerche.
- [12] ASTM, 1989. *ASTM D3039, Standard test method for tensile properties of fiber-resin composites*, American Society for Testing and Materials.
- [13] C. Carloni, K.V. Subramaniam, *Investigation of the Interface Fracture during Debonding between FRP and Masonry*, Advances in Structural Engineering (2007)
- [14] E. Cosenza, G. Manfredi, A. Occhiuzzi, M.R. Pecce, *Toward the investigation of the interface behaviour between tuff masonry and FRP fabrics*, Atti del convegno nazionale “Meccanica delle murature rinforzate con FRP”, Venezia (2000).
- [15] M.A. Aiello, S.M. Sciolti, *Bond Analysis of masonry structures strengthened with CFRP sheets*, Construction and Building Material, Elsevier, Vol. 20, pp. 90-100, (2006).

Capitolo 2

I compositi FRCM in fibre naturali per il rinforzo esterno delle murature

2.1. Introduzione

Negli ultimi decenni, come ampiamente discusso nel capitolo precedente, l'interesse della comunità scientifica e dell'ingegneria si è spostato dai materiali monolitici ai materiali polimerici fibrorinforzati. Tali materiali compositi dominano oggi il settore aerospaziale, quello automobilistico, l'industria sportiva, nonché il settore dell'edilizia. Le fibre di vetro sono le più utilizzate per rafforzare le materie plastiche grazie al loro basso costo (se paragonate alle fibre di carbonio o a quelle aramidiche) e alle loro buone proprietà meccaniche.

Tuttavia, queste fibre presentano gravi inconvenienti legati evidentemente all'inquinamento ambientale prodotto durante la loro lavorazione e alle energie necessarie allo smaltimento alla fine del loro ciclo di vita. Da diverso tempo, infatti, sono studiate e proposte diverse soluzioni

tecnologiche che prevedono l'uso di nuovi materiali che soddisfino i principali requisiti di sostenibilità e compatibilità ambientali.

In particolare, l'attenzione per l'ecologia ha fatto risvegliare, in questi ultimi anni, l'interesse verso le fibre naturali, ottenute dalla trasformazione di materie agricole rinnovabili, sostanzialmente derivate dai grandi cicli biologici alimentati dal sole. Il tema è di forte attualità se si pensa ad esempio al fatto che il 2009 è stato dichiarato dalla FAO "anno mondiale delle fibre naturali" allo scopo di riportare l'attenzione sulla produzione e sull'uso delle fibre tessili di origine vegetale e animale anche nei diversi settori dell'ingegneria. Le fibre naturali stanno emergendo, oltre che per essere realistiche alternative ecologicamente superiori alle fibre di vetro, anche per il loro basso costo e la loro leggerezza. In Tabella 2.1 [1] viene riportato un confronto tra le fibre naturali (*Natural Fibers – NF*) e quelle di vetro (*Glass Fibers – GF*), mostrando chiaramente le aree in cui le prime presentano interessanti vantaggi rispetto alle altre.

Tabella 2.1 Confronto tra le fibre naturali e le fibre di vetro

	Fibre naturali (<i>NF</i>)	Fibre di vetro (<i>GF</i>)
Densità	Bassa	Due volte quella delle <i>NF</i>
Costi	Bassi	Bassi, ma più alti delle <i>NF</i>
Rinnovabilità	Si	No
Riciclabilità	Si	No
Consumo di energia	Basso	Alto
Distribuzione	Ampia	Ampia
Emissioni di CO ₂	Neutrali	Non neutrali
Abrasioni alle macchine	No	Si
Rischio per la salute se inalate	No	Si
Smaltimento	Biodegradabili	Non biodegradabili

La neutralità all'anidride carbonica da parte delle fibre naturali è un aspetto particolarmente significativo nei confronti della riduzione dell'inquinamento. Difatti, la combustione di sostanze derivate da prodotti

fossili, quali quelle prodotte dalle fibre sintetiche, richiede notevoli quantità di energia e comporta emissioni di CO₂ nell'atmosfera; fenomeno, quest'ultimo, considerato come la principale causa dell'effetto serra e, per estensione, dei cambiamenti climatici nel mondo. I compositi in fibra naturale, inoltre, data la bassa densità del materiale di rinforzo, hanno un contenuto di fibre superiore per prestazioni equivalenti, riducendo così, qualora il composito fosse costituito da matrici tradizionali per FRP, i contenuti più inquinanti del polimero di base. Per avere poi un'idea sull'entità del risparmio che si avrebbe utilizzando un composito rinforzato con fibre naturali si consideri che le fibre di vetro utilizzate nei compositi hanno una densità di circa 2,6 g/cm³ e costi tra 0,90 e 1,50 €/kg; in confronto, le fibre di lino, ad esempio, hanno una densità di 1,5 g/cm³ e costi tra 0,15 e 0,80 €/kg) [2].

Attualmente, sono stati fatti tentativi di impiego di materiali compositi in fibra naturale al posto del vetro in applicazioni per lo più non strutturali. Un buon numero di componenti automobilistici, come i pannelli interni delle vetture, in precedenza realizzati con materiali compositi in fibra di vetro, vengono prodotti utilizzando materiali compositi ecocompatibili (*environmentally friendly composites*) (Fig. 2.1).

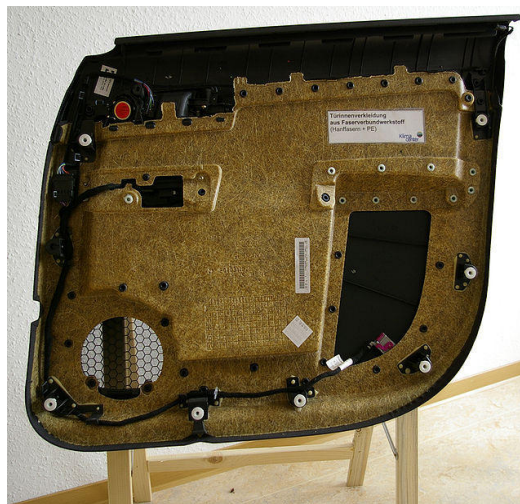


Figura 2.1 Pannello interno di un'automobile realizzato con un biocomposito in fibra di canapa e polietilene

Ma mentre nelle applicazioni industriali le fibre naturali sono già utilizzate in compositi plastici, le loro potenziali applicazioni strutturali nell'edilizia rappresentano al momento un motivo interessante di studio da parte di ricercatori e operatori del settore. Nella letteratura scientifica si possono già trovare numerosi lavori provenienti dalle comunità di ingegneria dei materiali e delle strutture in cui vengono analizzati differenti aspetti legati al possibile impiego delle fibre naturali nelle applicazioni strutturali (proprietà chimiche e meccaniche, problemi di adesione al supporto, compatibilità con le matrici, durabilità del materiale, etc.) [1, 3, 4].

In particolare, nelle recensioni disponibili è spesso trattata e analizzata la possibilità di utilizzare alcuni tipi di fibre naturali corte come rinforzo di matrici inorganiche, ovvero vengono proposte nuove tipologie di rinforzo costituite da laminati tessili rinforzati con fibre lunghe naturali, o ancora, viene valutata la condizione di sviluppo di un potenziale calcestruzzo rinforzato con tali fibre.

Da qualche anno è stata presa in considerazione l'idea di poter utilizzare le fibre naturali come componenti di materiali compositi per rinforzi da applicare esternamente alle murature [5]. Dal punto di vista strutturale, dato il basso modulo di Young delle fibre, l'uso di queste garantisce una buona compatibilità meccanica del sistema composito con gli elementi murari. Grazie infatti alle loro proprietà meccaniche (Tab. 2.2 [1]) le fibre naturali risultano particolarmente adatte a essere utilizzate in applicazioni di rinforzo di elementi in muratura (archi, volte, pannelli, etc.), che non richiedono comunque elevate prestazioni del materiale composito. Accade spesso che a ottime qualità dei materiali, infatti, non corrispondano necessariamente gli attesi benefici al comportamento meccanico della muratura rinforzata, ma anzi, le elevate prestazioni di resistenza del composito potrebbero provocare, ad esempio, improvvisi cedimenti locali causati da concentrazioni di tensioni.

Occorre enfatizzare che la scelta dei componenti specifici del sistema composito deve essere necessariamente guidata da criteri di sostenibilità. La ricerca e lo sviluppo di nuove tecnologie e materiali innovativi, sostenuti da studi di fattibilità che concretizzino i risultati ottenuti, devono incoraggiare la produzione attraverso la costruzione di adeguati impianti produttivi a livello locale. Tutto questo per offrire agli agricoltori una scelta sostenibile e ai

produttori industriali una valida alternativa alle materie prime inquinanti derivanti da risorse non rinnovabili.

Tabella 2.2 Proprietà di alcune fibre naturali in relazione a quelle di vetro

Proprietà	Fibre					
	Vetro E	Canapa	Juta	Lino	Cotone	Cocco
Densità (g/cm ³)	2.55	1.48	1.46	1.4	1.51	1.25
Resistenza a trazione (MPa)	2400	550-900	400-800	800-1500	400	220
Modulo <i>E</i> (GPa)	73	70	10-30	60-80	12	6
Allungamento a rottura (%)	3	1.6	1.8	1.2-1.6	3-10	15-25
Assorbimento umidità (%)	-	8	12	7	8-25	10

Nell'enorme panorama delle biofibre, quelle di lino e di canapa risultano particolarmente adatte a essere utilizzate come rinforzo di materiali compositi ecosostenibili. Osservandone le principali caratteristiche meccaniche in Tabella 2.2, si può facilmente notare che esse possono rappresentare una valida e realistica alternativa alle fibre di vetro. Nei prossimi paragrafi verranno discusse più in dettaglio le loro caratteristiche peculiari e proprietà meccaniche in relazione anche al loro utilizzo per interventi di rinforzo esterno sulle murature.

2.2. Caratteristiche fisico-meccaniche delle fibre naturali vegetali

Sia le fibre di lino che quelle di canapa sono fibre naturali vegetali (*Plant Based Fibers*) estratte da stelo. Il componente fondamentale è la *cellulosa*, sostanza organica contenente i tre elementi chimici semplici: carbonio, idrogeno e ossigeno. La sua struttura è tipicamente macromolecolare, con

monomeri costituiti da molecole di glucosio collegate tra loro a formare lunghe catene.

La cellulosa è la cosiddetta “parete cellulare”, la quale riveste le cellule vegetali e le distingue da quelle animali che ne sono prive. Questa parete conferisce al tessuto vegetale la rigidità necessaria per il sostegno delle piante; nelle parti legnose di queste ultime, poi, insieme alla cellulosa, è presente un’altra sostanza organica denominata *lignina*, che ne aumenta rigidità e resistenza, responsabile anche della degradazione batterica e di quella ai raggi UV.

Gli altri componenti delle fibre vegetali sono: l’*emicellulosa*, contenente diverse unità di zucchero distinte e responsabile della biodegradazione e della degradazione termica, nonché dell’assorbimento di umidità; la *pectina*, polisaccaride composto da una catena lineare di molecole di acido galatturonico e responsabile di alcune proprietà meccaniche come l’adesione e la porosità; infine la *cera*, presente principalmente sulla superficie delle fibre come involucrio protettivo [6].

In Figura 2.2 viene riportata una sezione schematica della struttura gerarchica delle fibre naturali vegetali, costruita per ripetizione di unità cellulari.

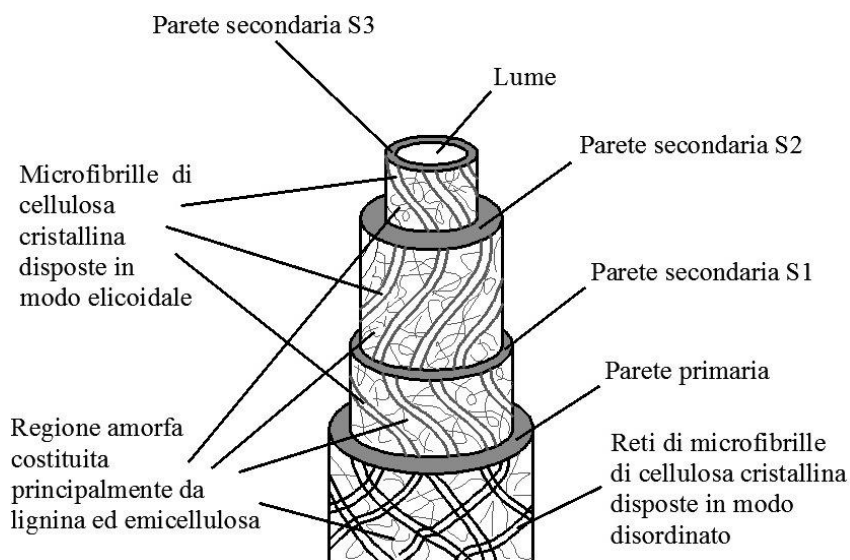


Figura 2.2 Struttura delle fibre cellulose: gerarchizzazione

Le pareti cellulari sono concentriche e suddivise in pareti primarie e secondarie a seconda del tempo di formazione. Nelle ultime si possono distinguere tre strati denominati *S1*, *S2* e *S3*, aventi ognuno disposizioni elicoidali differenti delle microfibrille di cellulosa cristallina. Ciascuna unità cellulare presenta una cavità centrale chiamata *lume*, le cui dimensioni dipendono da quelle esterne della fibra.

Le percentuali tipiche di sostanze presenti nel lino e nella canapa sono indicate in Tabella 2.3, dove per “Altro” si intendono sostanze pectiche, ceneri, cere e umidità.

Tabella 2.3 *Composizione tipica del lino e della canapa*

%	Lino	Canapa
Cellulosa	60	70
Emicellulosa	15	14
Lignina	3	4
Altro	22	12

Va precisato che la percentuale di cellulosa nelle fibre vegetali cresce dopo la lavorazione delle stesse (in genere già a seguito della fase di pettinatura), raggiungendo circa l'80% per entrambi i tipi di fibra che vengono privati delle sostanze grasse e di molte scorie legnose.

La Tabella 2.4 contiene un sommario di valori tipici ottenuti per queste fibre a base di cellulosa e per quelle di vetro. Si può notare che le proprietà meccaniche delle fibre di canapa e di lino variano considerevolmente, anche rispetto ai valori indicativi contenuti nella Tabella 2.2, come conseguenza della variabilità intrinseca del materiale, delle dimensioni delle fibre testate, del metodo di estrazione e dell'origine delle piante. Da qui l'importanza fondamentale che ricopre l'intero processo produttivo di questi materiali, che può limitare gli effetti legati alla variabilità di alcuni fattori che possono essere uniformati.

Le fibre cellulosiche hanno sicuramente resistenze e moduli a trazione più modesti rispetto a quelli delle fibre di vetro ma, se si tengono in conto le densità dei materiali (vetro: 2,5 g/cm³, cellulose: 1,5 g/cm³), i valori specifici delle quantità suddette sono mediamente confrontabili.

Tabella 2.4 *Proprietà meccaniche delle fibre cellulosiche e di vetro*

Tipo di fibra	Resistenza (MPa)	Modulo (GPa)	Riferimento
Lino	80-149	8-12	[7]
	621	52	[8]
	1500-1800	-	[9]
	270	44	[10]
Canapa	270	19	[10]
	658	-	[11]
Vetro	1913	72	[11], [12]

Le principali proprietà delle fibre di canapa e di lino sono:

- alta tensione e deformazione di rottura;
- bassa conducibilità termica, elettrica e acustica;
- trasparenza elettromagnetica;
- richiedono basse energie per la produzione;
- completamente riciclabili.

Queste fibre tessili, prodotte nella forma di tessuti o nastri per applicazioni strutturali, possono essere impregnate sia con matrici polimeriche che cementizie a seconda del tipo di applicazione, delle caratteristiche di adesione e/o del substrato sul quale si decide di incollarle.

Riguardo la scelta di utilizzare le fibre naturali come rinforzo di elementi murari, essa è supportata, insieme ai vantaggi sopra elencati, dal fatto che il parametro fondamentale che definisce le caratteristiche di un rinforzo fibroso non è la resistenza a trazione, che risulta essere al di sopra dei tassi di lavoro cui sono soggette le fibre, bensì il modulo elastico; difatti, più tale valore è elevato, maggiore sarà il contributo irrigidente che il rinforzo potrà fornire

all'elemento strutturale sul quale è applicato. Generalmente per il rinforzo di strutture in c.a. si preferiscono fibre sia con resistenza a trazione medio - alta (>2000 MPa) che con modulo elastico medio - alto (170-250 GPa), mentre per il recupero degli edifici in muratura si scelgono fibre con modulo di elasticità più basso (<80 GPa), tipo quelle di vetro o quelle naturali che meglio si accordano con la rigidità propria del supporto.

2.2.1. Fibre di lino

Il lino è una fibra proveniente dal fusto della pianta *Linum usitatissimum* (Fig. 2.3a) della famiglia delle Linacee, di natura cellulosa multicellulare dall'aspetto cilindrico. Riguardo le sue proprietà fisiche, è una fibra igroscopica, resiste bene al calore e comincia a decomporsi a 310 °C; ha un'ottima conducibilità termica ed è antistatica, cioè non trattiene le cariche elettriche accumulate in superficie. È una fibra molto rigida, insensibile all'invecchiamento, molto resistente grazie anche a una tenacità che varia tra i 5 e i 6,1 g/den e aumenta del 40% se viene bagnata; quest'ultima proprietà è dovuta alla struttura della fibra di lino che è un polimero cristallino lungo e con un numero elevato di legami idrogeno tra polimeri adiacenti.

All'esame microscopico (Fig. 2.3b), il lino *disgrezzato* appare formato da fibre isolate e libere da impurità di legnocellulosa. Le singole fibre sono sottili, uniformi e quasi trasparenti; osservate longitudinalmente presentano marcate striature trasversali che si incrociano obliquamente ad x e presentano un lieve rigonfiamento a distanza quasi regolare.

Dopo la lavorazione delle fibre, che comprende le fasi di macerazione in acqua, cardatura, pettinatura e filatura in umido, esse si presentano come in Figura 2.3c. Nella forma di nastri o tessuti (Fig. 2.3d), che possono realizzarsi secondo diverse disposizioni di trama e ordito (v. Paragrafo 1.5.), le fibre di lino possono costituire dei sistemi compositi da impregnare *in situ* per il rinforzo esterno di elementi strutturali.

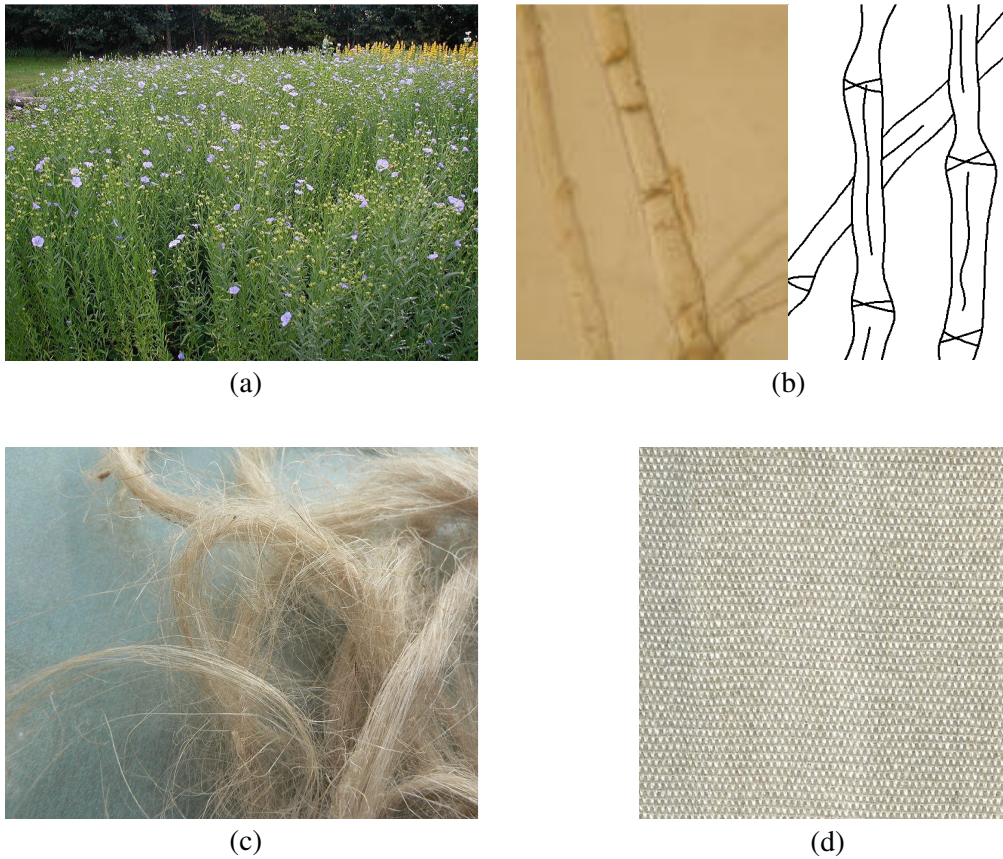


Figura 2.3 *Linum usitatissimum*:
 (a) Coltivazione; (b) Esame microscopico; (c) Fili; (d) Tessuto

2.2.2. Fibre di canapa

La canapa è la fibra che proviene dalla macerazione della *Cannabis sativa* (Fig. 2.4a) della famiglia delle Moracee. Molto resistente e tenace (la tenacità è superiore anche a quella del lino), questa fibra risulta essere poco elastica e piuttosto rigida; assorbe e trattiene molta umidità, è antistatica e con buona conducibilità termica. Il colore va dal bianco avorio al beige. Le fibre di canapa, più difficilmente isolabili rispetto a quelle di lino, appaiono riunite in fasci lunghi dai 30 ai 70 cm, ricoperte nella canapa *grezza* da materiale incrostante. Le singole fibre sono lunghe dai 15 ai 50 mm, hanno un diametro che varia tra i 15 e i 35 μm .

All'esame microscopico (Fig. 2.4b) le fibre appaiono cilindriche e leggermente appiattite con striature irregolari, che, come il lino, sono spesso incrociate tra loro ad x ma prive di ingrossamenti. Una distinzione tra lino e canapa al microscopio ottico risulta difficile poiché le due fibre presentano una morfologia simile: la canapa ha una forma più irregolare, più schiacciata e con più nodi; inoltre la cuticola è meno trasparente di quella del lino e la terminazione non è appuntita ma arrotondata.

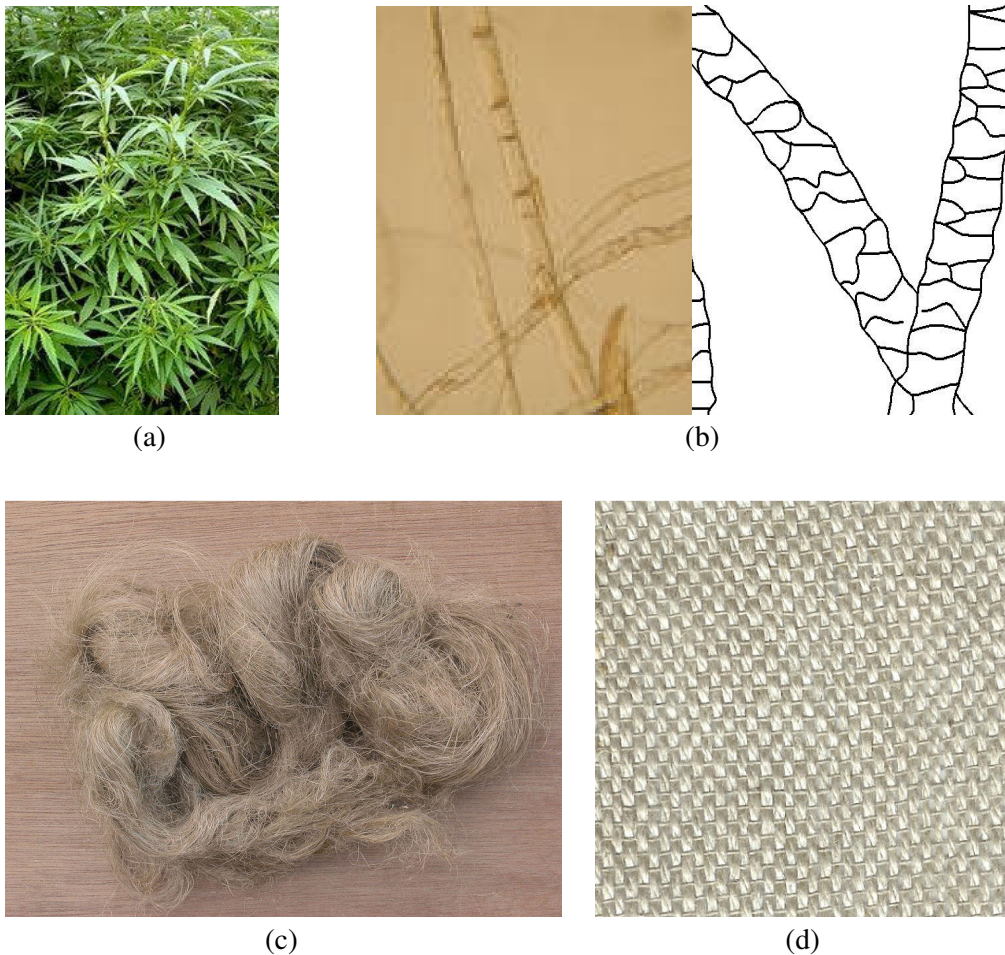


Figura 2.4 *Cannabis sativa*:
(a) *Coltivazione*; (b) *Esame microscopico*; (c) *Fili*; (d) *Tessuto*

Le fasi di lavorazione della fibra di canapa sono le stesse del lino e di tutte le fibre che si ricavano da stelo (juta, kenaf, etc.). Alla fine della filatura in umido la canapa si presenta come in Figura 2.4c. La Figura 2.4d, invece, riporta l'immagine di un tessuto di canapa realizzato per essere impregnato *in situ* come rinforzo strutturale per mezzo di una resina epossidica/poliestera o malta cementizia. La scelta del tipo di matrice dipende da numerosi fattori, quali la compatibilità tra i due componenti, il tipo di supporto da rinforzare, le proprietà di adesione tra sistema composito e substrato, etc.

2.3. Matrici cementizie e resine epossidiche a confronto

Nell'ambito del rinforzo strutturale con compositi, ai classici FRP si affiancano gli FRCM (*Fiber Reinforced Cementitious Matrix*) che sfruttano sia le eccezionali proprietà di fibre di nuova generazione (vetro, carbonio, aramidiche, etc.), sia le caratteristiche di una matrice cementizia, diversa dalle resine tradizionalmente utilizzate, che ne permette il funzionamento e l'adesione al supporto.

D'altra parte anche nelle Istruzioni del CNR [13] al § 7.3.3. viene contemplata la possibilità di impiego di matrici inorganiche, specificando quanto segue:

"[...] Vanno infine ricordate le matrici di natura inorganica (cementizie, metalliche, ecc.), il cui utilizzo per la realizzazione di compositi fibrorinforzati in campo civile – soprattutto quelle cementizie – sta progressivamente diffondendosi. [...]"

Le proprietà meccaniche di queste matrici sono decisamente inferiori a quelle delle fibre ma la loro unione realizza un perfetto connubio di resistenza e durabilità nel tempo, oltre a garantire la funzione per la quale il rinforzo è stato concepito. Si tratta di prodotti di recentissima immissione nel campo dei materiali compositi con fibre, costituiti da un legante idraulico pozzolanico e da additivi specifici che favoriscono lo sviluppo di caratteristiche meccaniche e fisiche differenti da quelle tipiche degli FRP con matrici organiche a base polimerica, tra cui le più utilizzate sono le resine epossidiche.

Nella Tabella 2.5 sono sintetizzate le principali differenze fisico-meccaniche di entrambi i tipi di matrici. La valutazione critica di tali

differenze da parte di chi concepisce un rinforzo in materiale composito è alla base di una corretta scelta progettuale.

Tabella 2.5 *Caratteristiche principali delle matrici cementizie e delle resine epossidiche*

Matrice	Cementizia	Resina Epossidica
Modulo elastico (GPa)	6.0	2.7 – 3.6
Resistenza a trazione (per flessione) (MPa)	(a 28 gg) 3.5	40 - 82
Resistenza alle alte temperature	<i>Identica a quella del supporto; mantengono inalterate le loro caratteristiche meccaniche e di adesione da +5 °C sino a 550 °C</i>	<i>Perdono le loro caratteristiche strutturali a partire dai 30 °C con graduale perdita di adesione al supporto</i>
Umidità del sottofondo	<i>Favorisce l'adesione in quanto il legante è di tipo idraulico</i>	<i>Anche a indurimento avvenuto manifestano perdita di adesione al supporto per umidità relativa dell'aria elevata (80 – 90%)</i>
Lavorabilità	<i>Ampissimo range di temperatura, tra i 5 e i 40 °C non esistono grandi differenze nei tempi di lavorabilità, presa e indurimento</i>	<i>Ridotto range di temperature, l'indurimento avviene solo tra i 10 e i 30 °C</i>
Tossicità	<i>Nulla</i>	<i>Pericolosità sia per contatto che per inalazione</i>
Pulizia attrezzi utilizzati per la posa	<i>Con sola acqua</i>	<i>Con solventi nitro e acetone</i>
Comportamento a rottura	<i>Duttile</i>	<i>Fragile</i>

Viscosità	<i>Alta allo stato fluido e quindi difficile impregnazione delle fibre</i>	<i>Bassa allo stato fluido e quindi facile impregnazione delle fibre</i>
-----------	--	--

Dai risultati di recenti attività sperimentali, inoltre, emerge che nei sistemi FRP la presenza di umidità sulla superficie della struttura determina una variazione della tipologia di rottura che da coesiva, ovvero nel supporto, diviene adesiva, cioè all'interfaccia tra supporto e rinforzo.

Se si considerano poi i vantaggi legati alla riduzione dell'inquinamento ambientale, l'uso degli FRCM può divenire una valida alternativa agli FRP. Nella sperimentazione condotta per il presente lavoro di tesi, si è deciso di utilizzare un composito costituito da fibre lunghe naturali di lino e canapa, prodotte nella forma di nastri e tessuti, e da una matrice cementizia inorganica, specifica per interventi di rinforzo esterno. Il sistema così ottenuto (che chiameremo d'ora in poi NFRCM – *Natural Fibers Reinforced Cementitious Matrix*) risulta particolarmente adatto a essere utilizzato come rinforzo di strutture in muratura, perché unisce la sua particolare attitudine a essere fortemente compatibile con il supporto murario, sia dal punto di vista fisico che meccanico, ai vantaggi ambientali di ecocompatibilità e sostenibilità.

2.4. Posa in opera dei rinforzi FRCM

Il successo di un intervento di rinforzo strutturale con nastri o tessuti dipende in maniera determinante dall'adesione tra supporto e rinforzo, dalla corretta impregnazione con la matrice e dal corretto allineamento delle fibre.

La perfetta aderenza tra composito e supporto permette il trasferimento delle tensioni, ed è un requisito imprescindibile per l'efficacia del rinforzo, particolarmente nel caso in cui si operi su strutture sollecitate da azioni taglienti o inflesse.

Le fasi operative da seguire per realizzare un intervento sono:

1. Valutazione preventiva del substrato;

2. Preparazione della superficie;
3. Posa in opera dei tessuti (tecnica “wet lay up” oppure “dry lay up”);
4. Protezione superficiale.

L'ultimo step, da eseguire per completare la messa in opera del rinforzo, è necessario solo per gli FRP e non per i rinforzi a matrice cementizia.

Di seguito vengono descritte più in dettaglio le fasi di preparazione del substrato e quelle di applicazione del rinforzo in riferimento alle prove sperimentali di compressione diagonale descritte nel prosieguo. Va precisato, infatti, che esistono due tipologie di applicazione dei materiali compositi a seconda del tipo di intervento che si sceglie di eseguire:

- Applicazioni per *Contatto*;
- Applicazioni per *Aderenza*.

Nelle applicazioni per contatto, quale il confinamento di un elemento compresso, non è necessario garantire un'aderenza perfetta tra il materiale di rinforzo e il supporto. La preparazione della superficie può quindi limitarsi a una spazzolatura e alla rimozione dei detriti.

Nelle applicazioni per aderenza, invece, come i rinforzi a flessione e a taglio, la superficie esterna dell'elemento strutturale va adeguatamente preparata in modo da assicurare la perfetta adesione del rinforzo. Eventuali porzioni di materiale danneggiato vanno rimosse e sostituite con malta o altri materiali adatti; eventuali fessure devono essere riempite opportunamente per non dare luogo a sconnessioni della superficie che potrebbero innescare concentrazioni di tensioni parassite, etc.

Nel caso specifico si è operato su superfici di elementi di nuova costruzione (provini realizzati in laboratorio per tests sperimentali), per cui la preparazione del substrato si è limitata a una spazzolatura per eliminare le polveri e alla rimozione di materiale con carta abrasiva al fine di garantire una perfetta planarità della superficie da rinforzare.

Prima di effettuare l'incollaggio esterno dei nastri e dei tessuti, si è scelto di applicare un *primer*¹ (Fig. 2.5) per migliorare le proprietà meccaniche dello strato superficiale e facilitare l'aderenza degli strati successivi che sovrapposti compongono il rinforzo.



Figura 2.5 Applicazione del primer

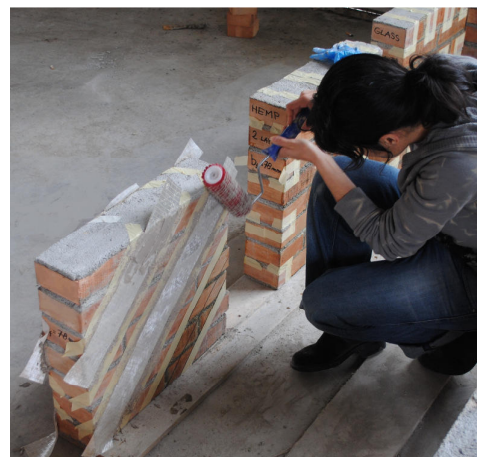
La posa del tessuto può essere eseguita con tecnica “a secco” (*dry lay up*), adatta per lavori di piccola estensione, oppure con lavorazione “in umido” (*wet lay up*), più indicata per applicazioni su grandi superfici. Trattandosi di campioni di modeste dimensioni si è proceduto all'applicazione dei rinforzi secondo la prima tipologia di lavorazione: si applica un primo strato di malta cementizia mediante spalmatura con spatola per una corretta e uniforme stesura (Fig. 2.6a); si provvede ad applicare il tessuto orientando le fibre nella direzione prevista dal progetto, esercitando su di esso una leggera pressione con un apposito rullo dentato per evitare lo sviluppo di eventuali avvallamenti e/o bolle d'aria altrimenti nocivi per la resa finale (Fig. 2.6b); si impregna, quindi, con un ulteriore strato di malta avendo cura di ricoprire l'intero tessuto (Fig. 2.6c); nel caso si necessiti di ulteriori strati di rinforzo,

¹ Termine in inglese (con il significato letterale di prima mano, mano di fondo) a indicare una sostanza collante che viene applicata su di un supporto per favorire l'adesione dello strato soprastante.

questi vengono applicati in successione al di sopra degli strati precedenti (Fig. 2.6d) seguendo le stesse modalità di applicazione sopra elencate.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 2.6 Posa in opera dei nastri e tessuti in fibra naturale:
(a) Stesura strato di malta; (b) Applicazione rinforzo e pressione con rullo;
(c) Stesura successivo strato di malta; (d) Ripetizione delle fasi

Una volta installato il rinforzo sulla muratura occorre attendere un tempo di stagionatura di 28 gg prima di poter eseguire le prove, lo stesso periodo richiesto per la maturazione della malta tra i mattoni.

Nell'indagine sperimentale, oltre al composito descritto, costituito da fibre lunghe di canapa e lino immerse in una matrice cementizia, è stato impiegato un sistema FRCM il cui rinforzo è rappresentato da fibre lunghe di vetro allo scopo di eseguire un confronto con le fibre comunemente utilizzate nel recupero strutturale di elementi murari (Fig. 2.7). I due rinforzi sono accomunati dalla stessa fase continua, ovvero la matrice inorganica, per cui le fasi di applicazione sono state le medesime.



Figura 2.7 Rinforzo FRCM in fibra di vetro

Va precisato comunque che nel caso del vetro la penetrazione della malta tra i filati non avviene in maniera omogenea. A differenza delle resine epossidiche che compongono i classici FRP, le malte utilizzate nei rinforzi a matrice cementizia hanno nel loro impasto la polvere di cemento che per quanto possa essere fine difficilmente riesce a penetrare negli spazi tra i filamenti di fibra (dell'ordine dei $3 \mu\text{m}$), anche se le operazioni di messa in opera generalmente inficiano le caratteristiche geometriche iniziali dei tessuti allargando queste aperture e permettendo una maggiore penetrazione della matrice. Questo non avviene nel caso venga adoperato un rinforzo in fibra naturale che, nella forma di nastri o tessuti, presenta degli spazi tra i filamenti generalmente più ampi.

2.5. Bibliografia

- [1] P. Wambua, J. Ivens, I. Verpoest, *Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics?*, ELSEVIER Composites Science and Technology, 63, 1259-1264 (2003).
- [2] J.D. Foulk, D.E. Akin, R.B. Dodd, *New low cost flax fibers for composites*, SAE Technical paper number 2000-01-1133, SAE 2000 World Congress, Detroit, March 6-9 (2000).
- [3] S.V. Joshi, L.T. Drzal, A.K. Mohanty, S. Arora, *Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites?*, ELSEVIER Composites Part A: applied science and manufacturing, 35, 371-376 (2004).
- [4] F.A. Silva, N. Chawla, R.D. Toledo, *Tensile behavior of high performance natural (sisal) fibers*, ELSEVIER Composites Science and Technology, 68, 3438-3443 (2008).
- [5] D. Asprone, M. Durante, A. Prota, G. Manfredi, *Potential of structural pozzolanic matrix-hemp fiber grid composites*, ELSEVIER Construction and Building Materials, article in press, (2011).
- [6] *Natural Fibers, Plastics and Composites*, edited by F.T. Wallenberger and N.E. Weston, Kluwer Academic Publishers, Chapter 18, 322-323 (2004).
- [7] P.R. Hornsby, E. Hinrichsen, K. Taverdi, *Preparation and properties of polypropylene composites reinforced with wheat and flax straw fibers*, Journal of Material Science, 32, 443-449 (1997).
- [8] G.C. Davies, D.M. Bruce, *Effect of environmental relative humidity and damage on the tensile properties of flax and nettle fibers*, Textile Research Journal, 68, 623-629 (1998).

- [9] H.L. Bos, J.A. Van Den Oever, O.C.J.J. Peters, *Tensile and compressive properties of flax fibers for natural fiber reinforced composites*, Journal of Material Science, 37, 1683-1692 (2002).
- [10] S.J. Eichhorn, J. Sirichaisit, R.J. Young, Deformation mechanisms in cellulose fibers, paper and wood, Journal of Material Science, 36:31, 29-35 (2001).
- [11] W.E. Morton, J.W.S. Hearle, *Physical Properties of Textile Fibers*, London: Heinemann Textile Institute, (1975).
- [12] F.R. Jones, *Handbook of Polymer-Fiber Composites*, Harlow: Longman Scientific and Technical, (1994).
- [13] CNR, 2004. *CNR-DT 200/2004, Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati – Materiali, Strutture di c.a. e di c.a.p., Strutture murarie*, Consiglio Nazionale delle Ricerche.

Capitolo 3

Caratterizzazione meccanica dei materiali di base e prove su microelementi

3.1. Premessa

Lo scopo del presente lavoro di tesi è stato quello di indagare sul comportamento a taglio per azioni nel piano di pannelli in muratura rinforzati con FRCM attraverso un'indagine sperimentale supportata da una validazione numerica dei risultati ottenuti. Un gran numero di prove sperimentali ([1], [2], [3], [4], solo per citarne alcune) ha mostrato che, utilizzati come rinforzo a taglio per rispondere alle azioni nel piano della muratura, nastri, tessuti e reti in FRP o in FRCM inducono apprezzabili benefici al comportamento meccanico dei maschi murari. Ne conseguono vantaggi considerevoli rispetto alle tecniche tradizionali (ad es.: betoncino armato) consistenti principalmente in un'ampia reversibilità dell'intervento e quindi in una minore invasività.

Con il supporto degli incoraggianti risultati presenti nella letteratura scientifica, si è scelto di testare un nuovo composito, i cui componenti sono

materiali quasi interamente *eco-friendly*. In particolare, esso è costituito da fibre lunghe naturali da applicare al supporto murario per mezzo di una matrice inorganica cementizia. Le caratteristiche fisico-meccaniche di questi materiali e i motivi della scelta di utilizzarli come rinforzo di strutture murarie sono ampiamente discussi nel capitolo precedente.

Le prove di taglio sui pannelli rinforzati con tale composito, cui si rimanda al prossimo capitolo per la loro descrizione e l'analisi dei risultati, sono state precedute da una serie di prove meccaniche per caratterizzare i materiali costituenti l'apparato murario. Si è proceduto successivamente alla realizzazione di prove di scorrimento su triplete (elementi a tre mattoni e due giunti di malta) per l'individuazione delle caratteristiche di interfaccia.

Una seconda parte della sperimentazione preliminare ha riguardato la caratterizzazione dei materiali compositi attraverso prove di trazione uniassiale su nastri e tessuti, e prove di aderenza al supporto in laterizio.

Tutte le prove, condotte presso il *Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture* dell'Università della Calabria, sono state realizzate in conformità alle norme nazionali (UNI, CNR) e internazionali (ASTM).

3.2. Prove sperimentali sui materiali costituenti la muratura

La muratura dei provini impiegati per le prove di taglio è costituita da mattoni pieni e malta cementizia, disposta in giunti di circa 1 cm.

La campagna sperimentale sui costituenti di base descritta nel seguito è consistita in:

- *prove di caratterizzazione a compressione;*
- *prove di caratterizzazione a trazione indiretta.*

3.2.1. Laterizio pieno

Il laterizio impiegato durante l'attività sperimentale, di dimensioni nominali pari a 5,5 x 12 x 25 cm, viene prodotto dalla ditta *Cotto Cusimano* di Settingiano (CZ).

Per la determinazione della resistenza a compressione sono stati sottoposti a prova sei mattoni interi (Fig. 3.1) le cui facce a contatto con le

piastre di carico sono state preventivamente spianate (Fig. 3.2) in modo da rispettare le tolleranze di planarità e di parallelismo richieste dalla norma UNI di riferimento [6].



Figura 3.1 Campione di prova



Figura 3.2 Rettifica con spianatrice

Ciascun provino è stato portato a rottura per mezzo di una pressa elettroidraulica *MFL SYSTEME* (Fig. 3.3), eseguendo la prova in controllo di spostamento con velocità della traversa pari a 1 mm/min.



Figura 3.3 Piastra di carico

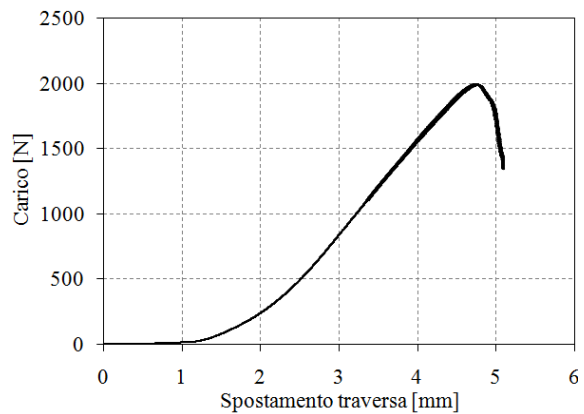


Figura 3.4 Curva carico - spostamento

In Figura 3.4 viene mostrato, a titolo di esempio, il diagramma relativo a un laterizio, che evidenzia un andamento regolare della prova. Il valore medio

della resistenza a compressione f_c è risultato pari a 67,3 MPa, ottenuto dalle prove con un coefficiente di variazione $CoV = 5\%$.

La resistenza a trazione f_t dei mattoni è stata valutata riducendo del 20% il valore ottenuto da prove di flessione su tre punti, contenuto nella scheda tecnica del materiale fornita dal produttore.

3.2.2. Malta cementizia

Per i giunti verticali e orizzontali della muratura di mattoni è stata impiegata una malta cementizia a composizione prescritta [6], caratterizzata da una miscela di cemento e sabbia a secco nel rapporto di 1:3 (in peso) e da un rapporto acqua/cemento (a/c) di 0,6. Occorre precisare che la scelta di una malta dalle buone prestazioni meccaniche è stata fatta tenendo conto delle proprietà altrettanto buone del mattone. In questo modo si è cercato di costruire una muratura che garantisca un comportamento assolutamente non prevedibile sotto l'azione dei carichi di prova e di evitare quindi che la crisi dei pannelli murari interessasse esclusivamente i giunti di malta (scivolamento, rottura a trazione, etc.).

Facendo riferimento alla normativa UNI [7], è stata valutata la resistenza a trazione indiretta eseguendo delle prove di flessione su tre punti su sei provini prismatici di malta indurita (Fig. 3.5).



Figura 3.5 *Campione di prova*

La stagionatura dei provini sperimentali, aventi ciascuno dimensioni 40 x 40 x 160 mm e confezionati in stampi di polistirolo, ha richiesto un periodo di 28 gg.

Il dispositivo di flessione comprende due rulli di supporto in acciaio di 10 mm, distanziati di 100 mm, e un terzo rullo di caricamento dello stesso diametro posto sopra il provino in mezzzeria rispetto agli altri due rulli. La Figura 3.6 riportata di seguito illustra lo schema di prova con le rispettive misure in mm [7].

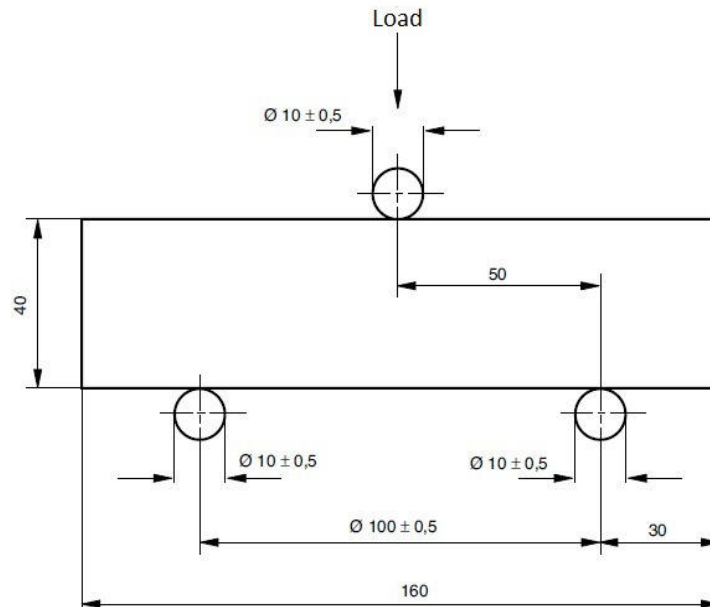


Figura 3.6 Schema della prova di flessione su tre punti

Per la realizzazione della prova è stata utilizzata una macchina universale elettromeccanica *INSTRON 1195* con portata massima di 10 t. Le prove sono state condotte in controllo di spostamento con velocità della traversa pari a 0,5 mm/min. Il carico è stato applicato in modo continuo fino alla rottura dei provini le cui resistenze a flessione f_f , in MPa, sono state calcolate usando la seguente relazione [7]:

$$f_f = 1,5 \frac{Fl}{bd^2}$$

dove F è il massimo carico applicato, l è la distanza tra i supporti inferiori, b e d sono i lati della sezione trasversale del prisma (nel caso specifico b e d sono

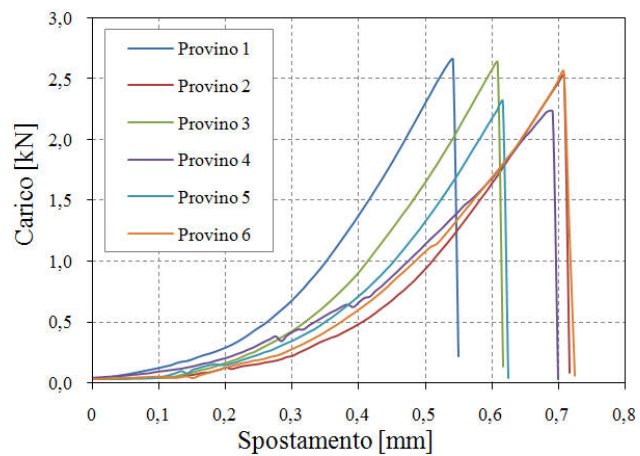
coincidenti). La Figura 3.7 contiene le immagini relative all'esecuzione della prova e alla rottura di alcuni provini, nonché i diagrammi ottenuti per l'intero campione di prova.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.7 Prova di flessione su tre punti:

(a) Dispositivo; (b) Rottura dei provini; (c) Curve carico-spostamento

Il valore medio della resistenza a flessione f_f è risultato pari a 5,8 MPa ($CoV = 6,5\%$). Così come per i mattoni, considerando l'80% di tale valore si ottiene la resistenza a trazione f_t della malta, pari a 4,7 MPa.

Le dodici metà risultanti dalle prove di flessione sui provini prismatici sono state sottoposte a prove di compressione monoassiale [7], utilizzando due piastre metalliche dalle dimensioni tali da consentire l'esecuzione del test su provini di forma cubica (Fig. 3.8).

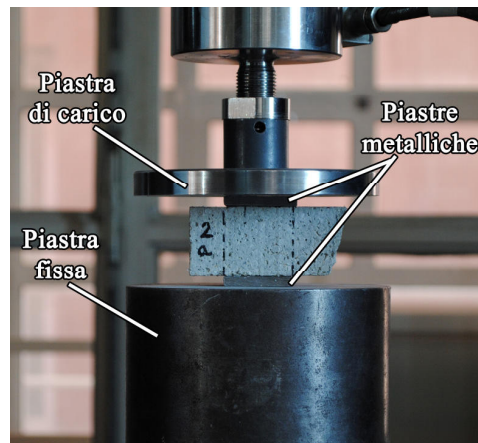
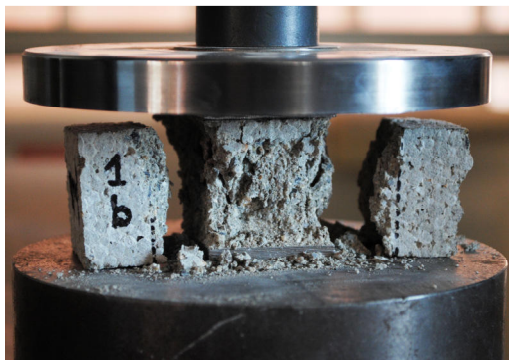


Figura 3.8 Dispositivo di prova

La caratterizzazione a compressione della malta ha portato a un valore medio di resistenza di 19,6 MPa ($CoV = 11,4\%$). In Figura 3.9a si riporta l'immagine di un provino a rottura.



(a)



(b)

Figura 3.9 Rottura per compressione dei cubetti di malta

Si può notare che tramite una leggera azione manuale è possibile rimuovere facilmente le parti più esterne dei cubetti mostrando così la loro tipica crisi a “clessidra” (Fig. 3.9b). La macchina utilizzata per eseguire il test di compressione è ancora la *INSTRON 1195* a cui sono state sostituite le apparecchiature di prova.

3.2.3. Proprietà meccaniche ed elastiche

I valori più significativi delle caratteristiche meccaniche ed elastiche dei materiali di base costituenti la muratura sono contenuti in Tabella 3.1, dove ρ indica il peso specifico, E il modulo di Young, f_c la resistenza a compressione ed f_t la resistenza a trazione.

Tabella 3.1 *Caratteristiche meccaniche ed elastiche*

Materiali	ρ [kg/ m ³]	E [MPa]	f_c [MPa]	f_t [MPa]
Laterizio	1780	1290	67.3	3.7
Malta	2090	550	19.6	4.7

3.3. Prove di scorrimento su triplette

Successivamente alla caratterizzazione del comportamento meccanico dei materiali componenti la muratura sono state eseguite prove su campioni costituiti da tre mattoni legati con malta (triplette) al fine di indagare le proprietà di scorrimento all’interfaccia malta – laterizio.

La procedura sperimentale, descritta nella norma UNI [8], consente di determinare la resistenza a taglio della muratura in assenza di carichi di compressione e il coefficiente di attrito. Nel riferimento normativo sono contenute tutte le specifiche relative alla preparazione dei testimoni. Trattandosi di mattoni di altezza h_u inferiore a 200 mm ($h_u = 55$ mm) e lunghezza l_u inferiore a 300 mm ($l_u = 250$ mm), sono stati allestiti provini di tipo A in conformità con quanto riportato in Figura 3.10, con le dimensioni degli elementi coincidenti con quelle del laterizio adoperato.

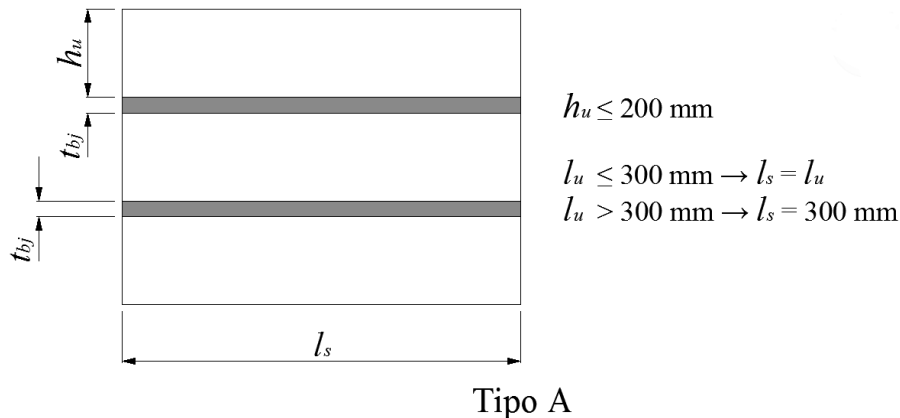


Figura 3.10 Dimensioni e tipo del provino per la prova di taglio

I mattoni sono stati posati l'uno sull'altro in modo da ottenere uno spessore finale t_{bj} del giunto di malta di circa 1 cm (da 8 mm a 15 mm), rappresentativo della muratura con giunti convenzionali adoperata per l'attività sperimentale descritta nel seguito.

La Figura 3.11 contiene lo schema del dispositivo meccanico appositamente realizzato per eseguire le prove sulle triplete. Gli elementi di estremità di ogni provino sono supportati nell'apparecchiatura di prova mediante l'utilizzo di pezzi in acciaio e cuscinetti a rulli rispettivamente con spessore e diametro di 12 mm.

I campioni sono stati sottoposti a un carico verticale monotono su quattro punti, che viene trasmesso attraverso una cerniera sferica posta al centro della piastra di acciaio superiore, in presenza di una compressione di confinamento controllata e mantenuta costante durante il test. In particolare, sono state condotte prove su un numero di sei triplete utilizzando tre diversi livelli di precompressione perpendicolare ai giunti (f_{pi}). Tali livelli di tensione variano a seconda del valore di resistenza a compressione degli elementi in laterizio [8]. Nel caso specifico, essendo f_c maggiore di 10 N/mm^2 (Tab. 3.1), le prove sono state eseguite con valori di confinamento laterale pari a $0,2 \text{ N/mm}^2$, $0,6 \text{ N/mm}^2$ e $1,0 \text{ N/mm}^2$, applicati ciascuno su un numero di due provini.

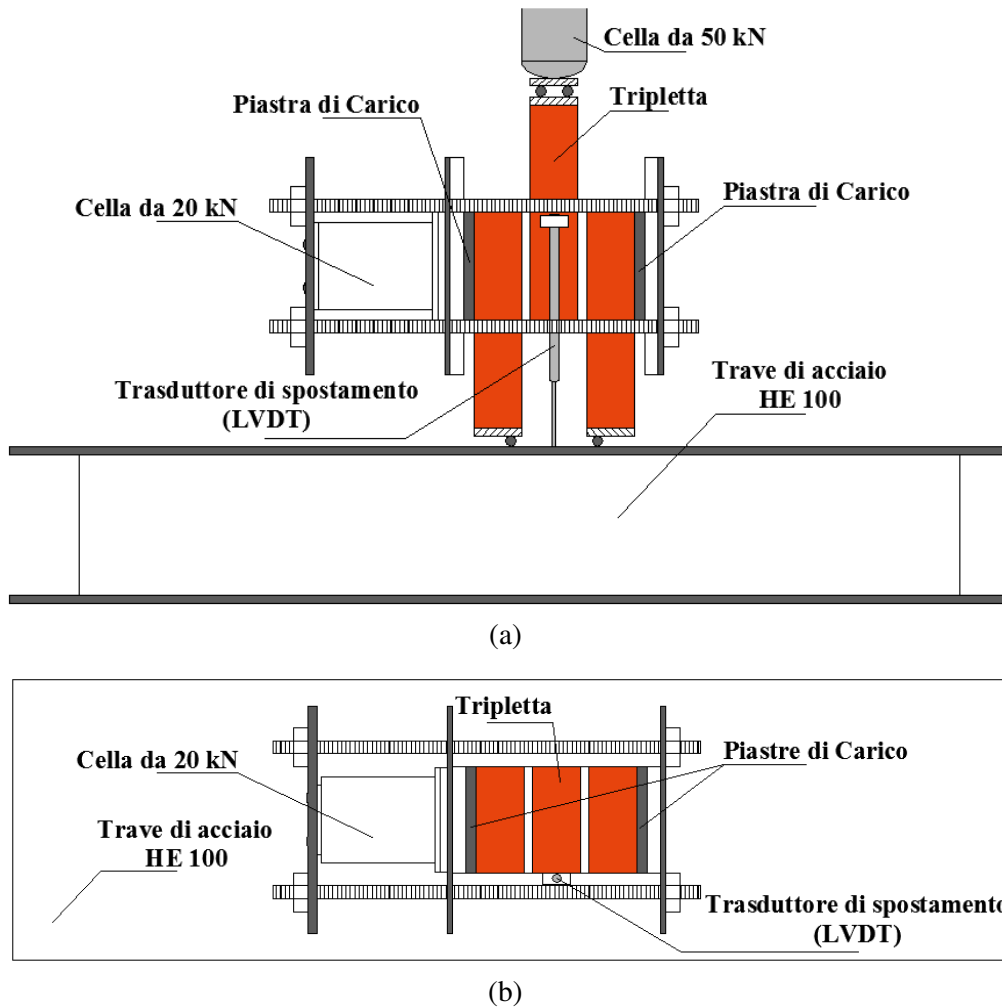


Figura 3.11 *Apparecchiatura sperimentale per le prove su triplette:*
 (a) *Vista frontale;* (b) *Vista dall'alto*

Oltre a rilevare il carico di rottura, si è scelto di monitorare lo scorrimento relativo tra il laterizio caricato verticalmente e gli altri elementi resistenti mediante l'utilizzo di trasduttori di spostamento posti su entrambi i lati del campione a circa metà della lunghezza del mattone centrale. La presenza dei dispositivi di misura ha comportato, per motivi di praticità, una configurazione delle triplette diversa da quella illustrata in Figura 3.10, caratterizzata sostanzialmente dalla differente posizione in altezza del blocco centrale rispetto a quelli di estremità (Fig. 3.11 e 3.12).

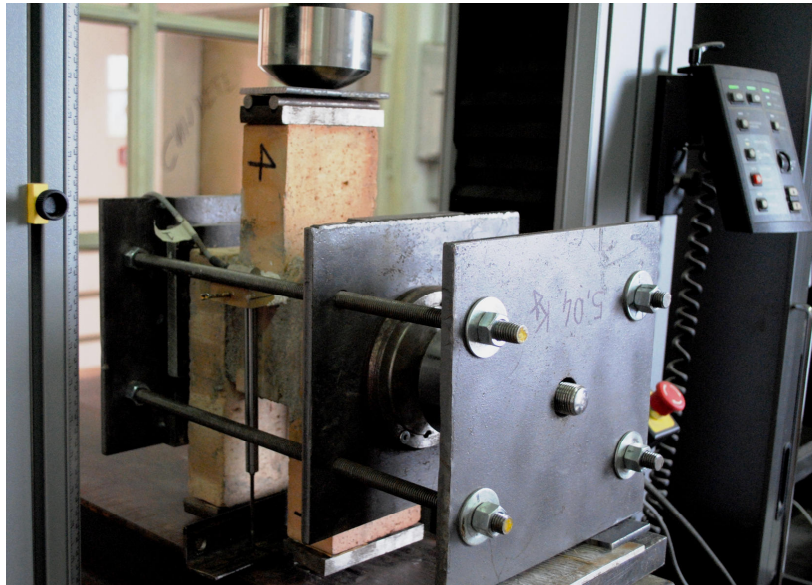


Figura 3.12 Esecuzione della prova di taglio

L'interpolazione dei risultati sperimentali (Tab. 3.2) secondo la legge attritiva lineare di Mohr – Coulomb ha permesso di estrapolare i valori della resistenza iniziale a taglio (coesione) e del coefficiente di attrito, rispettivamente pari a 0,5 MPa e a 1,0 (Fig. 3.13). La resistenza a taglio f_{voi} di ciascun provino è stata calcolata dividendo il carico massimo $F_{i,max}$ per l'area comune su ambo i lati ($2A_i$).

Tabella 3.2 Risultati delle prove su triplete

Provino (<i>i</i>)	f_{pi} [N/ mm ²]	f_{voi} [N/ mm ²]
1	0.2	0.69
2		0.73
3	0.6	1.16
4		1.18
5	1.0	1.66
6		1.49

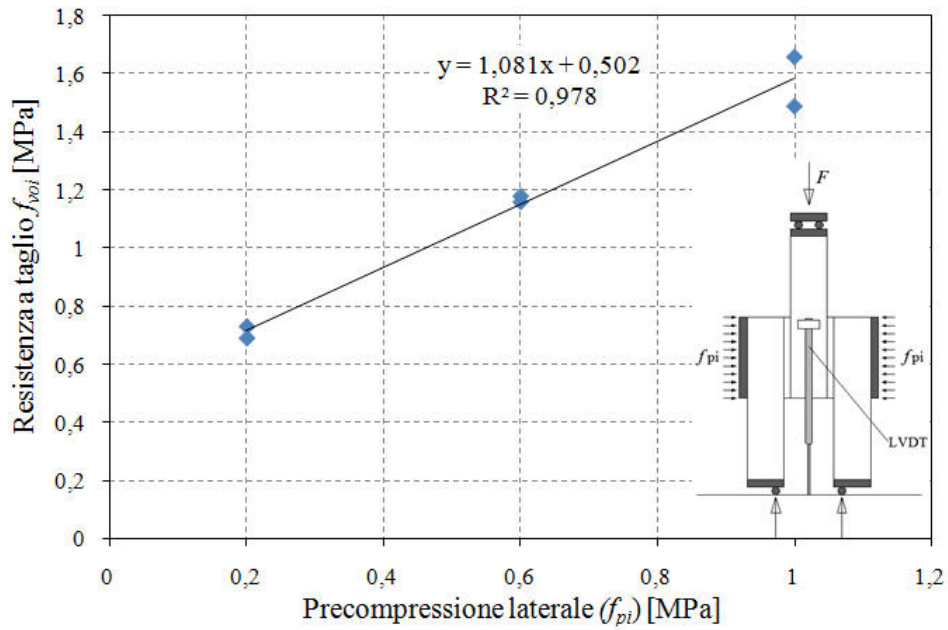


Figura 3.13 Regressione lineare dei punti sperimentali

La modalità di rottura manifestata dai campioni a fine prova, classificata nella norma di riferimento come di tipo A1 [8], ha interessato l'area di unione laterizio/malta su una faccia (scivolamento del giunto) (Fig. 3.14a) o divisa tra due facce del mattone (biforcazione nel giunto) (Fig. 3.14b).

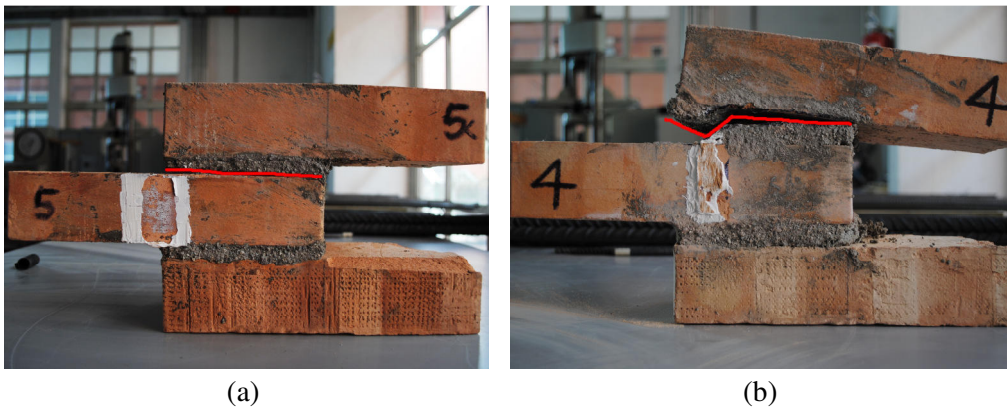


Figura 3.14 Crisi nell'area di unione elemento/malta:
(a) su una faccia; (b) divisa tra due facce dell'elemento

La risposta della tripletta sotto le azioni di taglio è mostrata dai diagrammi del carico in funzione dello scorrimento verticale del blocco centrale (Fig. 3.15). Osservando l'andamento delle tre curve, ciascuna riferita a un diverso livello di precompressione f_{pi} , si può notare che la rigidezza della struttura si mantiene pressoché costante al variare del carico di confinamento. I punti sperimentali sono le medie dei valori registrati dai trasduttori di spostamento posizionati su entrambi i lati del blocco centrale.

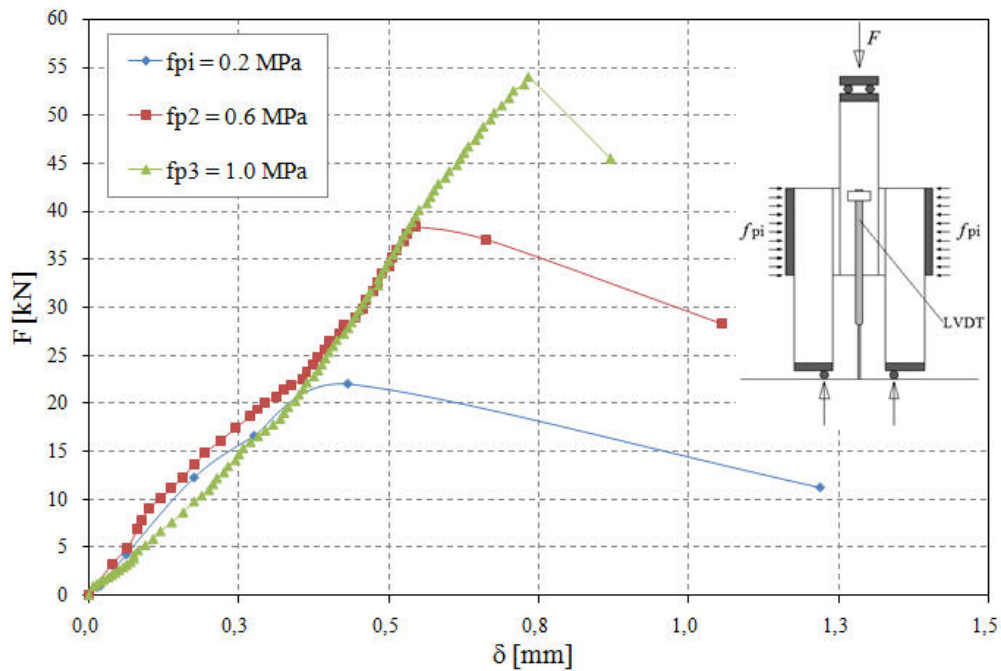


Figura 3.15 Diagrammi carico–scorrimento ai diversi livelli f_{pi}

3.4. Caratterizzazione meccanica dei compositi impiegati

I materiali compositi che sono stati utilizzati nella presente sperimentazione sono costituiti da:

- tessuti unidirezionali in fibre di canapa (*Hemp Fibers – HF*) (Fig. 3.16a);
- tessuti bidirezionali bilanciati in fibre di lino (*Flax Fibers – FF*) (Fig. 3.16b);

- tessuti unidirezionali in fibre di vetro (*Glass Fibers – GF*) (Fig. 3.17);
- matrice inorganica cementizia (Fig. 3.18).



(a)



(b)

Figura 3.16 Tessuti in fibre lunghe naturali:
(a) unidirezionali di canapa; (b) bidirezionali di lino

Tutti i nastri e i tessuti impiegati sono disponibili in commercio per usi strutturali e possono essere utilizzati mediante impregnazione in opera con collanti a matrice cementizia o epossidica. I sistemi di rinforzo che prevedono l'uso delle fibre naturali e di una matrice cementizia (NFRCM) sono

particolarmente adatti a essere utilizzati su supporti in muratura (v. Capitolo 2).



Figura 3.17 Tessuto unidirezionale in fibre di vetro

La scelta di impiego dei nastri in *GF* come ulteriore materiale per l'attività sperimentale è stata condotta al fine di operare un confronto tra il comportamento delle fibre naturali con quello delle fibre sintetiche di medie prestazioni, quali quelle di vetro.

La matrice dei rinforzi è costituita da una malta inorganica cementizia particolarmente adatta per l'impregnazione *in situ* di tessuti secchi.

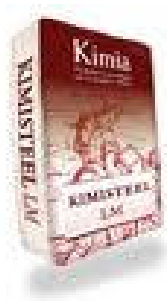


Figura 3.18 Malta cementizia specifica per consolidamenti strutturali con sistemi di rinforzo esterno

Le sue caratteristiche fisiche e meccaniche, riportate nella scheda tecnica del materiale, sono contenute in Tabella 3.3, mentre i tessuti in fibra naturale sono stati caratterizzati meccanicamente eseguendo prove di trazione uniassiale allo scopo di determinarne la resistenza.

Tabella 3.3 *Caratteristiche della malta impiegata*

Caratteristiche	Valore tipico³
Aspetto	Polvere
Colore	Grigio
Massa volumica apparente della malta fresca	+B2: 1750 kg/ m ³
Tempo di inizio presa	+B2: 72 minuti
Tempo di fine presa	+B2: 95 minuti
Resistenza a compressione a 28 gg	+B2: > 45 N/ mm ²
Resistenza a flessione a 28 gg	+B2: > 8 N/ MPa

L'attività sperimentale preliminare si è conclusa con l'analisi delle problematiche relative all'adesione composito – substrato attraverso prove di laboratorio finalizzate allo studio delle modalità di collasso di elementi in laterizio fibrorinforzati.

3.4.1. Prove di trazione su nastri e tessuti in fibre naturali

I tessuti in fibre naturali sono stati sottoposti a prove di trazione diretta per la determinazione del carico di rottura con lo scopo di investigare sulle caratteristiche di resistenza e affidabilità di questi nuovi materiali quando utilizzati come rinforzo strutturale a strutture murarie. Il tipo di prova ha consentito, inoltre, di dare conferma dei dati riportati nelle schede tecniche dei tessuti che li accompagnavano.

³ Le proprietà sono riferite alla malta miscelata con un prodotto specifico (B2), in sostituzione dell'acqua, che garantisce la massima traspirabilità al sistema di rinforzo.

Le prove sono state realizzate utilizzando campioni prelevati da tessuti (Fig. 3.19), aventi lunghezza di prova pari a 200 mm e larghezza di circa 50 mm, in modo tale da ottenere strisce con almeno 24 fili di trama nella direzione di applicazione del carico, in accordo con la [9].



Figura 3.19 Preparazione delle strisce di tessuto

Sono state eseguite prove su un numero di sei provini in fibra bidirezionale di lino e cinque in fibra unidirezionale di canapa (Fig. 3.20); quest'ultima è stata testata anche in presenza di una matrice epossidica bi-componente allo scopo di dimostrare che essa non induce effetti apprezzabili in termini di resistenza e rigidità ma è responsabile solo del diverso comportamento a rottura delle strisce.

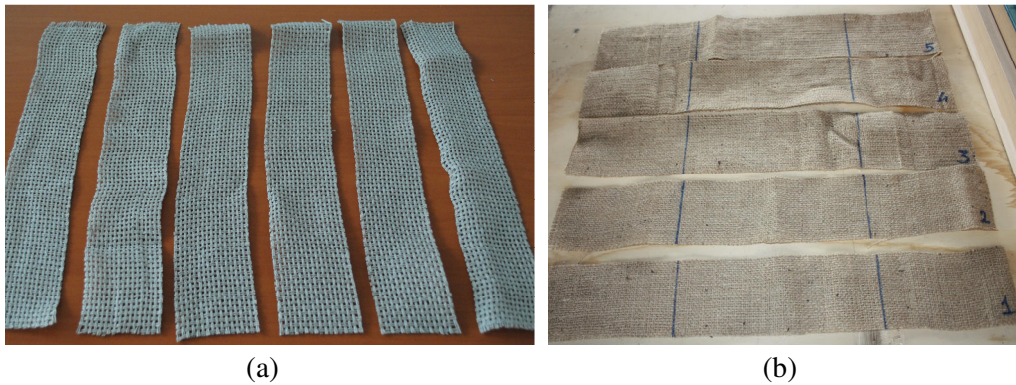


Figura 3.20 Campione di prova:

(a) provini di lino; (b) provini di canapa

In effetti, come già accennato nel Paragrafo 1.5, l'apporto irrigidente esercitato dalla matrice è del tutto trascurabile e nei calcoli generalmente si fa riferimento alla sola sezione trasversale delle fibre. Anche per questo motivo si è scelto di utilizzare una resina sintetica al posto della matrice cementizia oggetto del presente lavoro di ricerca, che ha consentito di ridurre i tempi di attesa prima di poter eseguire il test grazie al minor tempo di maturazione richiesto.

Le prove sono state effettuate in atmosfera normale su provette previamente ambientate, mediante una macchina universale elettromeccanica per prove di trazione/compressione di portata massima pari a 20 kN adatta a eseguire prove ad alta precisione, e condotte in controllo di spostamento della traversa (Fig. 3.21). Prima di ogni prova è stata applicata una pretensione tale da non produrre un allungamento dei campioni superiore al 2%.

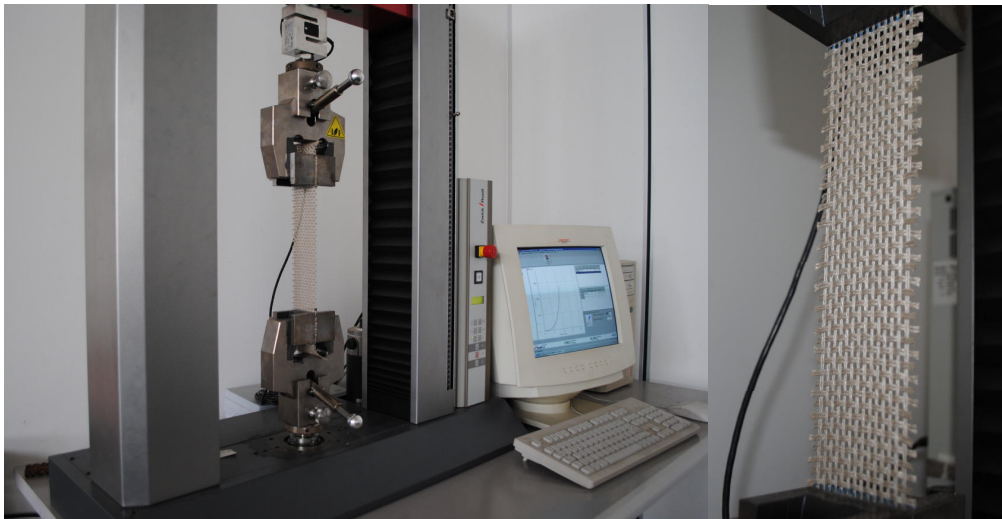


Figura 3.21 *Set-up sperimentale*

Le Figure 3.22 e 3.23 si riferiscono ai diagrammi carico – spostamento ottenuti per il lino e la canapa. I due materiali mostrano un andamento simile sotto il carico uniassiale monotono di trazione e un valore medio del carico ultimo quasi coincidente (Tab. 3.4). Tali valori sono stati utilizzati per calcolare analiticamente la resistenza dei materiali.

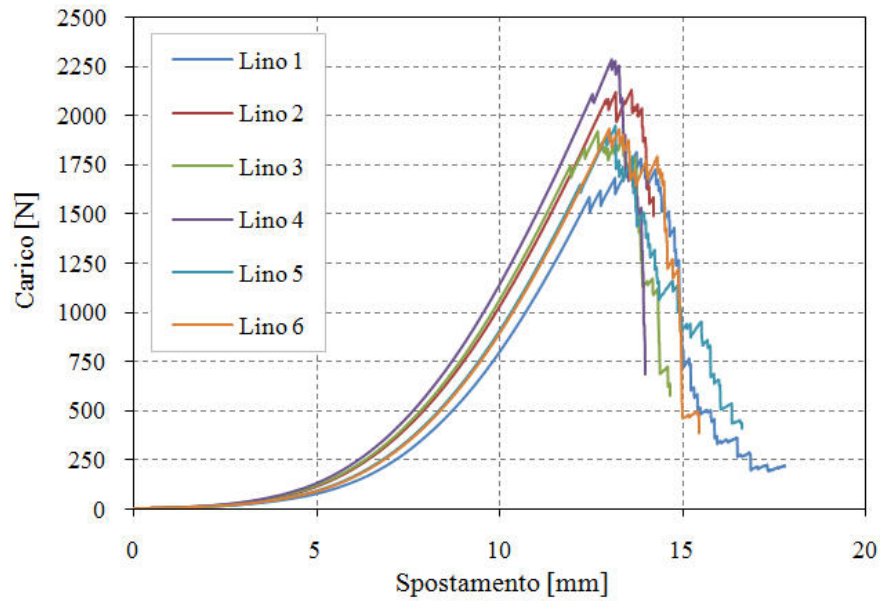


Figura 3.22 Diagramma carico-spostamento per tessuto bidirezionale in fibra di lino

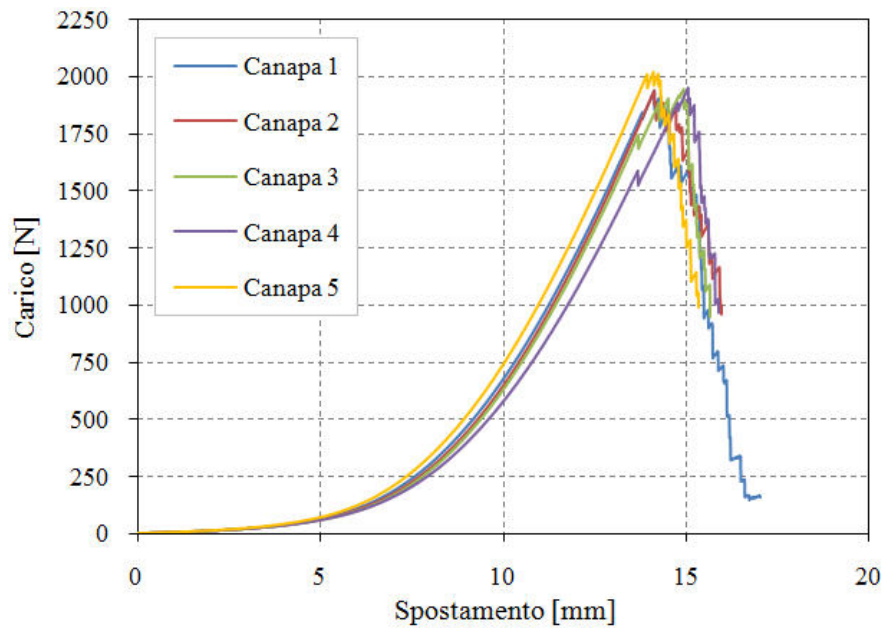


Figura 3.23 Diagramma carico-spostamento per tessuto unidirezionale in fibra di canapa

Tabella 3.4 Risultati delle prove di trazione uniassiale

Tipo di fibra	Carico di rottura P_{max} [N]	P_{medio} [N]	CoV [%]
Lino bidirezionale	1817	2007	7.7
	2132		
	1922		
	2284		
	1949		
	1936		
Canapa unidirezionale	1938	1959	1.7
	1937		
	1946		
	1952		
	2023		

Per calcolare la resistenza a trazione dei tessuti bisogna far riferimento alla sezione resistente unitaria, cioè alla sezione complessiva delle fibre del tessuto in una determinata direzione, riferita all'unità di larghezza. È un parametro che viene calcolato dividendo il peso delle fibre (per unità di superficie) per il peso specifico assoluto del materiale di cui il tessuto è costituito (v. Paragrafo 1.5)

Nel caso specifico, il tessuto monoassiale di canapa ha una massa di 234 g/m²; tenuto conto che il peso specifico della canapa è pari a 1,48 g/cm³ = 1,48 · 10⁶ g/m³, la sezione resistente unitaria secondo la [1.2] è data da:

$$S_e(\text{canapa}) = \frac{234 \text{ g/m}^2}{1,48 \cdot 10^6 \text{ g/m}^3} = 1,58 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = 158 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}.$$

Moltiplicando tale valore per la larghezza di prova della striscia, ($b_f = 53$ mm) si ottiene l'area effettiva per la quale va diviso il valore medio del carico di rottura così da ottenere la resistenza a trazione del materiale:

$$S(\text{canapa}) = S_e \cdot b_f = 158 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 5.3 \cdot 10^{-2} \text{m} = 8.37 \text{mm}^2 ,$$

quindi la resistenza a trazione della canapa sarà data da:

$$\underline{f_t(\text{canapa})} = \frac{P_{\text{medio}}}{S} = \frac{1959 \text{N}}{8.27 \text{mm}^2} = \underline{234 \text{MPa}} .$$

Per il lino bidirezionale si procede allo stesso modo, tenendo conto però che, trattandosi di un tessuto bilanciato, il peso delle fibre lungo ciascuna direzione di tessitura è dato dalla metà della grammatura del materiale. La sezione resistente in una delle due direzioni diventa:

$$S_e(\text{lino}) = \frac{(320 \text{g} / \text{m}^2) / 2}{1.50 \cdot 10^6 \text{g} / \text{m}^3} = 1.07 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}^2}{\text{m}} = 107 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} .$$

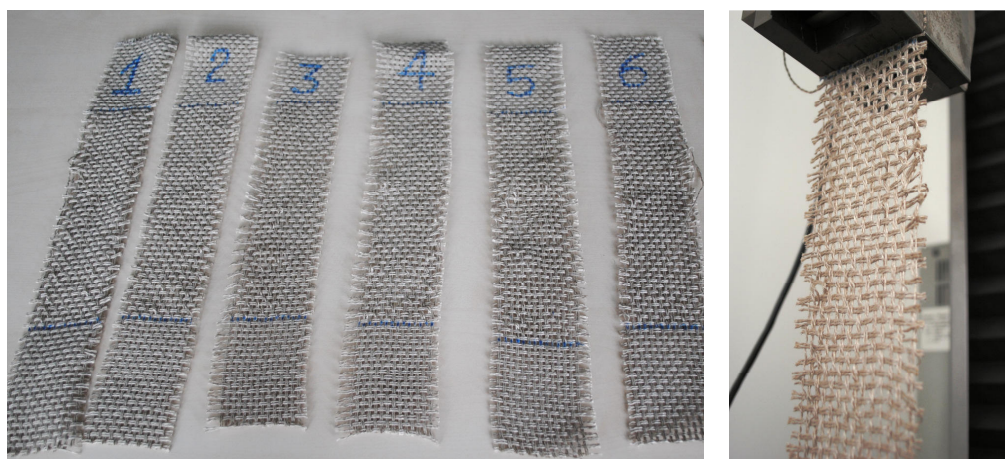
L'area trasversale della striscia sottoposta a trazione sarà:

$$S(\text{lino}) = S_e \cdot b_f = 107 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 5.3 \cdot 10^{-2} \text{m} = 5.70 \text{mm}^2 ,$$

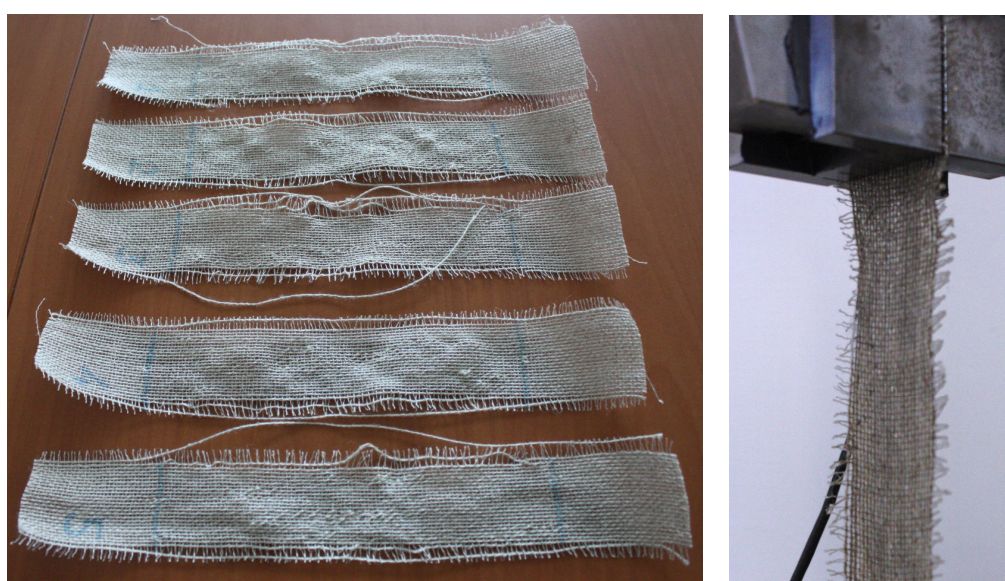
per cui la resistenza a trazione del lino in una delle due direzioni del tessuto è data da:

$$\underline{f_t(\text{lino})} = \frac{P_{\text{medio}}}{S} = \frac{2007 \text{N}}{5.70 \text{mm}^2} = \underline{352 \text{MPa}} .$$

Nelle immagini seguenti (Fig. 3.24) viene mostrata la rottura dei testimoni di tessuto secco: entrambi i tipi di materiale esibiscono la medesima tipologia di crisi consistente in una progressiva lacerazione dei fili costituenti le strisce.



(a)



(b)

Figura 3.24 Modalità di rottura per tessuto secco:
(a) lino bidirezionale; (b) canapa unidirezionale

Ulteriori tests di trazione sono stati condotti per il tessuto di canapa impregnato di una resina epossidica bi-componente. In particolare sono state eseguite cinque prove che hanno evidenziato un andamento pre-picco e un valore medio del carico di rottura pressoché coincidenti con quelli esibiti dal campione di prova riferito al tessuto secco (Fig. 3.23 e 3.25; Tab. 3.4 e 3.5).

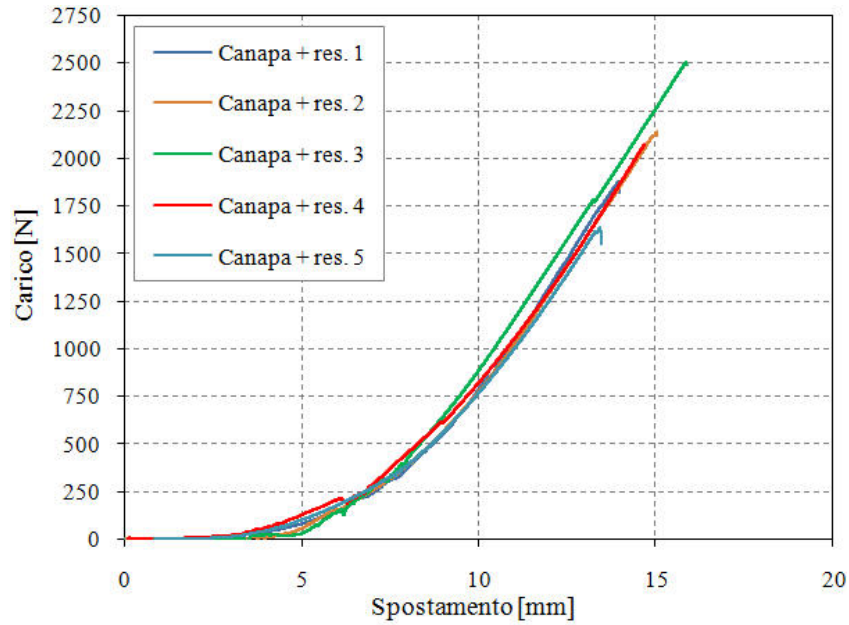


Figura 3.25 Risposta a trazione del tessuto di canapa con resina

Tabella 3.5 Risultati delle prove di trazione sul tessuto impregnato

Materiale	Carico di rottura P_{max} [N]	P_{medio} [N]
	1879	
	2136	
Tessuto di canapa con resina epossidica	2501	2044
	2070	
	1635	

Tuttavia, i tessuti immersi nella matrice epossidica hanno mostrato un comportamento a rottura di tipo fragile con rottura netta della striscia (Fig. 3.26b), rispetto a quelli che ne sono privi che, si ricorda, giungono al collasso non in maniera improvvisa ma graduale per sfibramento dei vari fili costituenti la striscia stessa (Fig. 3.24).

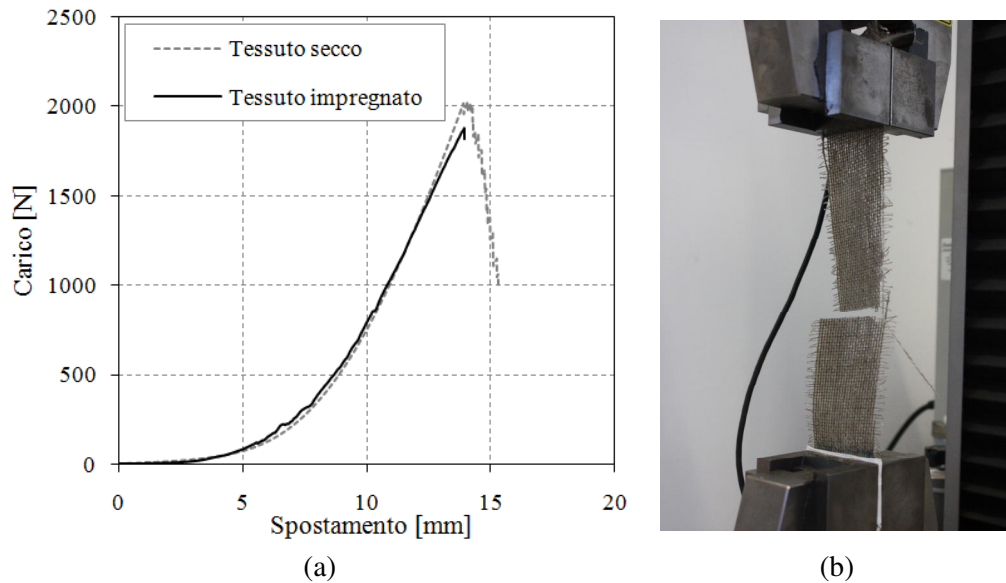


Figura 3.26 *Confronto con il tessuto secco:*
 (a) *Risposta a trazione per tessuto di canapa impregnato e non;*
 (b) *Rottura netta della striscia immersa nella matrice*

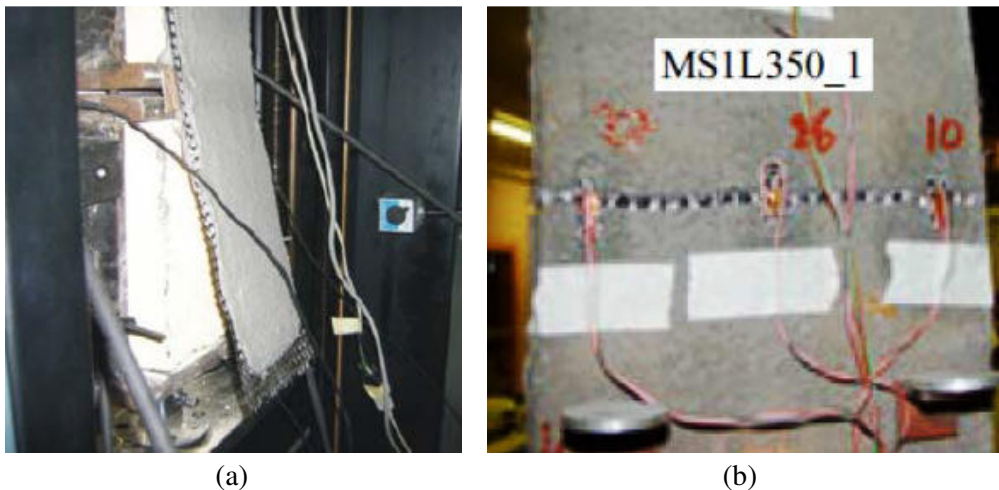
3.4.2. Il problema della delaminazione all'interfaccia tra gli strati

Il comportamento di elementi strutturali rinforzati esternamente con materiali compositi ha come fattore chiave il fenomeno della delaminazione del composito dal supporto. Numerosi studi sperimentali e teorici hanno indagato l'aderenza di FRP su calcestruzzo e negli ultimi anni la ricerca si è concentrata anche sull'aderenza tra FRP e muratura. Il campo di indagine è tuttavia molto esteso data l'eterogeneità dei supporti considerata la varietà di murature esistenti.

In (Ceroni et al. 2003), (Aiello e Sciolti 2005 [10]), e (Accardi ,2006) sono illustrati i risultati di prove di delaminazione su pietre naturali. In (Olivito et al. 2007 [11], 2009 [12]), (Panizza et al 2008) e (Briccoli Bati et al. 2009) vengono presentate prove di aderenza su singolo mattone. Altre sperimentazioni rivolte allo studio del fenomeno su muratura si trovano in (Casareto et al. 2003) e in (Basilio et al. 2005) in cui vengono analizzate le proprietà di aderenza al substrato al variare della lunghezza e della modalità di ancoraggio e al variare della geometria del supporto. Le attività

sperimentali effettuate dimostrano come non solo le proprietà dei materiali, ma anche la geometria dei campioni possono influenzare la crisi per delaminazione.

Più rare in letteratura sono invece prove di delaminazione con compositi a matrice cementizia. In (Briccoli Bati et al. 2004) sono presentate prove di delaminazione con compositi GFRM su supporti in laterizio e confrontate con prove analoghe su laterizi rinforzati con CFRM. Altre prove si trovano in (Faella et al. 2009) e in (Focacci et al. 2009) in cui campioni in muratura di pietra e di mattoni vengono placcati con un composito in CFRM (Fig. 3.27). Ad ogni modo, i risultati sperimentali di prove di delaminazione su elementi strutturali rinforzati con sistemi in FRM, sebbene in numero decisamente inferiore rispetto a quelli presenti per rinforzi con FRP, mostrano la tendenza alla localizzazione del collasso nel rinforzo piuttosto che nel primo strato del supporto (v. Paragrafo 1.6). La possibilità di collasso delle fibre (altra tipologia di rottura molto frequente nei rinforzi a matrice cementizia), invece, può essere esclusa con una attenta progettazione che tenga conto della tendenza a una ripartizione non uniforme delle tensioni in tutta la larghezza del tessuto.



(a)
Figura 3.27 Delaminazione CFRM-Muratura:
(a) perdita di aderenza col supporto (Faella 2009);
(b) sfilamento della fibra nella matrice (Focacci 2009)

Nel presente paragrafo vengono illustrati i risultati di prove di delaminazione su provini costituiti da nastri di fibre unidirezionali di canapa adesi a un supporto in laterizio per mezzo di malta cementizia (H-FRCM). Questo tipo di rinforzo, lo stesso scelto per le prove di taglio descritte nel prossimo capitolo, verrà confrontato con un composito in fibre di canapa immerse in una matrice polimerica (H-FRP) e, ancora, con sistemi più tradizionali costituiti da fibre di vetro (G-FRCM, G-FRP). La descrizione delle prove e la discussione dei risultati ottenuti sono precedute da una breve illustrazione delle modalità di collasso che possono verificarsi eseguendo questo tipo di test.

3.4.2.1. Descrizione delle modalità di crisi

La descrizione delle modalità di collasso riscontrabili in prove di aderenza su supporti rinforzati con materiali compositi riveste un ruolo importante nella comprensione e nella modellazione del fenomeno della delaminazione.

Il collasso può avvenire (Fig. 3.28):

- per rottura a trazione della fibra (modalità A);
- per rottura all'interno del supporto nello spessore immediatamente prossimo all'incollaggio (modalità B);
- per delaminazione nell'interfaccia supporto-rinforzo (modalità C);
- per delaminazione all'interno della matrice nell'interfaccia malta-tessuto (modalità D);
- per sfilamento delle fibre all'interno della matrice (modalità E);

Come noto, la rottura per delaminazione nei compositi con matrice polimerica si manifesta generalmente con l'asportazione di una parte superficiale del supporto in un meccanismo denominato "peeling" (modalità B), da cui discende il ruolo di primo piano giocato dalle caratteristiche

meccaniche del supporto, poiché la tensione di aderenza massima risulta, con buona approssimazione, linearmente proporzionale alla resistenza a trazione del supporto, e l'energia di frattura, linearmente proporzionale alla radice quadrata della resistenza a trazione dello stesso supporto.

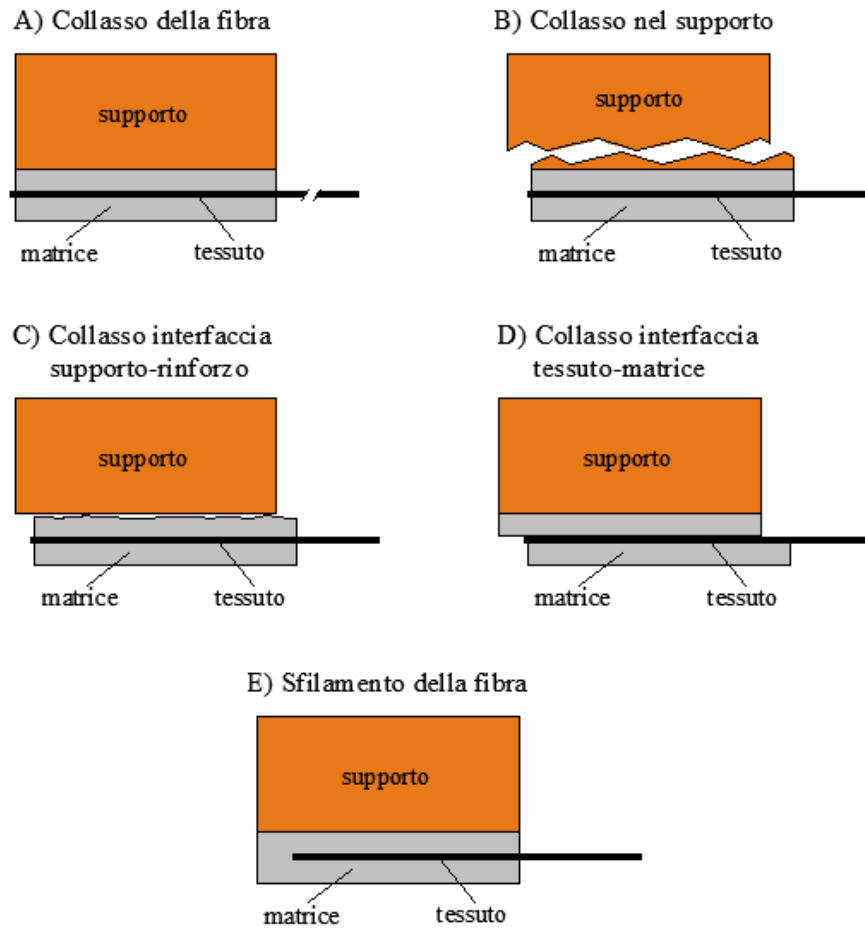


Figura 3.28 Modalità di collasso

Nel caso di compositi con matrice cementizia, come si vedrà nel prosieguo, si incontrano modalità di delaminazione differenti, che per lo più non coinvolgono il supporto ma la matrice stessa.

Nel seguito, per ciascuno dei rinforzi impiegati, si descrivono le modalità di crisi riscontrate.

3.4.2.2. Prove di tipo *pull-out* su laterizi fibrorinforzati

La prova scelta per studiare le problematiche relative all'adesione composito – substrato e, in particolare, per valutare l'interazione tra fibre e matrice cementizia, è un *pull-out test* simmetrico che fa uso di un telaio in acciaio appositamente progettato collegabile a una macchina elettromeccanica di prova. Il laterizio è il materiale di supporto utilizzato per le prove di adesione, le cui caratteristiche meccaniche, determinate sperimentalmente, sono riportate in Tabella 3.1. Il telaio è composto da due elementi in acciaio capaci di contenere un mezzo mattone ciascuno mediante due elementi tubolari, anch'essi di acciaio, ed è stato progettato in modo tale da evitare qualsiasi impedimento al collasso dei campioni (Fig. 3.29).

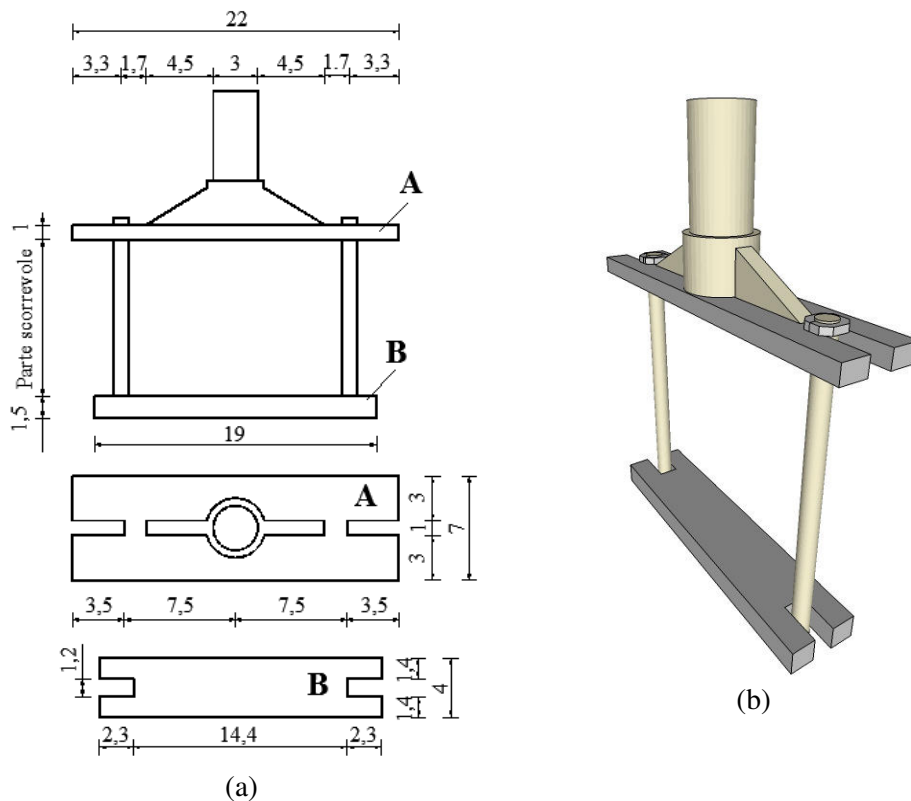


Figura 3.29 Telaio in acciaio:
(a) dimensioni in cm; (b) vista 3D

L'assetto di prova comprende due mezzi mattoni allineati, posti all'interno del telaio e delle dimensioni di 12 x 12,5 x 5,5 cm, con due strisce di rinforzo incollate sulle due superfici laterali in modo tale da distanziare i mezzi mattoni di circa 3,5 cm. Le deformazioni della striscia lungo il rinforzo adesivo sono state misurate tramite quattro estensimetri elettrici a variazione di resistenza da 10 mm applicati su ambo i lati di ciascun provino e collocati all'interno del rinforzo direttamente sulla fibra (Fig. 3.30).

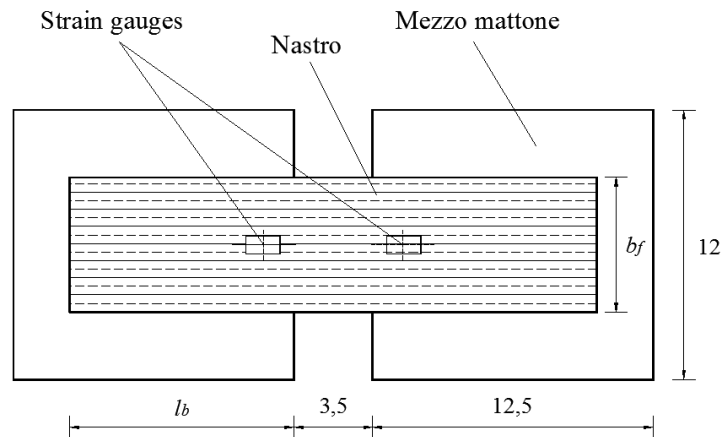
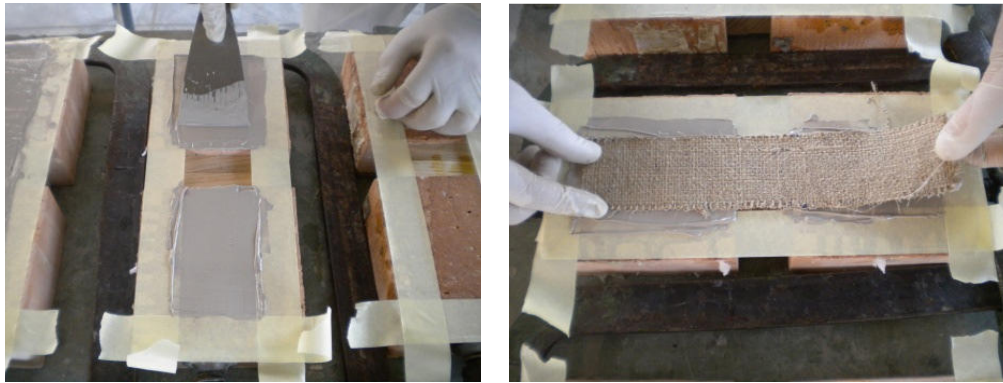


Figura 3.30 Provino rinforzato

Per rendere efficace l'azione delle piastre di contrasto, le facce dei mattoni a contatto sono state levigate e spianate. L'applicazione del rinforzo ha richiesto la spazzolatura del substrato e la successiva rimozione delle polveri al fine di garantire una perfetta planarità della superficie da rinforzare. Dopo l'applicazione del *primer*, necessario per facilitare l'aderenza dello strato di rinforzo, i nastri unidirezionali in fibre di canapa e di vetro sono stati applicati sulla superficie dei provini per mezzo della malta cementizia (Fig. 3.31, Tab. 3.3). La malta che fuoriesce dalle maglie dei tessuti è stata regolarizzata in modo da realizzare un'adeguata copertura delle fibre.

I campioni sono stati sottoposti a prove di trazione uniassiale in controllo di spostamento, con velocità costante pari a 0,2 mm/min, attraverso una macchina elettromeccanica universale *INSTRON 5582 UTM* avente capacità di 100 kN e collegata a un personal computer per l'acquisizione dei dati. La

forza di trazione, applicata alle estremità del dispositivo in acciaio, viene rilevata direttamente dal sistema di controllo della macchina di prova che fornisce il valore della forza totale trasmessa alle fibre del tessuto nelle due facce di ciascun campione. La forza massima di aderenza agente sul singolo rinforzo corrisponde quindi a metà di quella registrata nel corso della prova avendo scelto un setup sperimentale di tipo simmetrico.



(a)

(b)



(c)

Figura 3.31 Fasi di applicazione del rinforzo:
 (a-c) primo e ultimo strato di malta; (b) disposizione del nastro

Durante tutte le prove, monotone fino al punto di rottura, sono stati registrati in tempo reale i valori del carico, degli spostamenti della traversa e delle deformazioni del composito. La Figura 3.32 mostra un campione pronto per la prova dopo un periodo di stagionatura di 28 gg.

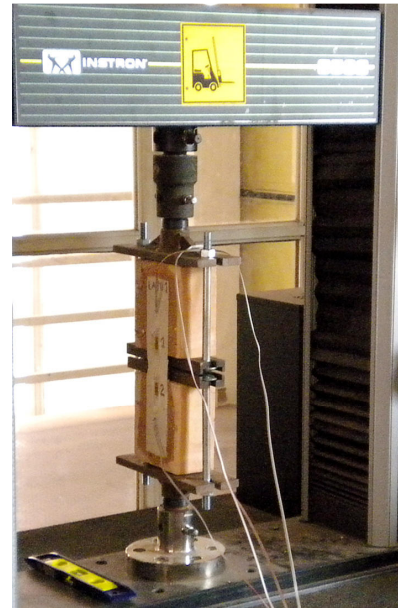
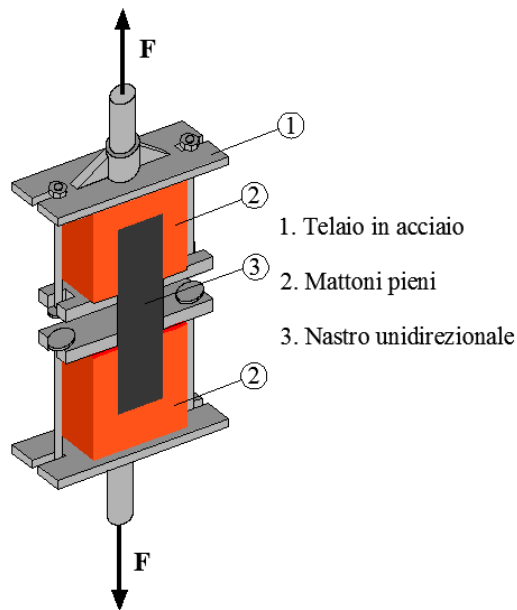


Figura 3.32 Prova di delaminazione

3.4.2.3. Risultati sperimentali

I materiali compositi impiegati per rinforzare i laterizi da sottoporre alle prove di delaminazione sono i seguenti:

- Rinforzo in fibre unidirezionali di canapa e malta cementizia (*H-FRCM*);
- Rinforzo in fibre unidirezionali di canapa e resina epossidica bi-componente (*H-FRP*);
- Rinforzo in fibre unidirezionali di vetro e malta cementizia (*G-FRCM*);
- Rinforzo in fibre unidirezionali di vetro e resina epossidica bi-componente (*G-FRP*);

Sono state utilizzate strisce di tessuto aventi larghezza b_f di 50 mm e lunghezza di ancoraggio l_b di 100 mm. Se si osserva l'andamento del carico di trazione in funzione dello spostamento della traversa (Fig. 3.33 e 3.34) si possono notare le prime differenze tra i vari tipi di rinforzo adottati. I sistemi in FRCM comportano un aumento della duttilità strutturale, se paragonati ai

rinforzi con FRP, specie nel caso dei rinforzi con fibre di canapa. Per le fibre di vetro il comportamento continua a rimanere fragile sebbene si assista comunque a un incremento del campo di spostamento.

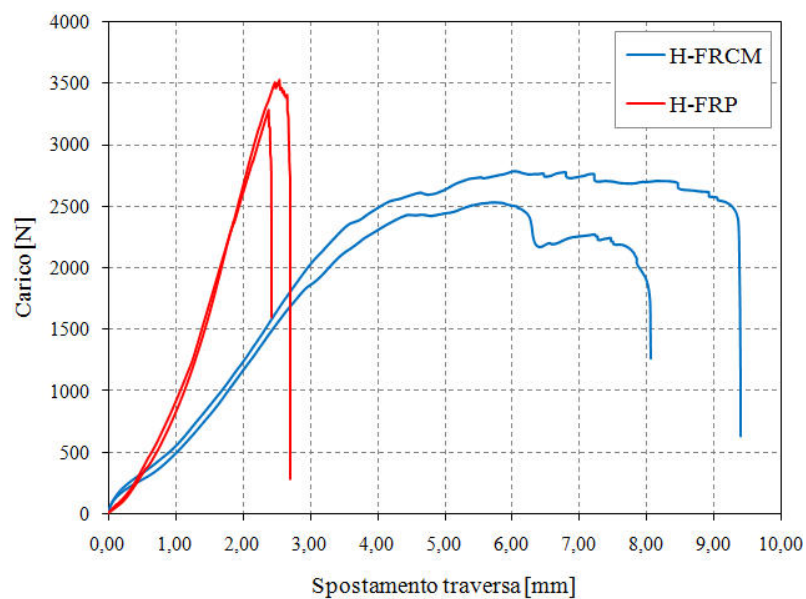


Figura 3.33 Confronto tra i laterizi rinforzati con H-FRCM e H-FRP

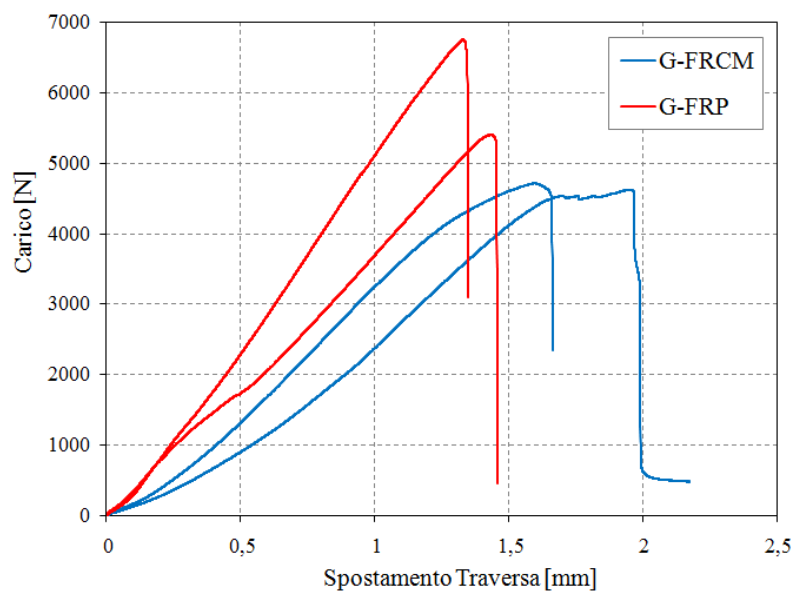


Figura 3.34 Confronto tra i laterizi rinforzati con G-FRCM e G-FRP

In ogni caso, anche se la crisi dei provini rinforzati con malta cementizia risulta meno repentina e quindi più duttile di quella dei provini rinforzati con FRP, i rinforzi in FRCM pagano in termini di carico ultimo di collasso.

La Tabella 3.6 riporta i risultati sperimentali ottenuti. Dall'osservazione delle modalità di crisi riscontrate nelle prove sperimentali, si verificano diverse tipologie di collasso spesso in maniera combinata.

Tabella 3.6 Risultati delle prove di delaminazione

Provino	Modalità di collasso	F_{\max} [N]
H-FRCM 1	Lacerazione dei fili del tessuto – <i>Debonding</i> del composito	2529
H-FRCM 2	Lacerazione dei fili del tessuto – <i>Debonding</i> del composito	2789
H-FRP 1	Parziale rottura dei fili del tessuto	3276
H-FRP 2	Parziale rottura dei fili del tessuto	3525
G-FRCM 1	<i>Debonding</i> del composito	4714
G-FRCM 2	<i>Debonding</i> del composito	4623
G-FRP 1	Rottura della striscia	5402
G-FRP 2	Rottura della striscia	6754

Più specificamente, riguardo i provini rinforzati con H-FRCM, i primi segnali di danneggiamento consistono in una progressiva fessurazione nella malta ortogonale alla direzione del carico, dovuta alla lacerazione dei fili e al successivo sfilamento degli stessi all'interno della matrice (Fig. 3.35a). Una volta raggiunto il carico massimo, parte del rinforzo che si era progressivamente fessurato si distacca completamente dallo strato di malta più interno (*debonding* del composito), la delaminazione progredisce quindi a carico pressoché costante finché l'ancoraggio residuo non consente più la trasmissione del carico di delaminazione e si verifica il distacco completo (Fig. 3.35b).

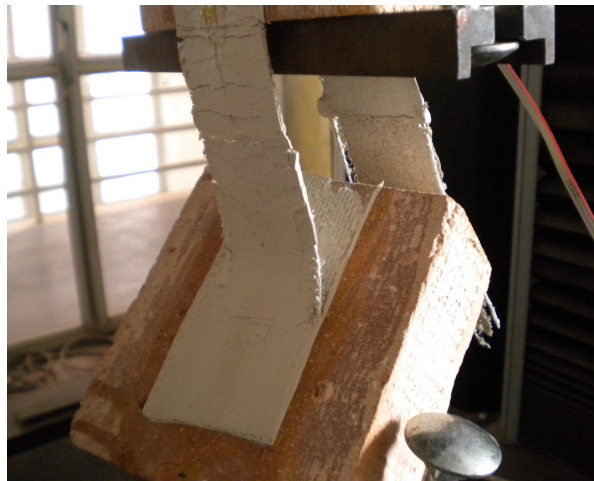
Si deve rilevare che, nonostante la simmetria della prova, il carico non si ripartisce esattamente a metà sulle due facce del provino, a causa delle inevitabili imperfezioni geometriche e meccaniche dell'apparato sperimentale. Ciò comporta il manifestarsi della crisi sui due lati del campione in tempi diversi e con modalità che possono presentarsi in maniera altresì differente, come è evidenziato nella Figura 3.35c, in cui il provino H-FRCM 1 mostra a fine prova una delaminazione parziale su un lato e completa sull'altro.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.35 Modalità di crisi dei provini H-FRCM

Quest'ultimo aspetto è confermato dalla lettura dei trasduttori posti su ambo i lati del provino alla medesima distanza dagli spigoli del mattone. Osservando la Figura 3.36, infatti, si può notare che le diverse curve riferite alle letture dei quattro trasduttori non presentano un andamento sovrapponibile e ciò è imputabile ai problemi inerenti alle piccole eccentricità del carico a causa delle quali si ha un diverso comportamento del rinforzo nei punti di controllo sopramenzionati.

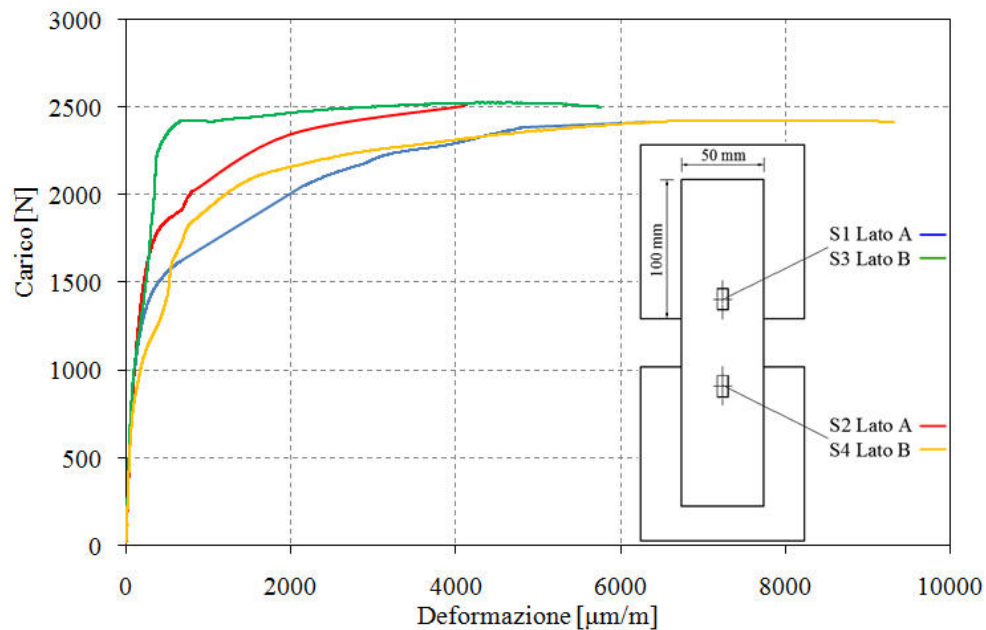


Figura 3.36 Diagramma carico-deformazione per il provino H-FRCM 1

Se si osserva, invece, il legame forza-deformazione per i provini rinforzati con le fibre di vetro e la malta cementizia (G-FRCM) (Fig. 3.37), si nota che le diverse curve, costruite a partire dalle letture degli strain-gauges disposti secondo lo schema rappresentato in Figura 3.36, risultano pressoché coincidenti (almeno nella fase che precede la crisi) evidenziando quindi un comportamento più uniforme del materiale e una minore dipendenza, rispetto ai campioni rinforzati con le fibre naturali, dai problemi intrinseci alla tipologia di prova scelta. La rottura, di contro, risulta essere più fragile; si osserva una delaminazione simile a quella verificatasi per i provini con H-FRCM, che si manifesta all'interno della matrice nel piano individuato dalle

fibre (Fig. 3.38). Lo strato di malta di incollaggio si suddivide in due fogli sovrapposti, il primo rimane adeso al supporto, mentre il secondo viene asportato dal rinforzo (modalità D). Il fenomeno di *debonding*, in questo caso, non è stato preceduto dalla fessurazione nella malta e dalla lacerazione dei fili comportando quindi una minore duttilità e una rottura più repentina dell'elemento rinforzato.

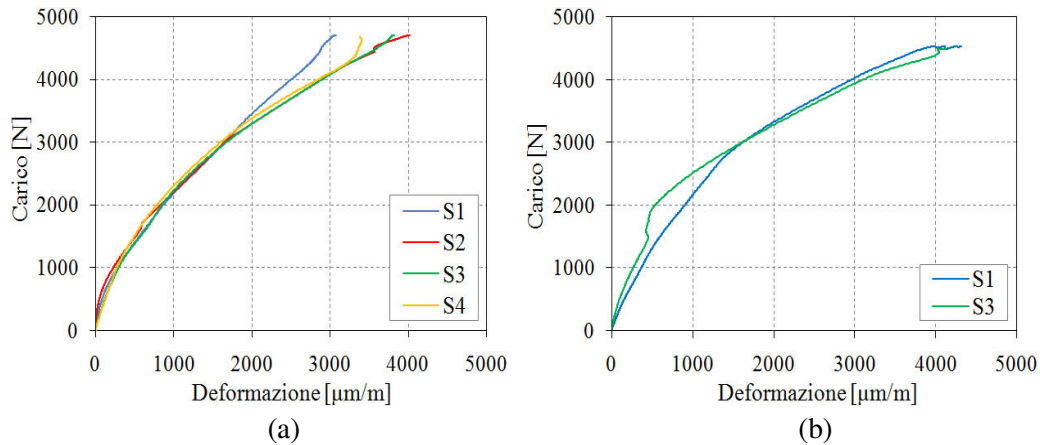


Figura 3.37 Diagrammi carico-deformazione per i provini:
(a) G-FRCM 1; (b) G-FRCM 2



Figura 3.38 Delaminazione dei provini con G-FRCM

Nel caso dei rinforzi con H-FRCM, infatti, la modalità con cui si manifesta il successivo sfilamento delle fibre (*pull-out failure*) che si protrae

dagli strati più esterni fino al nucleo del filato, si combina a un secondo meccanismo di crisi che coinvolge i filamenti più esterni, i quali, prima di subire l'estrazione dalla matrice cementizia, giungono a rottura per il superamento della resistenza a trazione ultima (*tensile failure*); in questo modo la perdita di efficacia del rinforzo diminuisce gradualmente garantendo una maggiore dissipazione di energia di rottura e quindi la duttilità che li contraddistingue (Fig. 3.39). Nelle sperimentazioni con gli FRCM, quindi, l'interfaccia tra fibra e matrice si è mostrata l'elemento debole. Si vedrà successivamente che la presenza di più strati di tessuto e una maggiore lunghezza di ancoraggio migliorano le prestazioni di aderenza.

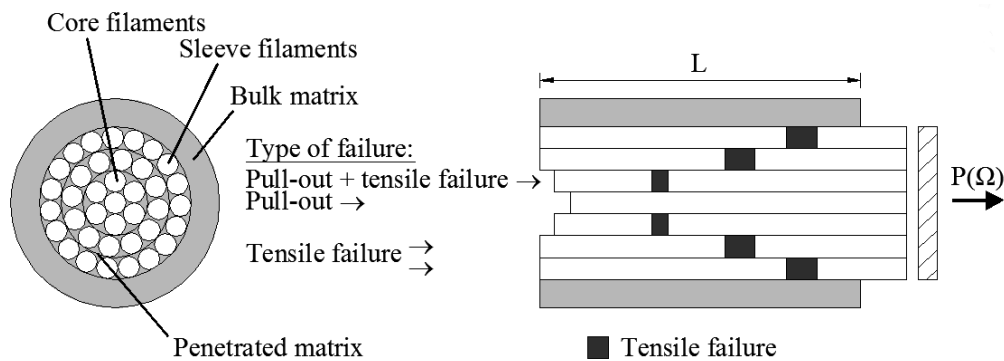


Figura 3.39 Meccanismi di crisi di un rinforzo annegato in una matrice cementizia

Le prove invece sui laterizi rinforzati con FRP hanno fornito tutte la medesima tipologia di rottura (Fig. 3.40). Il collasso è avvenuto in maniera fragile e ha interessato la rottura a trazione della striscia di rinforzo nella parte in cui essa non è incollata al substrato. In Figura 3.41 si riportano i risultati sperimentali ottenuti.

In particolare, la modalità di crisi esibita dal rinforzo in tessuto di canapa e matrice polimerica (H-FRP) si trova in accordo con quanto riscontrato nelle prove di trazione diretta su tessuti descritte in precedenza. Inoltre, eseguendo un confronto tra le resistenze del materiale calcolate sulla base dei risultati ottenuti dalle due prove, considerando la metà del carico ultimo per la prova di delaminazione e le differenti larghezze dei nastri, si ha una buona corrispondenza tra i risultati.



a) b)
Figura 3.40 Crisi per i laterizi con FRP:
 a) H-FRP 1; b) G-FRP 1

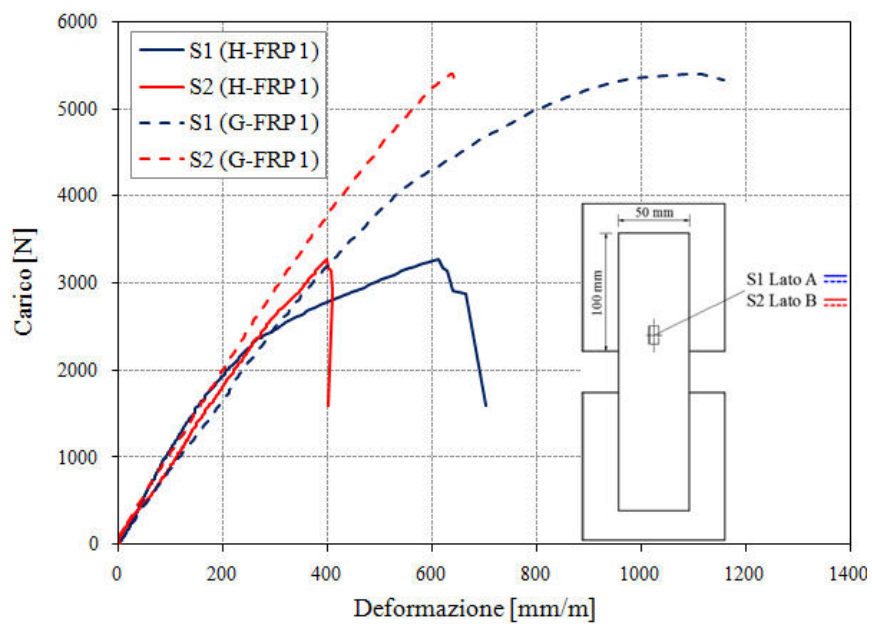


Figura 3.41 Curve carico-deformazione per i rinforzi con FRP

3.4.2.4. Confronto con le linee guida CND-DT 200

A conclusione dell'attività sperimentale preliminare si è operato un confronto dei risultati sperimentali con quelli delle espressioni fornite dalle

linee guida CNR-DT 200/2004, che rappresentano allo stato attuale il riferimento normativo italiano relativo ai rinforzi con compositi.

La forza di delaminazione può essere determinata attraverso la seguente relazione:

$$F_{\max} = b_f \sqrt{2 \cdot E_f \cdot t_f \cdot \Gamma_F} \quad [3.1]$$

nella quale b_f , E_f e t_f rappresentano rispettivamente la larghezza, il modulo elastico e lo spessore del rinforzo, mentre Γ_F è l'energia specifica di frattura. Quest'ultima può essere definita attraverso due differenti approcci (in accordo a quanto specificato nell'ultimo aggiornamento delle suddette linee guida), e in particolare:

- approccio 1:

$$\Gamma_F = k_b k_G \tau_{b,\max} = k_b k_G \frac{f_{bm} \cdot f_{btm}}{f_{bm} + f_{btm}} \quad [3.2]$$

- approccio 2:

$$\Gamma_F = k_b k_G \sqrt{f_{bm} \cdot f_{btm}} \quad [3.3]$$

nelle quali:

- k_b è un coefficiente correttivo adimensionale di tipo geometrico fornito dalla [1.3], dipendente dalla larghezza del rinforzo e dell'elemento rinforzato, nel presente caso pari a 1,35;
- f_{bm} e f_{btm} sono i valori medi delle resistenze a compressione e a trazione dei blocchi che costituiscono la muratura, rispettivamente pari a 67,3 e 3,7 MPa;
- k_G è un ulteriore coefficiente correttivo tarato sulla base di risultati di prove sperimentali, espresso in mm e dipendente dal tipo di muratura. Tale parametro, determinato in base a quanto proposto nelle [13] in funzione dei parametri meccanici del laterizio, risulta pari a 0,031 mm.

Le proprietà meccaniche delle fibre di canapa e di quelle di vetro sono indicate in Tabella 3.7. La Tabella 3.8, invece, riporta il confronto tra la forza massima trasmissibile al rinforzo ricavata dai dati sperimentali e quella teorica ottenuta dalle [3.1], [3.2] e [3.3], per gli elementi in laterizio fibrorinforzati a matrice cementizia che hanno mostrato una crisi per delaminazione.

Tabella 3.7 *Caratteristiche geometriche e meccaniche dei compositi testati*

Tipo di fibra	b_f [mm]	E_f [GPa]	t_f [mm]
Canapa	50	22	0,155
Vetro	50	71	0.114

Tabella 3.8 *Carico di rottura sperimentale e teorico*

Provino	Valore medio carico di rottura sperimentale [N]	Carico di rottura teorico (approccio 1) [N]	Carico di rottura teorico (approccio 2) [N]
H-FRCM	1330	1572	3354
G-FRCM	2334	2422	5168

I risultati sperimentali presentano un sostanziale accordo con quelli ottenuti applicando le espressioni secondo l'approccio 1. Va precisato comunque che le formulazioni contenute nel DT 200 sono esplicitamente riferite a compositi a matrice polimerica per cui il Documento non tiene conto dello spessore rilevante della matrice cementizia e soprattutto della modalità di delaminazione che si manifesta all'interno della matrice piuttosto che nel supporto. In base a quanto esposto, si capisce come la rappresentazione analitica e quindi la previsione del comportamento di un'applicazione di questo tipo sia attualmente un problema per i ricercatori del settore.

3.5. Bibliografia

- [1] A. Avorio, A. Borri, M. Corradi, *Ricerche per la ricostruzione*, Regione dell'Umbria, Edizioni DEI Tipografia del Genio Civile, Roma (2002).
- [2] M.R. Valluzzi, D. Tinazzi, C. Modena, *Rinforzi di murature con laminati di FRP*, *Costruire in laterizio*, 88, pp. 64-69 ISSN: 0394-1590 (2002).
- [3] G. Marcari, G. Manfredi, A. Prota, M. Pecce, *In-plane shear performance of masonry panels strengthened with FRP*, *Journal of Composites for Construction*, 10(3), pp. 223-233 (2006).
- [4] F. Parisi, I. Iovinella, A. Balsamo, N. Augenti, A. Prota, *Indagine sperimentale sulla resistenza a taglio della muratura di tufo rinforzata con materiali compositi a matrice inorganica*, 14th Italian Conference on Earthquake Engineering (ANIDIS 2011), Bari, 18-22 Settembre (2011).
- [5] DM del 14/01/2008, Norme Tecniche per le Costruzioni.
- [6] UNI, 2002. *EN 772-1: Metodi di prova per elementi di muratura - Determinazione della resistenza a compressione*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione.
- [7] UNI, 2007. *UNI EN 1015-11: Metodi di prova per malte per opere murarie - Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione.
- [8] UNI, 2003. *UNI EN 1052-3: Metodi di prova per muratura - Determinazione della resistenza iniziale a taglio*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione.

- [9] UNI, 1999. *UNI EN ISO 13934-1: Proprietà a trazione dei tessuti – Parte 1: Determinazione della forza massima e dell'allungamento alla forza massima usando il metodo su striscia*, Ente Nazionale Italiano di Unificazione.
- [10] M.A. Aiello, S.M. Sciolti, *Bond Analysis of masonry structures strengthened with CFRP sheets*, Construction and Building Material, Elsevier, Vol. 20, pp. 90-100, (2006).
- [11] R.S. Olivito, F.A. Zuccarello, E. Milani, A. Tralli, *FRP reinforced bricks: delamination tests*, Atti del Convegno IPMM 2007, Salerno, 25-29 Giugno (2007).
- [12] R.S. Olivito, A. Venneri, F.A. Zuccarello, *An experimental equipment for delamination tests of FRP reinforced bricks*, III Convegno Nazionale Meccanica delle Strutture in Muratura Rinforzate con Compositi (MURICO3), Venezia, 22-24 Aprile (2009).
- [13] CNR, 2004. *CNR-DT 200/2004, Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati – Materiali, Strutture di c.a. e di c.a.p., Strutture murarie*, Consiglio Nazionale delle Ricerche.
- [14] R.S. Olivito, R. Codispoti, F.A. Zuccarello, *Applicazione di materiali compositi in fibre naturali e malta cementizia a strutture murarie*, Atti del convegno XX Congresso dell'Associazione Italiana di Meccanica Teorica e Applicata (AIMETA), Bologna, (2011).

Capitolo 4

Comportamento sperimentale a taglio nel piano di pannelli rinforzati

4.1. Prove di taglio sulle murature

La valutazione della resistenza a taglio di pareti in muratura è un parametro necessario al fine di determinare la vulnerabilità sismica degli edifici e di progettare i relativi interventi di miglioramento o di adeguamento sismico. Questo parametro, unitamente alla resistenza a compressione, alla duttilità e alle rigidezze normali e a taglio, deve essere ottenuto da prove sperimentali realizzate in laboratorio o preferibilmente *in situ*. Nel corso degli anni alcune sperimentazioni sono state realizzate da ricercatori stranieri e italiani sull'argomento ottenendo risultati molto dispersi in funzione del tipo di prova e delle diverse tessiture murarie.

Le prove che con maggiore frequenza vengono utilizzate per la definizione delle caratteristiche taglienti della muratura sono quella di *taglio-compressione* (Fig. 4.1a) e quella di *compressione diagonale* (Fig. 4.1b).

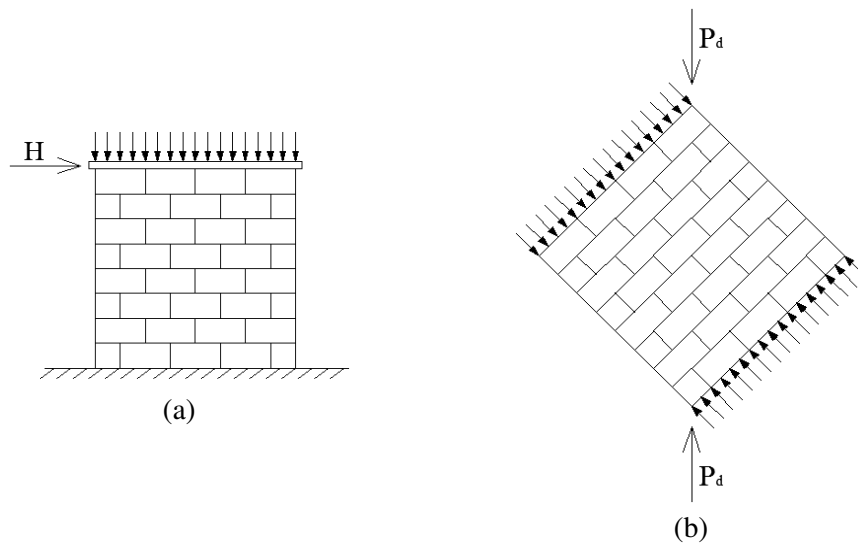


Figura 4.1 Prove a taglio:
 (a) carico orizzontale; (b) carico diagonale

Il primo schema di prova consiste nell'applicazione di una forza orizzontale tagliante, di tipo ciclico o monotono, alla sommità del pannello in presenza di un carico verticale costante. La prova è stata adottata per la prima volta da (P. Sheppard 1980) e più tardi in Italia da (Vignoli et al. 1999) mentre, a livello normativo, il criterio di resistenza da adottare è indicato nell'Eurocodice 6.

La metodologia di prova indicata con (b) veniva invece suggerita dal D.M. del 1987 [1] e oggi la possibilità di utilizzarla è confermata nella Circolare 02/02/2009 n.617 [2] al § C11.10.3.2.1. Le prove di compressione diagonale presentano una maggiore semplicità esecutiva rispetto alle prove di taglio con compressione fissata e per questo maggiormente adottate per lo studio del comportamento a taglio delle murature. La tipologia di prova è stata utilizzata *in situ* in Italia da Chiostrini et al. (2000) e da Brignola et al. (2006) su murature storiche della Toscana, Corradi et al. (2002, 2003), Baila et al. (2011) per murature dell'Umbria. Numerose altre sperimentazioni hanno riguardato indagini di laboratorio in cui si è cercato di riprodurre con non poche difficoltà murature di pietrame e di mattoni pieni per la valutazione della resistenza e rigidezza a taglio di pannelli murari non rinforzati e

rinforzati (Anzani et al. 1998, Corradi et al., Valluzzi et al. 2001, Corradi et al. 2008).

In tutti i casi, come già accennato, le numerose sperimentazioni realizzate negli anni, in cui si è scelto di utilizzare un metodo piuttosto che l'altro, hanno mostrato una certa dispersione dei dati in funzione anche delle diverse murature (per tessitura, materiali componenti, geometria delle sezioni, etc.). Alcuni Autori [3], ad esempio, hanno dimostrato la notevole influenza che il tipo di prova determina sui risultati individuando, sulla base di considerazioni e elaborazioni numeriche, un valore di conversione tra i risultati ottenuti dalle due prove: $r = \tau_k^{t-c} / \tau_k^{diag}$.

La presente sperimentazione ha riguardato lo studio del comportamento a taglio per azioni nel piano di pannelli rinforzati esternamente con compositi in fibre naturali a matrice cementizia. In particolare, l'analisi sperimentale ha affrontato la simulazione dell'azione tagliente attraverso l'esecuzione di prove di compressione diagonale su pannelli rinforzati e non. Lo scopo principale è stato quello di verificare l'efficacia del rinforzo in termini di capacità resistente e di rigidezza al taglio, valutata sulla base dei risultati ottenuti su campioni testati senza rinforzo. La scelta della metodologia di prova, quindi, non ha interessato le problematiche relative all'affidabilità di uno o dell'altro metodo nel rappresentare meglio il reale comportamento della muratura sottoposta a forze taglienti, ma ha riguardato piuttosto la facilità di esecuzione e la ripetibilità delle prove. Quest'ultimo aspetto è di fondamentale importanza per valutare con maggiore sensibilità l'accettabilità del confronto tra i risultati.

4.2. Prove di compressione diagonale

Le prove di laboratorio sono state eseguite su un totale di 13 pannelli murari a una testa, di dimensioni 51 x 51 x 12 cm ($b \times h \times s$), in mattoni di laterizio pieno posati con giunti di malta cementizia di spessore di circa 1 cm (Fig. 4.2). Le caratteristiche meccaniche ed elastiche dei materiali costituenti la muratura sono indicati in Tabella 3.1.

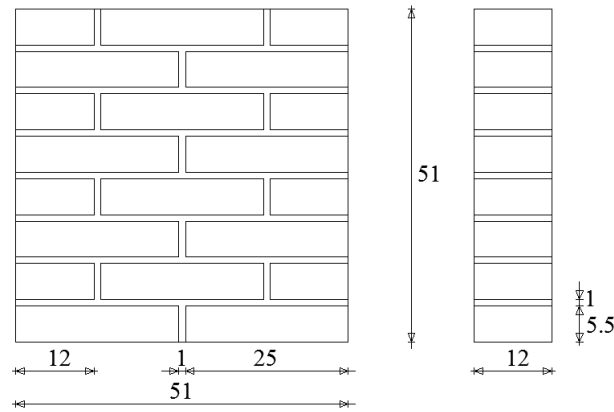


Figura 4.2 Dimensioni (in cm) dei muretti confezionati

I campioni murari, dopo un periodo di stagionatura di 28 gg, sono stati rinforzati su ambo i lati con strisce di materiale composito disposte secondo due *configurazioni geometriche di applicazione*:

- *in diagonale*;
- *a griglia ortogonale*.

Alcuni provini sono stati testati privi di rinforzo quali termini di riferimento per i successivi pannelli rinforzati (Fig. 4.3). La maturazione dei rinforzi ha richiesto il medesimo periodo di stagionatura dei muretti.

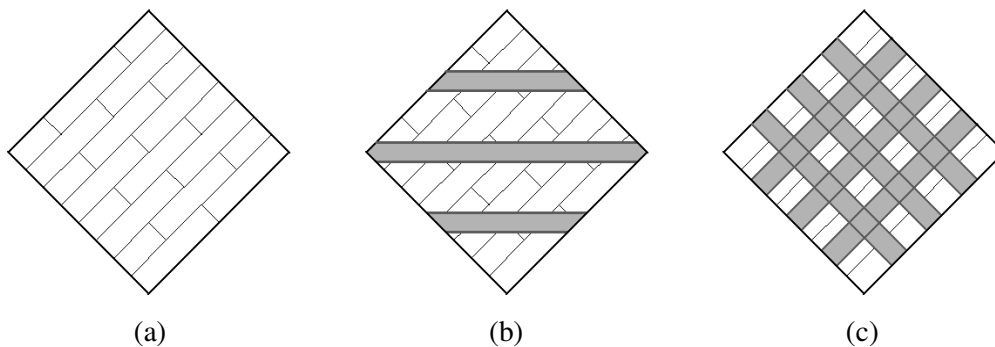


Figura 4.3 Configurazione dei pannelli sottoposti a compressione diagonale:
(a) senza rinforzo; (b) rinforzi in diagonale e (c) a griglia ortogonale

Nella effettiva configurazione di prova, la disposizione a griglia fornisce strisce di materiale composito posizionate a 45° rispetto al piano di rottura

(coincidente con la diagonale compressa del pannello), mentre la disposizione in diagonale si identifica con la posizione delle fibre ortogonali al piano di rottura, ossia direttamente contrastante con l'apertura del pannello.

Nelle Istruzioni del CNR [4] al § 5.4.1.2.2, viene contemplata la possibilità di disporre di rinforzi da applicare esternamente a pannelli murari secondo le due disposizioni geometriche menzionate, valutando, però, solo il contributo di resistenza a taglio apportato dal rinforzo disposto parallelamente ai ricorsi di malta.

Si è invece escluso di applicare i compositi su una sola faccia dal momento che diversi lavori sperimentali sul medesimo argomento hanno evidenziato che l'asimmetria nella disposizione del rinforzo comporta, come prevedibile, una notevole differenza di rigidità sulle due facce opposte dei pannelli. Questi, di contro, esibiscono una deformazione flessionale lungo la diagonale caricata provocando l'anticipazione della formazione di fessure sul lato non rinforzato, in molti casi con valori del carico ultimo perfino inferiori a quelli di riferimento (provini senza rinforzo). Occorre precisare comunque che nella realtà costruttiva ogni setto murario risulta in condizioni di vincolo tali da rendere spesso ininfluenza il fenomeno dello svergolamento fuori dal piano rispetto alla fessurazione diagonale dovuta alla sola azione del taglio. Ne consegue che la scelta di non prendere in considerazione tale configurazione dei pannelli è relativa esclusivamente al tipo di test adottato.

I materiali compositi adoperati sono descritti nel capitolo precedente. Essi sono costituiti da strisce uni e bi-direzionali in fibre naturali, rispettivamente di canapa e di lino, ricavate da tessuti e applicate sui provini murari mediante l'uso di una matrice cementizia. Per valutare l'efficacia delle fibre naturali e poter eseguire un confronto con le fibre più comunemente impiegate negli interventi di rinforzo strutturale, alcuni provini sono stati testati utilizzando un tessuto costituito da fibre unidirezionali di vetro immerse nella stessa matrice in cui sono state impregnate le fibre naturali. Le modalità e le fasi di applicazione dei rinforzi a matrice cementizia sono state descritte nel Paragrafo 2.4 in cui si riportano le immagini relative alla preparazione dei provini prima dell'esecuzione delle prove.

Le diverse caratteristiche di resistenza e rigidità delle fibre adottate comportano, per le diverse modalità applicative considerate, un diverso dimensionamento del rinforzo in termini di larghezza e spessore delle strisce.

Al fine di ottenere risultati comparabili e poter quindi effettuare un confronto in termini di rigidità e di capacità tagliante e deformativa, è stata considerata la stessa quantità di rinforzo per le due configurazioni geometriche utilizzate. In particolare, la quantità $E_f \rho_f$ è stata mantenuta costante per tutte le prove eseguite sui pannelli rinforzati, dove ρ_f rappresenta il rapporto geometrico del rinforzo ($\rho_f = \textit{geometric reinforcement ratio}$) calcolato come segue [6]:

$$\rho_f = \frac{(b_f \cdot t_f) \cdot \cos \alpha}{h \cdot b} \quad [4.1]$$

dove b_f e t_f sono la larghezza e lo spessore totale del composito nella direzione ortogonale alla fessurazione diagonale, α è l'angolo tra la direzione delle fibre del tessuto e le linee dei mattoni, mentre h e b sono l'altezza e lo spessore del pannello murario (pari a 51 e 12 cm rispettivamente). In Tabella 4.1 sono contenute le caratteristiche delle fibre dei rinforzi utilizzati.

Tabella 4.1 *Proprietà dei tessuti testati*

Tipo di fibra	E_f [GPa]	t_f [mm]
Canapa	22	0,155
Lino	18	0.194
Vetro	84	0.114

I campioni nella configurazione non rinforzata sono indicati con la sigla *URM* (*Un-Reinforced Masonry*). La denominazione adottata per le prove con rinforzo indica:

- il tipo di fibra utilizzata (Canapa: $H \rightarrow$ Hemp; Lino: $F \rightarrow$ Flax; Vetro: $G \rightarrow$ Glass);
- la disposizione geometrica adottata (a griglia: $G \rightarrow$ Grid; in diagonale: $D \rightarrow$ Diagonal);

- la larghezza b_f della striscia di composito (in cm);
- il numero di strati applicati.

Le caratteristiche dei rinforzi incollati ai pannelli murari sono sintetizzati in Tabella 4.2. Tutti i provini presentano la stessa quantità di rinforzo ma un diverso rapporto ρ_f a causa delle loro differenti proprietà meccaniche.

Tabella 4.2 Caratteristiche dei muretti testati

Denominazione provino	Numero	Configurazione del rinforzo	Larghezza tot del rinforzo per lato [mm]	Rapporto geometrico del rinforzo [%]
<i>URM</i>	4	-	-	-
<i>HG4_4</i>	1	Grid	240	0,34
<i>HG8_2</i>	1	Grid	480	0,34
<i>FG8_1</i>	1	Grid	480	0,43
<i>FD5,5_4</i>	1	Diagonal	165	0,43
<i>FD11_2</i>	1	Diagonal	330	0,43
<i>GG5,5_1</i>	2	Grid	330	0,09
<i>GD7,8_1</i>	2	Diagonal	234	0,09

4.2.1. Strumentazioni e modalità di prova

Le prove di taglio nel piano sui provini in muratura sono state condotte con l'impiego di un telaio di contrasto composto da quattro montanti realizzati da due travi di acciaio U120, saldati e ancorati a terra, collegati tra loro mediante quattro traversi del tipo U120 posti in sommità (Fig. 4.4 e 4.5). I vari elementi sono collegati mediante bulloni ad alta resistenza, appartenenti alla classe 8.9 (resistenza a trazione = 800 N/mm^2 , tensione di snervamento = $0,9 \times 800 \text{ N/mm}^2$), serrati con chiave dinamometrica. Il carico verticale di compressione è stato conferito ai muretti attraverso un attuatore elettromeccanico opportunamente ancorato al telaio e provvisto di una cella di

carico da 50 kN. Quest'ultima è stata collegata a una centralina di acquisizione dati.

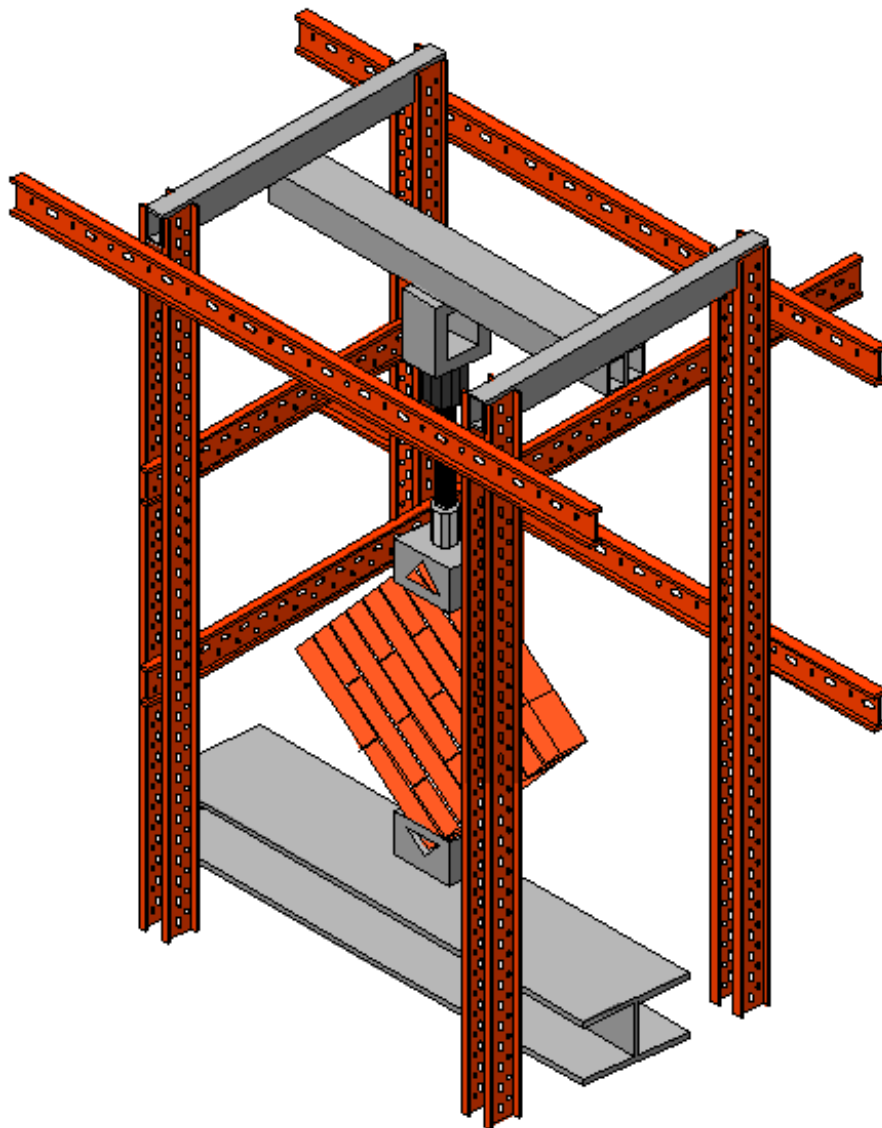
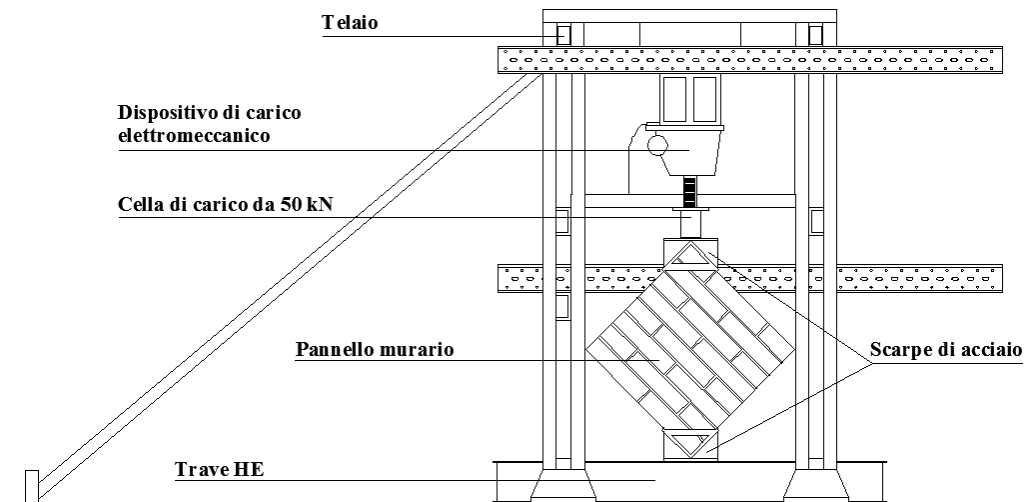
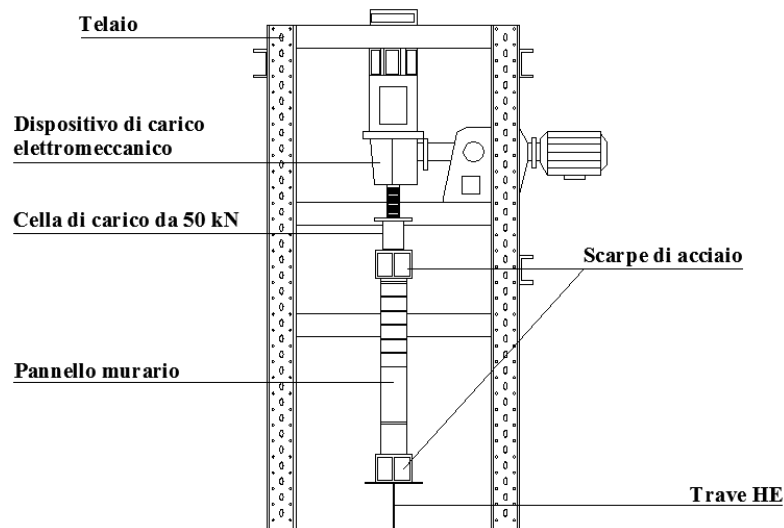


Figura 4.4 Schematizzazione 3D del telaio di prova



a)



b)

Figura 4.5 Telaio di prova:
a) vista frontale; b) vista laterale

Per poter applicare la forza verticale lungo una diagonale del pannello, sono stati impiegati due elementi metallici di ripartizione del carico (“scarpe” di acciaio) disposti in corrispondenza dei due spigoli opposti. Questi sono stati appositamente studiati e dimensionati secondo le specifiche ASTM [7],

allo scopo di evitare un'eccessiva concentrazione di tensione nelle zone del provino a contatto con essi. La fase del loro posizionamento è stata meticolosamente seguita per ridurre al minimo le eccentricità tra la direzione di applicazione del carico e l'asse geometrico verticale dei muretti. Tra le scarpe di acciaio e la superficie libera del pannello, inoltre, è stato realizzato un letto di malta a presa rapida a base di cemento antiritiro per evitare rotture fragili locali della muratura e per realizzare spigoli a 90° aderenti alle superfici interne degli angolari. A presa avvenuta, il pannello è stato ruotato a 45° e posizionato su una trave di acciaio del tipo HE 200A per assumere la configurazione di prova.

Per la misurazione degli spostamenti relativi subiti da ciascun pannello lungo le sue diagonali, sono stati applicati due trasduttori lineari di spostamento induttivo (LVDT), aventi una base di misura g di 27,5 cm (Fig. 4.6).

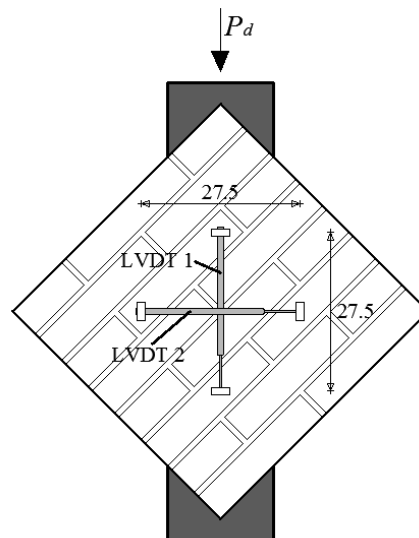


Figura 4.6 Schema della prova di compressione diagonale e disposizione degli strumenti di misurazione

Gli spostamenti verticali, paralleli al carico applicato (P_d) e misurati sui due paramenti di ogni provino, sono stati indicati con ΔV_1 e ΔV_2 , mentre quelli orizzontali (ortogonali al carico applicato) con ΔH_1 e ΔH_2 , adottando la

simbologia della norma di riferimento [7]. Le letture dei quattro trasduttori hanno fornito valori di spostamento confrontabili sui due lati per tutti i pannelli oggetto della presente sperimentazione, evidenziando un comportamento che si è mantenuto nel piano durante il corso delle prove, escludendo quindi meccanismi di danno di tipo flessionale.

4.2.2. Interpretazione della prova secondo *ASTM E 519-07*

Le prove di compressione diagonale sono state eseguite secondo le specifiche *ASTM* [7]. Lo scopo della prova è la determinazione della resistenza a taglio e del modulo di elasticità tangenziale della muratura.

La tipologia della prova viene interpretata dalla norma assumendo che nel baricentro del pannello si produca uno stato tensionale di taglio puro. Il cerchio di Mohr, rappresentativo dello stato tensionale, risulta centrato nell'origine del sistema di riferimento (σ, τ) con tensione tangenziale τ pari al raggio e , in valore assoluto, alle tensioni principali di trazione σ_t e di compressione σ_c (Fig. 4.7).

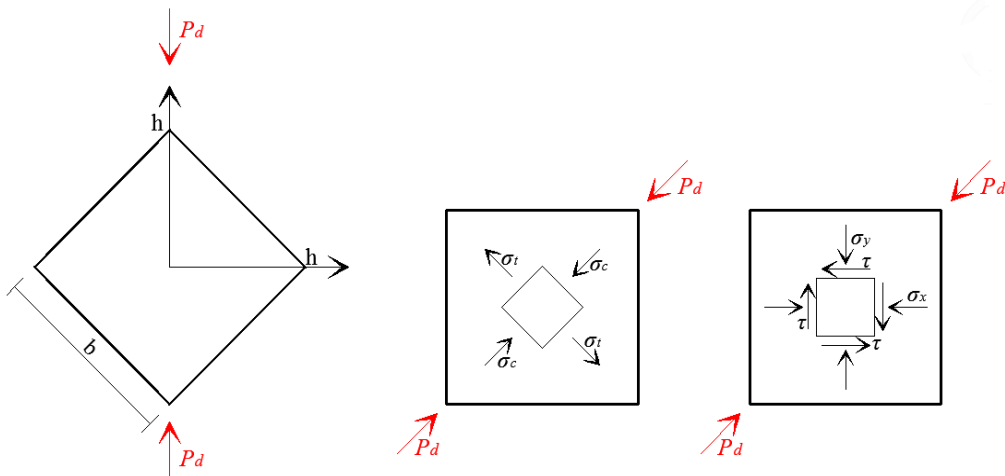


Figura 4.7 Distribuzione di tensione all'interno del pannello

Pertanto, vale la seguente relazione per il calcolo della tensione tangenziale:

$$S_s = |\tau| = \sigma_t = |\sigma_c| = \frac{P_d}{A_n \cdot \sqrt{2}} = 0.707 \frac{P_d}{A_n} \quad [4.2]$$

dove P_d è il carico di compressione diagonale e A_n è l'area netta della sezione trasversale.

Quest'ultima, a sua volta, è definita come segue:

$$A_n = \frac{w+h}{2} \cdot t \cdot n$$

nel caso generale di pannello murario avente spessore t , lati disuguali w e h , percentuale di area solida n .

Per pannelli quadrati di lato l , costituiti da mattoni pieni ($n = 1$), risulta ovviamente $A_n = l \cdot t$. Nel caso specifico, l'area trasversale del pannello è pari a 612 cm^2 .

La condizione di crisi si fa corrispondere al raggiungimento di una tensione di trazione pari alla resistenza della muratura f_t , ovvero $\sigma_t = f_t$, per cui si assume:

$$\tau_0^{ASTM} = f_t = 0.707 \frac{P_{\max}}{A_n} \quad [4.3]$$

La validità di tale interpretazione è limitata dal fatto che la reale distribuzione di tensioni tangenziali lungo la diagonale è tutt'altro che uniforme, per cui lungo la diagonale opposta a quella di applicazione del carico non si genera uno sforzo di trazione uguale a quello di compressione. Tuttavia, si può ritenere che, nonostante il carico concentrato diagonale crei uno stato di tensioni complesso, la parte centrale del pannello presenti uno stato tensionale biassiale ragionevolmente uniforme. La resistenza così ottenuta viene correntemente impiegata nel modello di resistenza puntuale proposto da Turnsek e Cacovic (1970), al fine di valutare la resistenza a taglio per fessurazione diagonale di pannelli murari sollecitati anche da uno sforzo normale non nullo. Tale modello è riportato anche nella Circolare [8].

4.2.3. Interpretazione della prova secondo *RILEM TC 76-LUM*

La norma *RILEM* [9] si basa sulla soluzione ottenuta da Frocht (1931) per il caso di una lastra in materiale elastico, omogeneo e isotropo, sollecitata nel proprio piano da un carico di compressione diagonale. Secondo tale teoria si ricava che la distribuzione delle tensioni non è costante e, in particolare, si ha una brusca variazione di tensione man mano che dal centro ci si avvicina agli spigoli del pannello. In tal caso, la circonferenza di Mohr non è più centrata nell'origine del sistema di riferimento (σ, τ) . In funzione della tensione $\bar{\tau}$ sul pannello quindi si possono ricavare le tensioni principali di trazione e di compressione (σ_t, σ_c) o le tensioni $\sigma_x = \sigma_x, \tau$ (Fig. 4.8), ricavabili dal cerchio di Mohr.

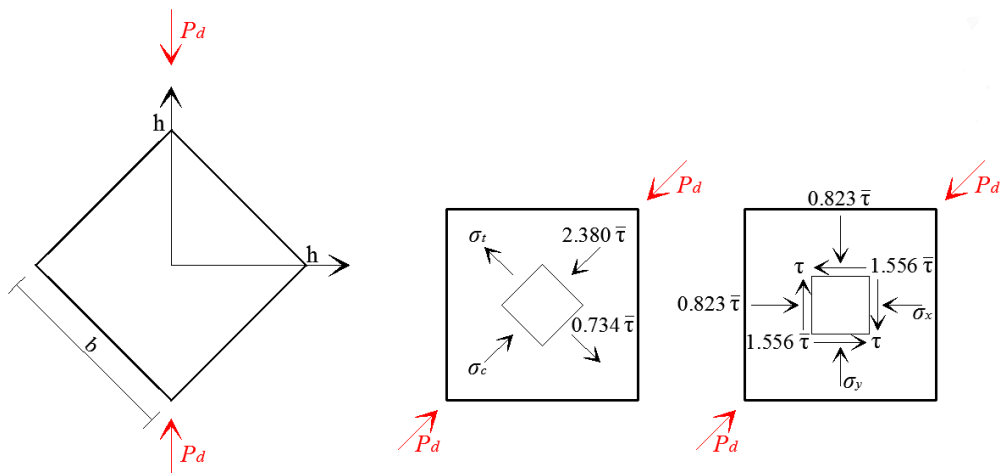


Figura 4.8 Distribuzione di tensione nel pannello secondo la teoria di Frocht

La norma fornisce il valore della tensione tangenziale generata dal carico P_d , espressa come segue:

$$\tau = 1.05 \frac{P_d}{A_n}$$

con A_n che può definirsi come nell'applicazione della norma *ASTM E 519-07*.

La resistenza a taglio puro per fessurazione diagonale del pannello murario si ottiene attraverso la formula:

$$\tau_0^{RILEM} = 0.88 \frac{P_{\max}}{A_n} \quad [4.4]$$

mentre la resistenza a trazione si valuta come segue:

$$f_t = 0.49 \frac{P_{\max}}{A_n} \quad [4.5]$$

4.2.4. Curve sforzo-deformazione e modulo di rigidezza

A partire dagli spostamenti verticali e orizzontali è possibile calcolare innanzitutto le deformazioni estensionali lungo le diagonali mediante le relazioni:

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V_1 + \Delta V_2}{2g}, \quad \varepsilon_h = \frac{\Delta H_1 + \Delta H_2}{2g} \quad [4.6]$$

Applicando separatamente le equazioni [4.2] e [4.6] si può trasformare il carico P_d corrispondente al generico valore di spostamento in tensione tangenziale τ , ottenendo così le curve τ - ε_v e τ - ε_h .

Lo scorrimento angolare sarà dato dalla somma delle deformazioni lungo le due diagonali:

$$\gamma = \varepsilon_v + \varepsilon_h = \frac{\Delta V + \Delta H}{g} \quad [4.7]$$

In questo modo è possibile tracciare anche le curve sperimentali τ - γ .

Per quanto riguarda il modulo elastico secante, esso viene valutato generalmente in corrispondenza di una tensione tangenziale $\tau_e = \tau_0/3$ mediante la relazione:

$$G_{1/3} = \frac{\tau_e}{\gamma(\tau_e)} \quad [4.8]$$

È possibile valutare altresì il modulo di Poisson secante $\nu_{1/3}$ come:

$$\nu_{1/3} = -\frac{\varepsilon_h(\tau_e)}{\varepsilon_v(\tau_e)} \quad [4.9]$$

dove $\gamma(\tau_e)$, $\varepsilon_h(\tau_e)$ ed $\varepsilon_v(\tau_e)$ contenute nelle [4.8] e [4.9] sono compute in corrispondenza di τ_e .

4.2.5. Sperimentazione su pannelli non rinforzati (URM)

Si riportano di seguito i risultati dell'attività sperimentale condotta sui pannelli murari confezionati senza rinforzo con la descrizione del comportamento osservato durante le prove. Il carico diagonale è stato applicato monotonicamente sui provini, denominati con gli acronimi *URMi* (con $i = 1, \dots, 4$), con velocità di prova pari a 0,6 mm/min. La Figura 4.9 riporta le immagini di due pannelli prima di eseguire il test.

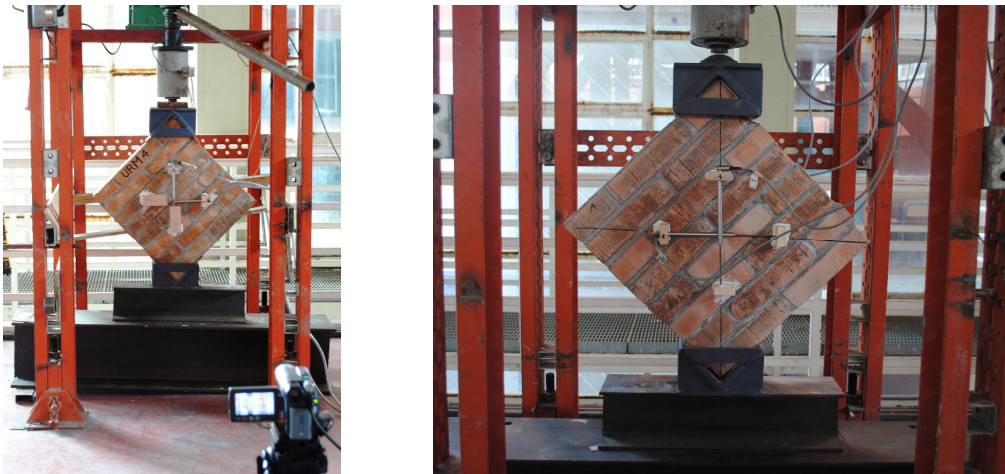


Figura 4.9 Prova di compressione diagonale su *URMi*

Nelle Figure 4.10 e 4.11 sono contenute, rispettivamente, le curve τ - ϵ_{v-h} e τ - γ costruite a partire dalle equazioni [4.2], [4.6] e [4.7].

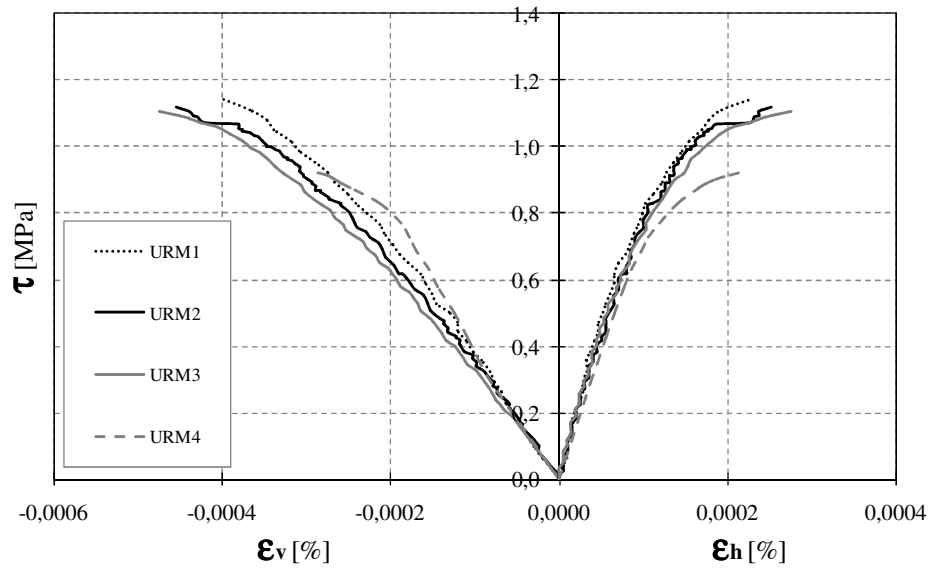


Figura 4.10 Relazione tensioni di taglio-deformazioni verticali e orizzontali

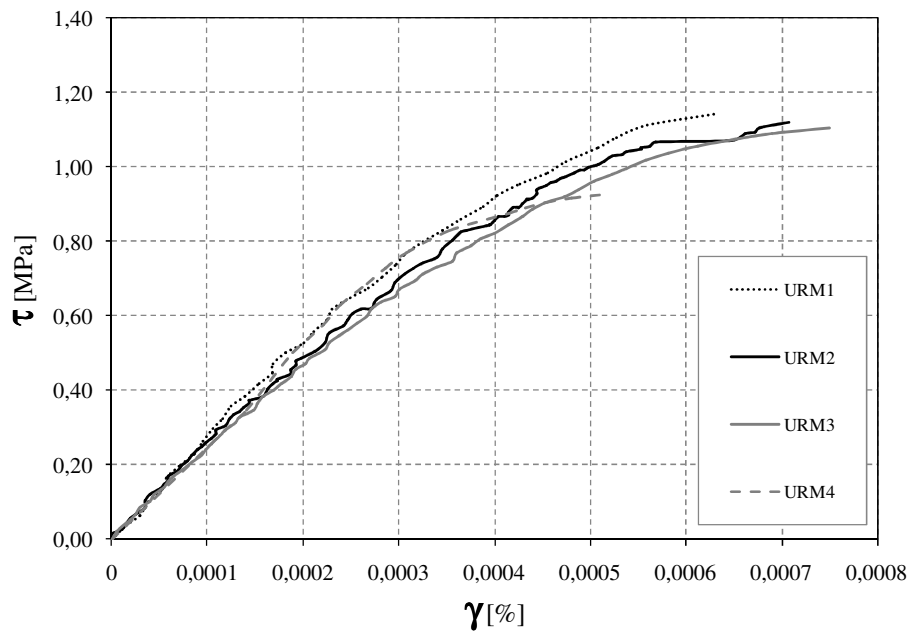


Figura 4.11 Relazione tensioni-scorrimenti tangenziali

La Tabella 4.3 riassume i valori di resistenza a taglio puro e di resistenza a trazione mediante le equazioni [4.3], [4.4] e [4.5]. L'applicazione della norma *ASTM* [7] ha condotto a valori minori di τ_0 e a valori di f_t maggiori se confrontati con quelli risultanti dall'applicazione della norma *RILEM* [9].

Tabella 4.3 Resistenza a taglio puro e resistenza a trazione secondo:
ASTM E 519-07 e RILEM TC 76-LUM

Provino	P_{max} [kN]	τ_0^{ASTM} [MPa]	τ_0^{RILEM} [MPa]	f_t^{ASTM} [MPa]	f_t^{RILEM} [MPa]
URM1	98.7	1.14	1.42	1.14	0.79
URM2	97.0	1.12	1.39	1.12	0.78
URM3	96.0	1.11	1.38	1.11	0.77
URM4	80.5	0.93	1.16	0.93	0.64

In corrispondenza di una tensione tangenziale $\tau_e = \tau_0/3$ sono stati valutati, inoltre, il modulo di Poisson e il modulo elastico secanti secondo le espressioni [4.8] e [4.9] (Tab. 4.4). L'applicazione della norma *RILEM* [9] ha prodotto valori di $\nu_{1/3}$ e $G_{1/3}$ maggiori di quelli ottenuti secondo la norma *ASTM* [7].

Tabella 4.4 Modulo di Poisson e modulo di elasticità secanti secondo:
ASTM E 519-07 e RILEM TC 76-LUM

Provino	$\nu_{1/3}^{ASTM}$	$\nu_{1/3}^{RILEM}$	$G_{1/3}^{ASTM}$ [MPa]	$G_{1/3}^{RILEM}$ [MPa]
URM1	0.37	0.39	2734	2798
URM2	0.39	0.42	2453	2587
URM3	0.35	0.36	2390	2418
URM4	0.49	0.52	2478	2579

I quattro pannelli testati hanno manifestato una rottura di tipo fragile che ha interessato sia i ricorsi di malta che gli elementi resistenti in laterizio lungo la diagonale compressa (*diagonal splitting*), a eccezione del provino *URM4*

che è giunto al collasso per scorrimento dei giunti, con la tipica formazione di una fessura a gradini (*step pattern*). In quest'ultimo caso, la rottura fragile per trazione in corrispondenza dei giunti ha prodotto una resistenza al taglio minore rispetto agli altri provini non rinforzati, nei quali invece il processo di frattura ha anche interessato parte dei mattoni.

L'evoluzione del danno è stata monitorata, oltre che dai quattro trasduttori di spostamento, anche da registrazioni video che hanno consentito di osservare meglio il progredire della crisi nei pannelli, e quindi, di descriverne i quadri fessurativi in maniera esaustiva.

Di seguito si riportano le immagini della crisi dei muretti non rinforzati, accompagnate da una schematizzazione dei quadri fessurativi.

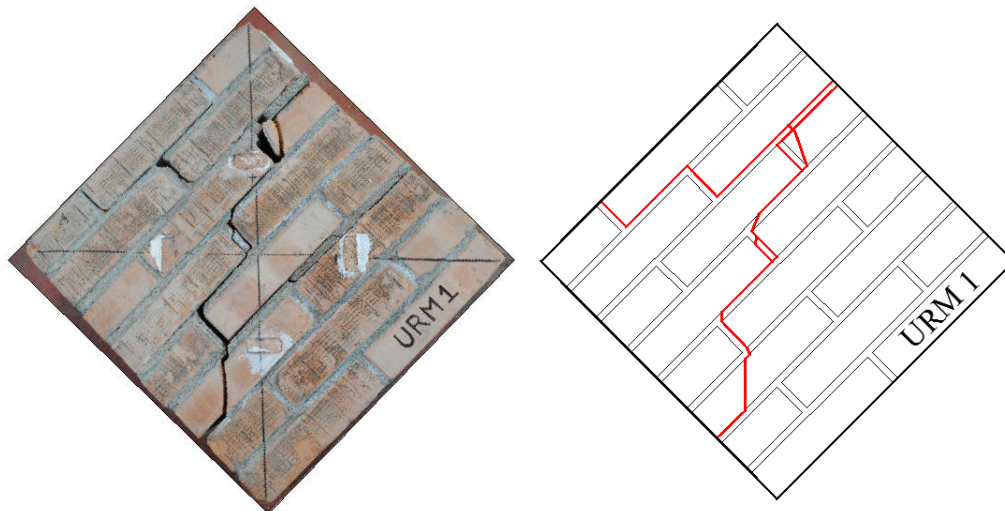


Figura 4.12 *Crisi e schema del danno del provino URM1*

Si può notare che la crisi in corrispondenza dei giunti (Fig. 4.12) ha riguardato sia lo scorrimento lungo una faccia dei laterizi, sia la rottura per trazione della malta, in accordo con quanto ricavato dalle prove sulle triplete (Fig. 3.14) nelle quali, si ricorda, la rottura aveva interessato lo scivolamento dei giunti e la biforcazione negli stessi.

Il meccanismo di collasso dei provini *URM2* e *URM3* è risultato simile a quello esibito dal primo pannello (Fig. 4.13), interessando la rottura di entrambi i materiali costituenti l'apparato murario. In questo caso però la crisi

lungo la diagonale caricata è avvenuta per una fenditura più netta del provino coinvolgendo la trazione di più elementi resistenti in laterizio, responsabile di una maggiore duttilità nella risposta a taglio dei pannelli (Fig. 4.11).

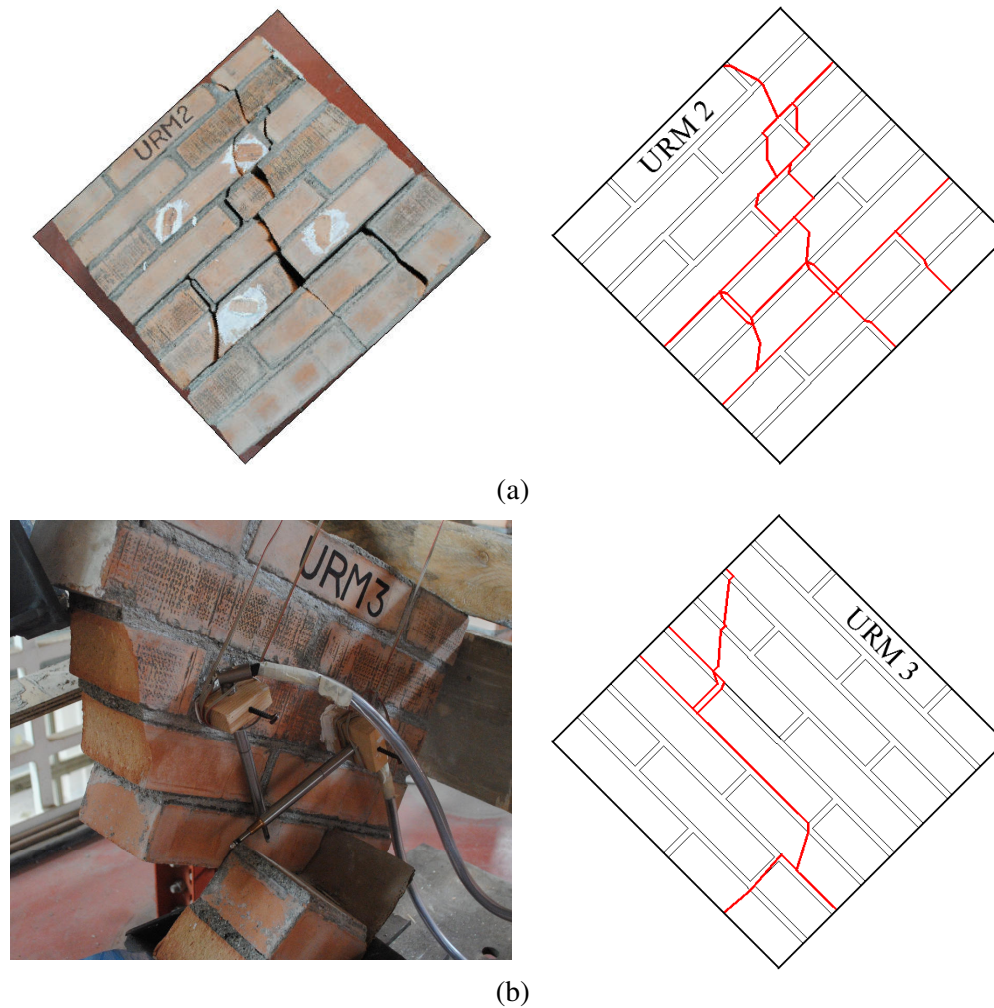


Figura 4.13 Quadro fessurativo dei pannelli:
(a) URM2; (b) URM3

La Figura 4.14 mostra, infine, la rottura dell'ultimo provino testato privo di rinforzo che è giunto al collasso per un valore del carico diagonale inferiore a quello esibito dai pannelli testati in precedenza.

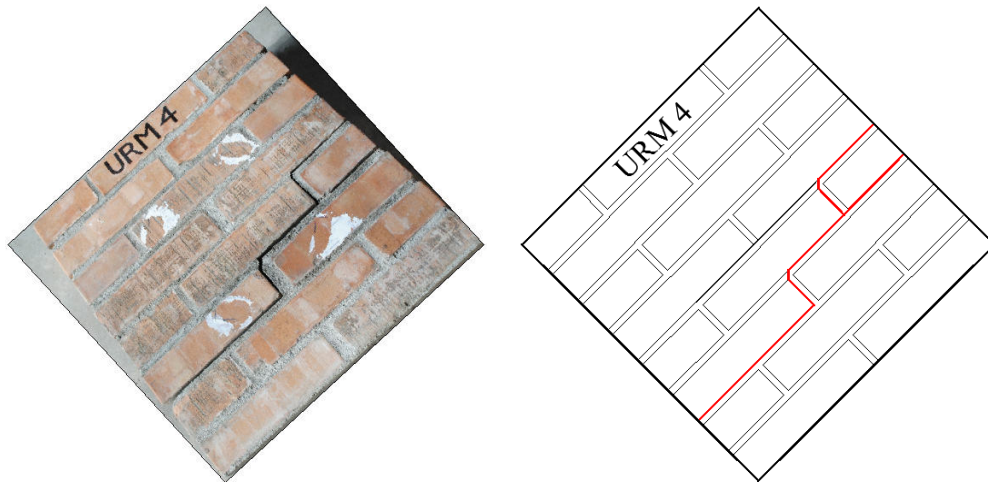


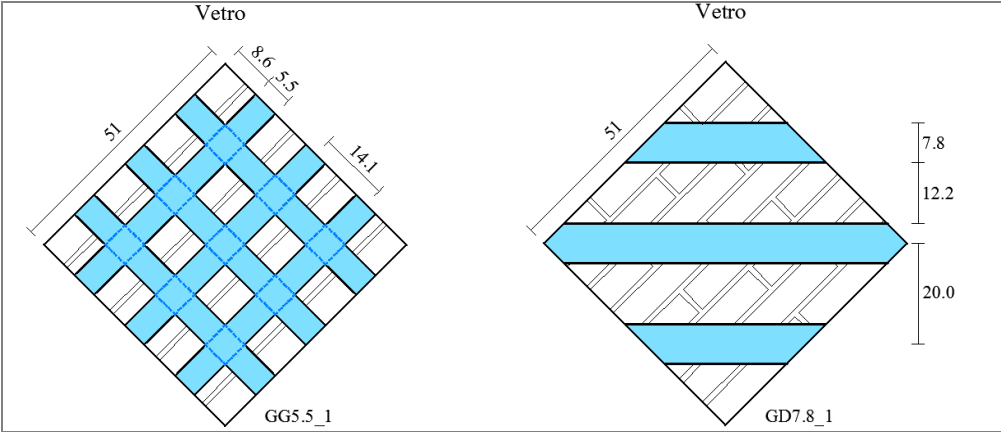
Figura 4.14 Modalità di rottura del provino URM4

Il valore medio del carico di rottura relativo alle quattro prove, pari a 93 kN, e la tensione tangenziale corrispondente, calcolata secondo la norma *ASTM* [7] e pari a 1.08 MPa, sono stati usati come dati di riferimento per i casi con rinforzo.

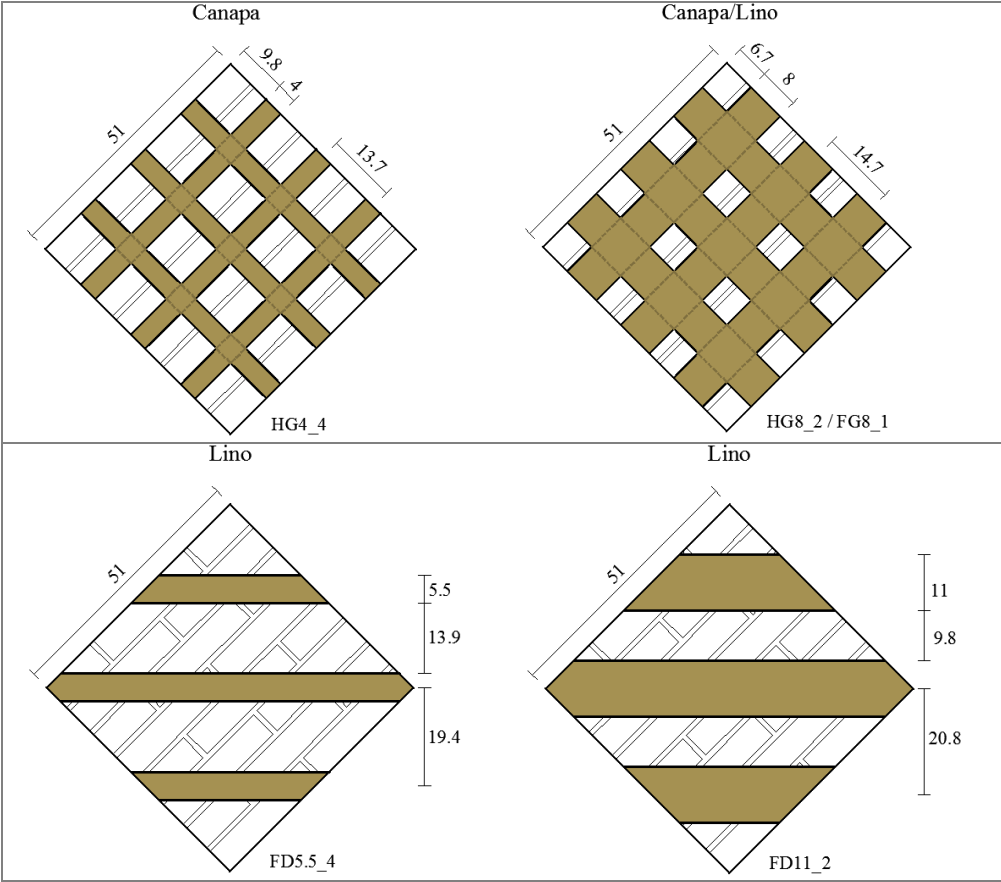
4.2.6. Sperimentazione su pannelli rinforzati

Nel presente paragrafo vengono analizzati e discussi i risultati delle prove di compressione diagonale condotte su pannelli di muratura in presenza di rinforzi a matrice cementizia (FRCM).

Lo scopo è stato quello di valutare l'entità degli incrementi di resistenza e di rigidezza a taglio apportati da questi materiali quando applicati esternamente sui pannelli sottoforma di strisce di tessuti. In Figura 4.15 sono riportate le dimensioni dei nastri adesivi ai paramenti di ciascun provino secondo le modalità di applicazione in diagonale e a reticolo. Le caratteristiche geometriche dei rinforzi sui pannelli sono riassunte in Tabella 4.2.



(a)



(b)

Figura 4.15 Dimensioni delle strisce di rinforzo (in cm):
(a) fibre di vetro; (b) fibre naturali

4.2.6.1. Provini rinforzati con nastri in fibre di vetro

I nastri in fibre di vetro (indicati con la sigla *GF*) sono stati ricavati da tessuti disponibili in commercio per usi strutturali. Essi sono stati applicati su quattro pannelli murari secondo le disposizioni geometriche prese in considerazione (Fig. 4.15a), realizzando, in particolare, due tipologie di provini per ciascuna configurazione di rinforzo.

I risultati sperimentali ottenuti in termini di resistenza e rigidezza globale sono stati messi a confronto con le medie dei valori di suddette quantità riferite alla configurazione di riferimento (senza rinforzo) e indicate in Tabella 4.5. La resistenza a taglio e, conseguentemente, il modulo di rigidezza, sono stati calcolati secondo la norma *ASTM* [7].

Tabella 4.5 Risultati sperimentali dei provini rinforzati con *GF* con riferimento ai provini *URMi*

Provino	P_{max} [kN]	τ_0 [MPa]	Variazione resistenza [%]	$G_{1/3}$ [MPa]	Variazione modulo [%]
<i>URMi</i>	93	1.08	-	2514	-
<i>GG5.5_1</i> (1)	132.4	1.53	41.7	4128	64.2
<i>GG5.5_1</i> (2)	108.2	1.25	15.7	4074	62.0
<i>GD7.8_1</i> (1)	133.3	1.54	42.6	3772	50.0
<i>GD7.8_1</i> (2)	122.9	1.42	31.5	3867	53.8

Si può osservare che gli incrementi di resistenza ultima nonché di rigidezza sono stati cospicui in tutti i casi con rinforzo. Tuttavia, nel caso del pannello *GG5.5_1* (2), la prova non ha fornito un valore del carico di rottura confrontabile con gli altri risultati; la consistente differenza tra il carico ultimo e i carichi di rottura ottenuti dalle altre prove potrebbe essere causata da qualche imperfezione del materiale muratura al momento del suo confezionamento. L'aumento in termini di modulo elastico tangenziale, invece, è stato più omogeneo, risultando leggermente più alto nel caso della distribuzione del rinforzo a reticolo a maglie quadrate.

Il comportamento globale a taglio dei pannelli con rinforzo è analizzato attraverso i diagrammi tensioni di taglio-deformazioni/scorrimenti. Va precisato che la presenza delle strisce di composito sui due lati dei pannelli ha comportato una differente disposizione dei trasduttori di spostamento orizzontale nel caso del rinforzo posto lungo la diagonale tesa (Fig. 4.16a), mentre per il rinforzo a griglia si è cercato di mantenere la stessa configurazione dei dispositivi di misura adottati per i provini *URMi* (Fig. 4.16b).

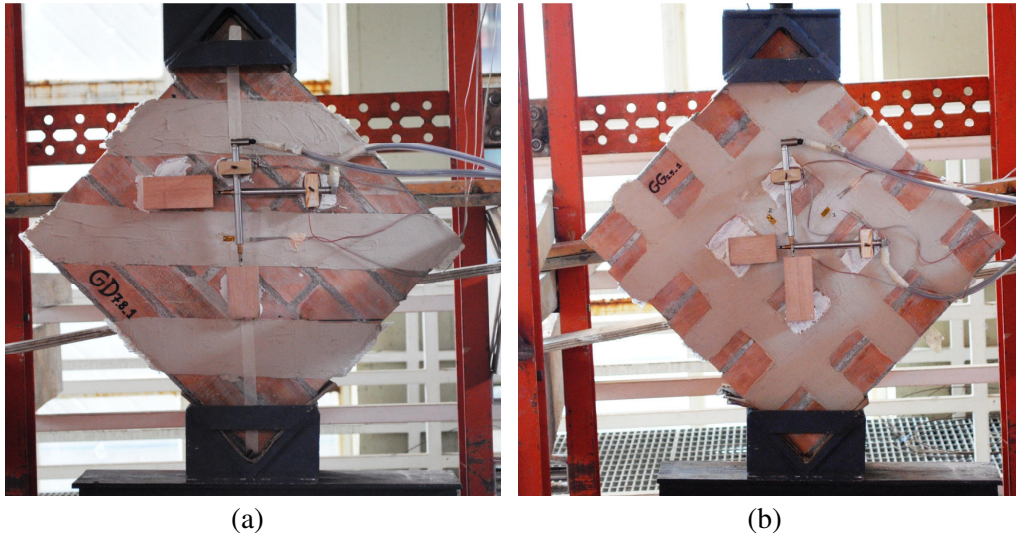


Figura 4.16 *Disposizione dei trasduttori di spostamento per:*
(a) *rinforzo in diagonale;* (b) *rinforzo a griglia ortogonale*

Dal confronto con il campione non rinforzato di riferimento (Fig. 4.17), oltre agli incrementi di capacità resistente e di rigidezza, si evince un comportamento non lineare più pronunciato nei tratti finali delle curve. Questo aspetto è ancora più marcato nel caso della disposizione in diagonale dei rinforzi: la curva τ - γ relativa al provino GD7.8_1, infatti, mostra un comportamento pseudo-duttile a rottura, a indicare che tale configurazione rappresenta la soluzione più vantaggiosa ai fini dell'aumento delle deformazioni ultime. D'altra parte, è noto che i materiali compositi garantiscono il massimo delle loro prestazioni quando applicati lungo la direzione degli sforzi di trazione.

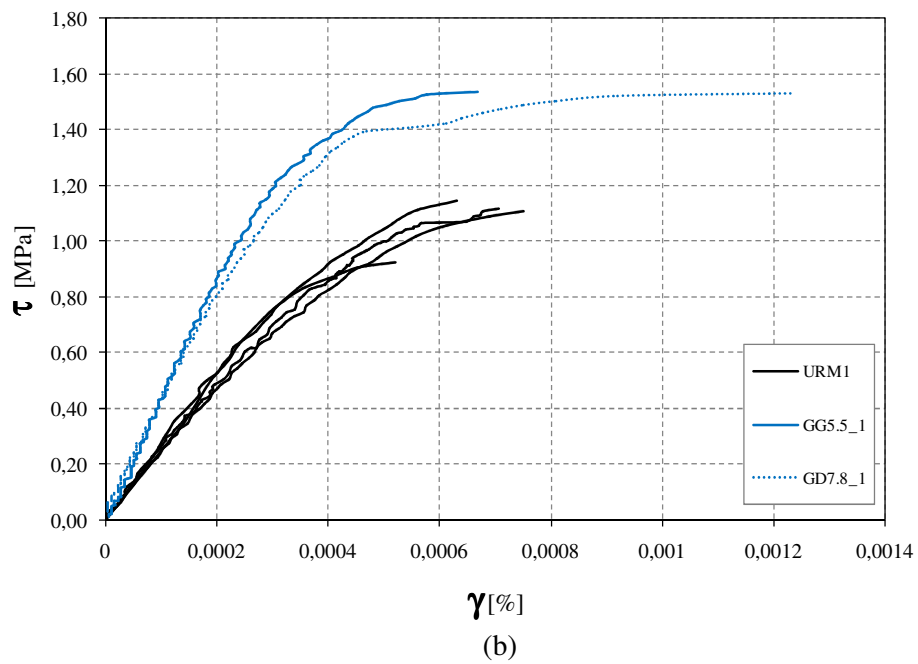
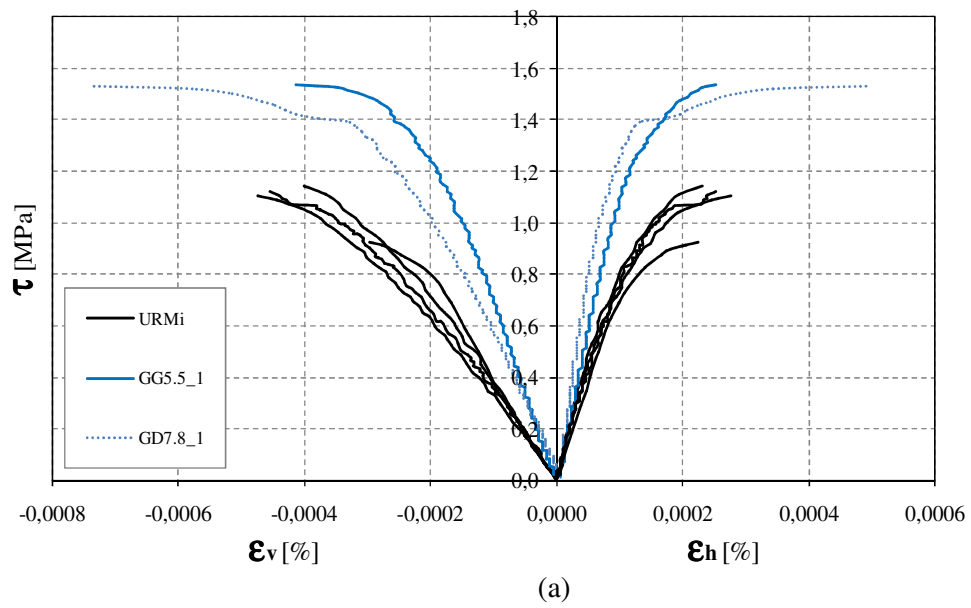


Figura 4.17 Confronto con i provini URMi:
 (a) curve τ - γ (b) τ - ϵ_{v-h} per i rinforzi in GF

Nel caso specifico di rinforzi con FRCM, quanto detto è particolarmente evidente in termini di deformazioni ultime, mentre non si ha un sostanziale incremento di resistenza e di rigidezza rispetto ai provini rinforzati a reticolo.

Per quanto concerne le modalità di crisi, i provini hanno mostrato tutti una rottura meno improvvisa rispetto agli *URMi*. Osservando il quadro fessurativo dell'intero campione di prova testato, si può notare che il rinforzo in diagonale (Fig. 4.19) ha offerto sicuramente una certa omogeneità nella diffusione degli sforzi, dimostrata da un andamento pressochè simmetrico delle lesioni all'interno dei pannelli. Questi sono giunti al collasso per fenditura lungo la diagonale caricata (*diagonal splitting*), mentre la crisi del composito ha interessato la trazione delle fibre (*tensile failure*). Dall'analisi dei filmati delle prove si è potuto osservare, inoltre, che solo una volta attivati gli spostamenti relativi tra i diversi elementi costituenti la muratura (scorrimenti e distacco per trazione dei giunti e dei mattoni – Fig. 4.18), si è verificata la delaminazione nel composito (*debonding*). Quest'ultima è stata causata principalmente dal comportamento nel piano e fuori dal piano esibito dal pannello murario dopo la formazione delle prime fessure, successiva alla lacerazione e parziale rottura a trazione delle fibre.

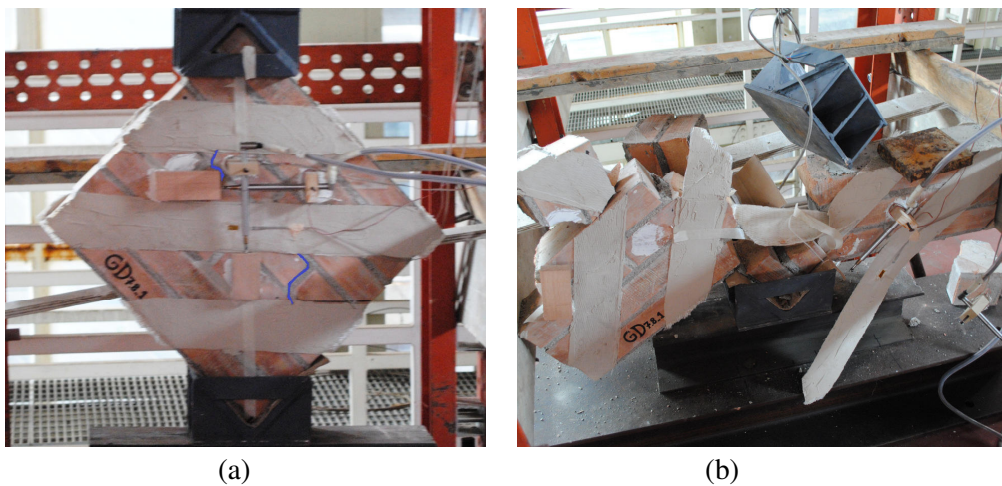
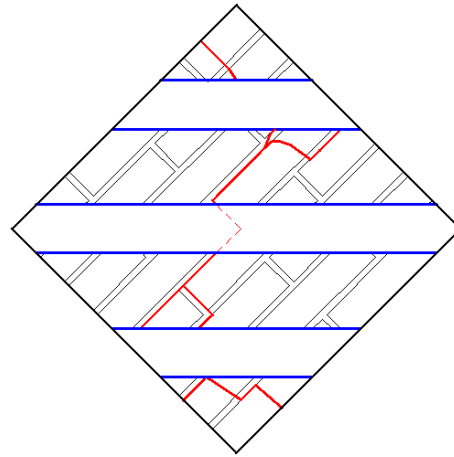
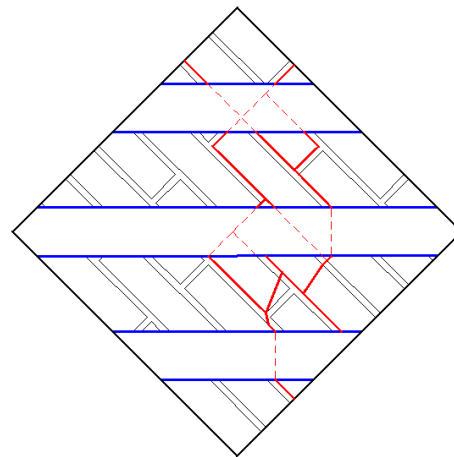


Figura 4.18 Crisi nel provino GD7.8_1 (1):
(a) formazione delle prime lesioni prima della crisi completa (b)



(a)



(b)

Figura 4.19 Quadri fessurativi:
 (a) GD7.8_1 (1); (b) GD7.8_1 (2)

Le deformazioni del composito sono state misurate mediante due strain-gauges, uno per lato, applicati direttamente sulle fibre all'interno delle strisce di composito disposte lungo la diagonale tesa del pannello. La risposta del rinforzo è mostrata in Figura 4.20, in cui si evince un comportamento lineare fino a rottura.

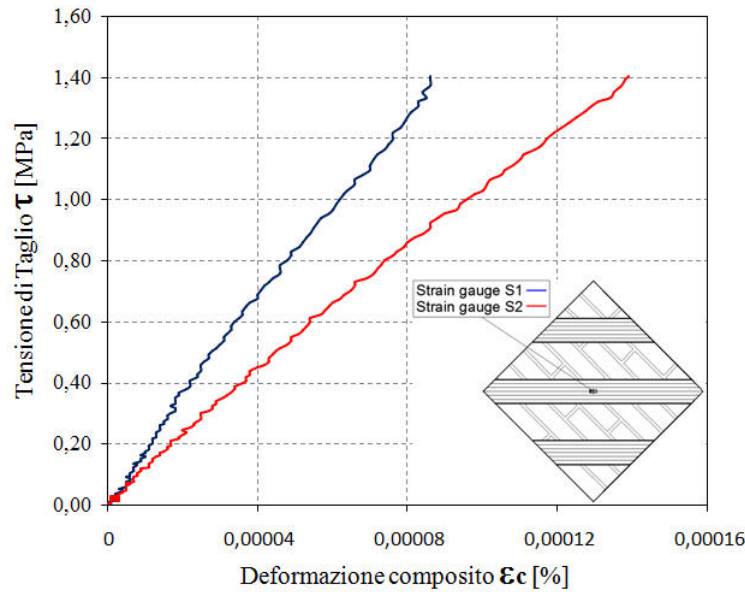


Figura 4.20 Risposta a trazione delle strisce centrali di rinforzo

Le curve presentano un andamento simile ma non sovrapponibile e questo dimostrerebbe una certa eccentricità del carico. In realtà, si deve tenere in conto del fatto che, per quanto si sia cercato di applicare gli estensimetri nello stesso punto sui due lati del pannello, le imperfezioni geometriche rendono difficile realizzare un sistema perfettamente simmetrico. Si può ritenere, dunque, che il comportamento globale dei pannelli si sia mantenuto nel piano durante le prove, in accordo con quanto rilevato dai trasduttori di spostamento.

Nel caso, invece, dei provini rinforzati secondo la disposizione a griglia ortogonale, la crisi è avvenuta principalmente per scorrimento lungo un letto orizzontale di malta e per rottura a trazione di alcuni elementi in laterizio (Fig. 4.21). Le strisce di materiale composito hanno evidenziato un comportamento a flessione lungo il piano del carico (Fig. 4.22) che ha evitato la rottura improvvisa dei provini. Tale comportamento mostra, inoltre, una buona resistenza di adesione tra supporto e matrice e tra quest'ultima e le fibre che, insieme al tipo di disposizione adottata, ha determinato una redistribuzione atipica dello stato tensionale nei pannelli fino a giungere allo scivolamento del giunto orizzontale. Si vedrà nel prosieguo che il comportamento a flessione

del rinforzo in *GF* si ripete nel caso dei rinforzi con le fibre naturali, a indicare che si tratta di un fenomeno tipico dei materiali compositi a matrice cementizia (FRCM) e che quindi riguarda principalmente le caratteristiche meccaniche della matrice piuttosto che delle fibre.

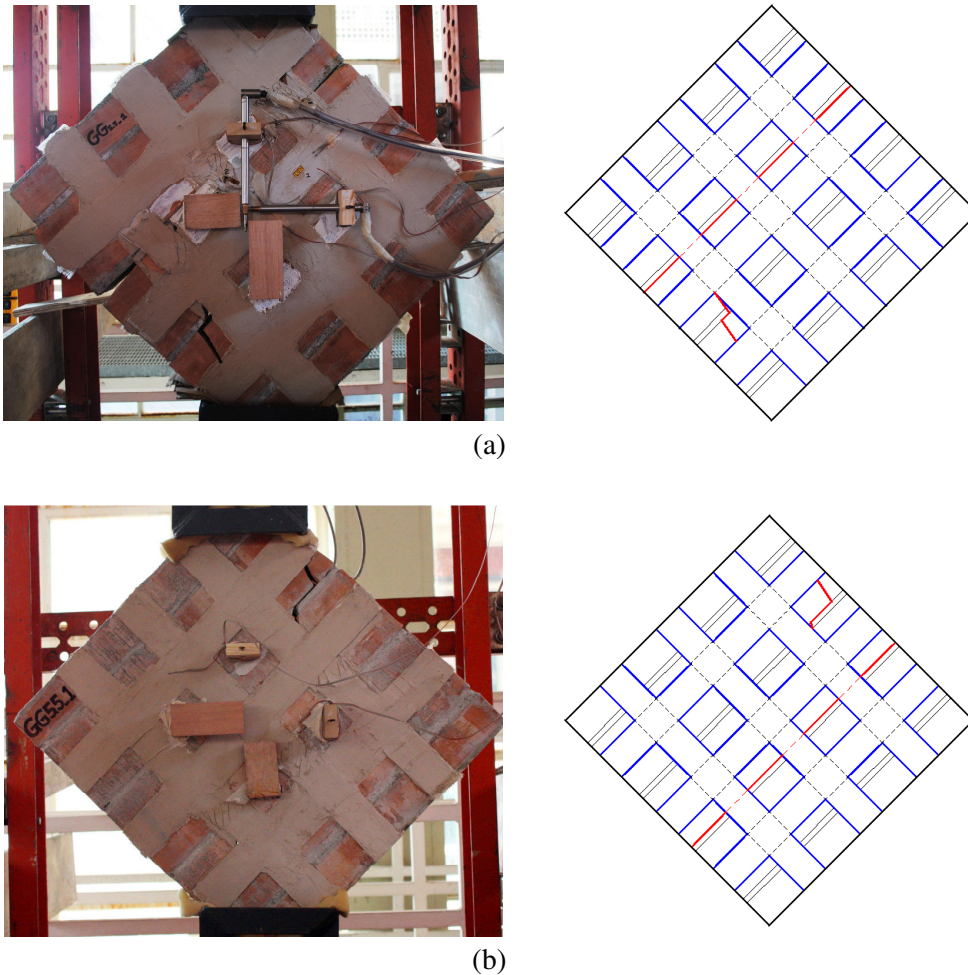


Figura 4.21 *Quadri fessurativi:*
(a) GG5.5_1 (1); (b) GG5.5_1 (2)

Infine, rispetto alla disposizione in diagonale, l'esplosione dei muretti è stata contenuta dalle strisce di rinforzo che non hanno subito il fenomeno della delaminazione anche a rottura completa.



Figura 4.22 Comportamento del rinforzo a flessione nel piano

4.2.6.2. Provini rinforzati con tessuti in fibre naturali

Vengono discussi di seguito i risultati delle prove diagonali sui muretti rinforzati con le fibre naturali. Le caratteristiche geometriche delle strisce unidirezionali in fibre di canapa (*HF*) e bidirezionali in fibre di lino (*FF*) sono indicate in Figura 4.15b. Le Tabelle 4.6 e 4.7 contengono i risultati sperimentali ottenuti, rispettivamente per la disposizione dei rinforzi in diagonale e a reticolo, con la variazione percentuale rispetto alle medie dei valori riferiti alla configurazione di riferimento (*URMi*) e confrontati altresì con i valori medi ottenuti sui provini rinforzati con le fibre di vetro analizzati in precedenza.

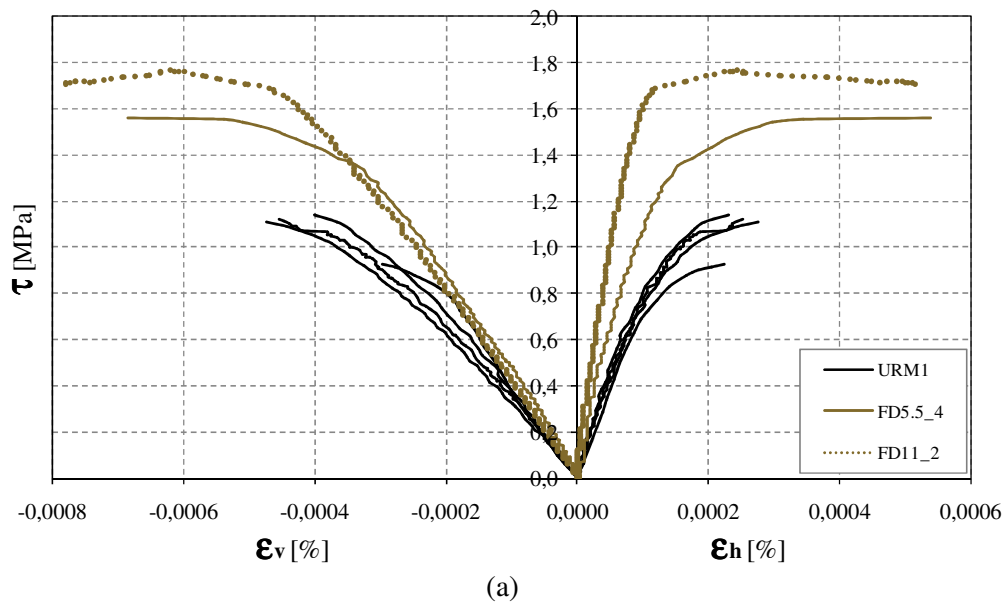
Tabella 4.6 Risultati sperimentali dei provini rinforzati con le fibre naturali secondo la disposizione in diagonale

Provino	P_{max} [kN]	τ_0 [MPa]	Variazione resistenza [%]	$G_{1/3}$ [MPa]	Variazione modulo [%]
<i>URMi</i>	93	1.08	-	2514	-
<i>GD7.8_1</i>	128.1	1.48	37.1	3820	51.9
<i>FD5.5_4</i>	135.0	1.56	44.4	3463	37.7
<i>FD11_2</i>	152.3	1.76	63.0	3381	34.5

Tabella 4.7 Risultati sperimentali dei provini rinforzati con le fibre naturali secondo la disposizione a griglia ortogonale

Provino	P_{max} [kN]	τ_0 [MPa]	Variazione resistenza [%]	$G_{1/3}$ [MPa]	Variazione modulo [%]
URMi	93	1.08	/	2514	/
GG5.5_1	120.3	1.39	28.7	4101	63.1
HG4_4	116.0	1.34	24.1	3065	21.9
HG8_2	114.3	1.32	22.2	3096	23.2
FG8_2	134.2	1.55	43.5	3076	22.3

I diagrammi $\tau-\varepsilon_{v-h}$ e $\tau-\gamma$ mostrano un andamento quasi duttile per gli elementi murari rinforzati in diagonale (Fig. 4.23). Si sono registrati, inoltre, incrementi notevoli di capacità resistente se paragonati a quelli esibiti dai provini rinforzati con le fibre di vetro, oltre a quelli ottenuti per gli URMi (Tab. 4.6). Meno rilevante è invece l'aumento di rigidità globale, che confermerebbe i risultati ottenuti dalle prove di caratterizzazione del materiale di rinforzo.



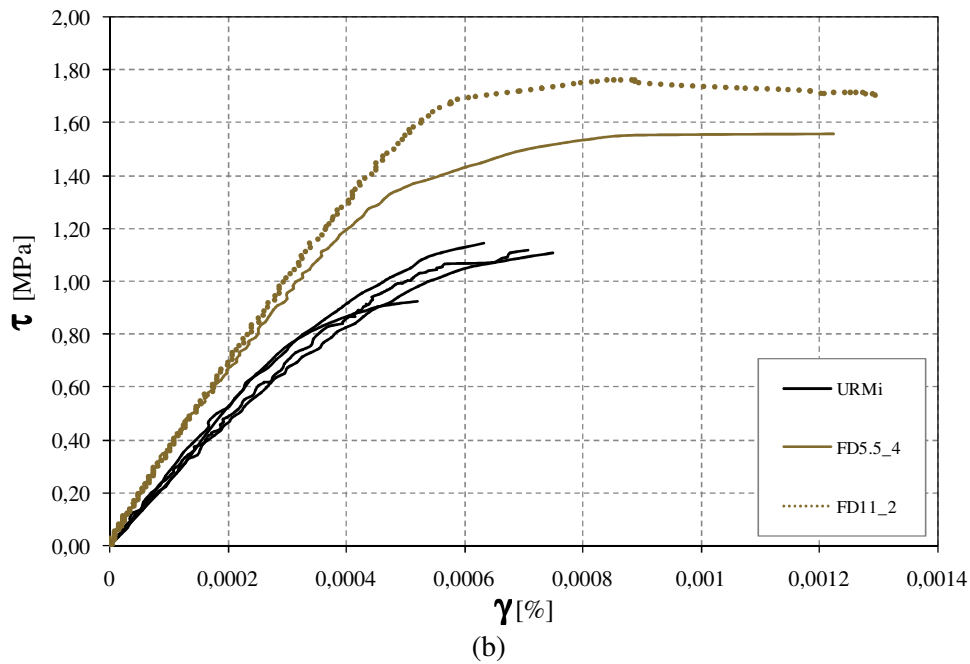


Figura 4.23 Confronto con i provini URMi:

(a) curve τ - ε_{v-h} e (b) τ - γ per i rinforzi in FF disposti in diagonale

Per quanto concerne il rinforzo a reticolo, entrambi i tipi di fibra naturale hanno portato a ottenere aumenti significativi di resistenza al taglio (Fig. 4.24). Gli incrementi di rigidezza sono meno rilevanti e inferiori a quelli ottenuti dai provini rinforzati con GF.

Le fibre di lino sembrerebbero comportare maggiori benefici nella risposta globale dell'elemento strutturale in termini di capacità resistente, mentre risulta confrontabile l'aumento di rigidezza globale apportato da entrambi i materiali. Quest'ultimo aspetto confermerebbe ancora una volta i risultati sperimentali ottenuti dalla caratterizzazione dei tessuti che, oltre ad avere esibito uno stesso comportamento a trazione, hanno mostrato una certa equivalenza tra i moduli elastici.

Se si confrontano, invece, i risultati dei due provini rinforzati con le fibre di canapa, si può notare che la scelta di dimezzare il numero di strati a favore di un rinforzo più diffuso (HG8_2) sembrerebbe essere vantaggiosa in termini dell'aumento delle deformazioni ultime, mentre risultano pressoché invariati i valori di resistenza e di rigidezza.

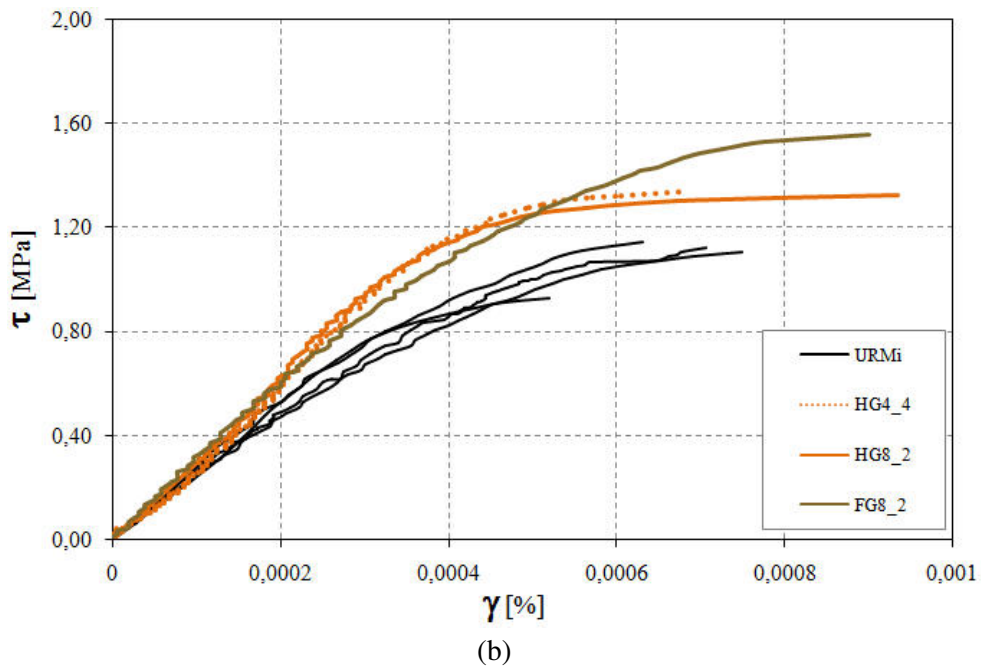
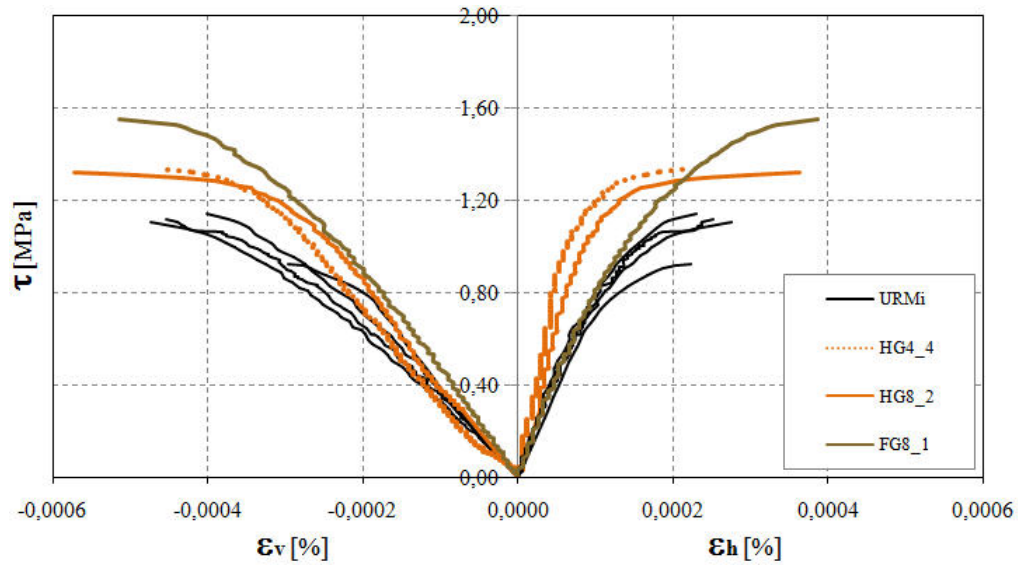


Figura 4.24 Confronto con i provini URMi:
(a) curve τ - ε_{v-h} e (b) τ - γ per i rinforzi in FF e HF disposti a reticolo

La crisi osservata per i due pannelli rinforzati secondo la configurazione in diagonale ha coinvolto sia i ricorsi di malta che i mattoni (*diagonal splitting*) (Fig. 4.25).

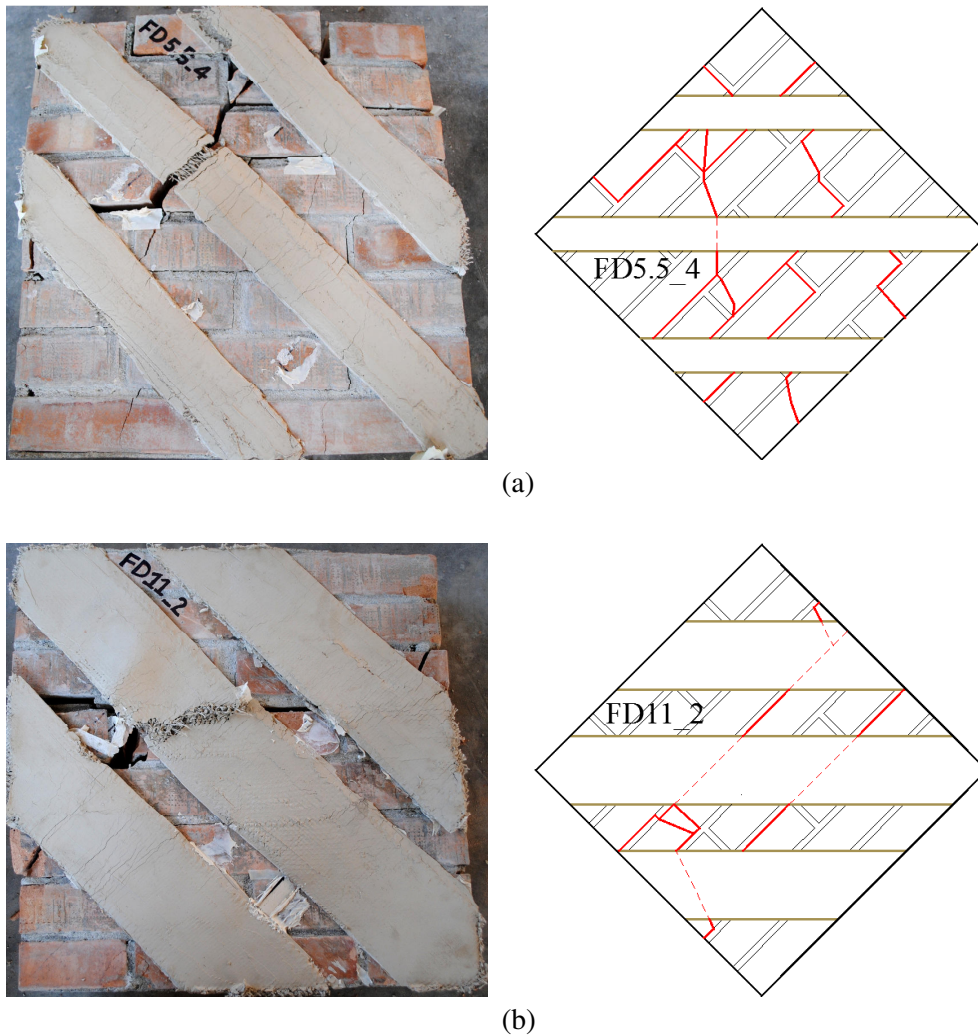


Figura 4.25 Quadri fessurativi:
(a) FD5.5_4; (b) FD11_2

Il composito è giunto al collasso per trazione delle fibre disposte lungo la diagonale tesa in prossimità del centro del pannello (*tensile failure*) (Fig. 4.26). Allo sfibramento e alla lacerazione delle stesse non è seguita la

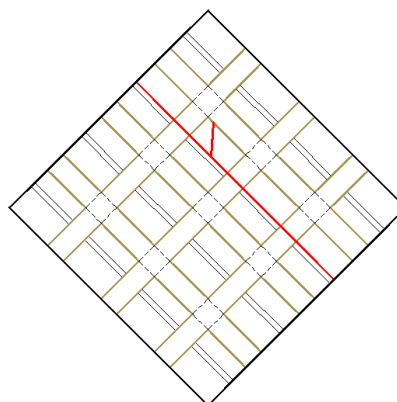
delaminazione del rinforzo (*deboding*), contrariamente a quanto riscontrato per i rinforzi con *GF*. Oltre a una maggiore compatibilità tra le fibre naturali, rispetto a quelle di vetro, e la matrice cementizia, ciò dimostrerebbe che la presenza di più strati di rinforzo sul pannello migliora le caratteristiche di aderenza tra i materiali in gioco.



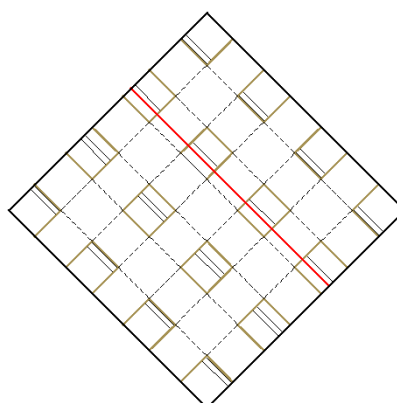
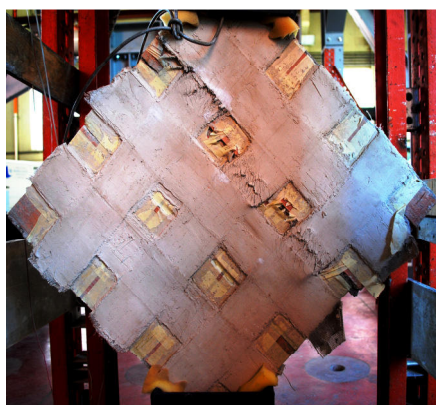
Figura 4.26 *Crisi per trazione delle fibre di lino*

I materiali compositi sfruttano le loro proprietà meccaniche ed elastiche quando sottoposti a trazione, mentre il loro contributo a compressione è molto modesto. Nel caso specifico di tessuto bidirezionale bilanciato, la configurazione del rinforzo secondo la direzione degli sforzi di trazione nel pannello di fatto implica la presenza di fibre, con la medesima quantità, anche nella direzione opposta, e cioè lungo il piano compresso. Il rinforzo, pertanto, è stato dimensionato come se fosse un tessuto unidirezionale trascurando il contributo delle fibre disposte ortogonalmente alla diagonale tesa. Tuttavia, queste assolvono al compito di ostacolare la deformazione delle fibre in trazione grazie a una discreta rigidità flessionale e alla notevole resistenza alla delaminazione del rinforzo FRCM, contribuendo a incrementare la capacità resistente globale dei pannelli.

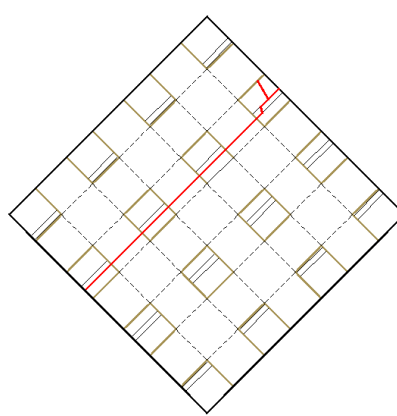
I muretti rinforzati a reticolo hanno esibito la medesima tipologia di rottura dei provini con *GF*. La crisi è avvenuta principalmente per scorrimento lungo un letto orizzontale di malta mentre il composito ha manifestato un comportamento flessionale che ha evitato la rottura improvvisa del pannello (Fig. 4.27), garantendo, inoltre, il contenimento degli elementi resistenti dei muretti a collasso avvenuto.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.27 Quadri fessurativi:
(a) HG4_4; (b) HG8_2; (c) FG8_1

4.2.7. Riepilogo dei risultati

Nella Tabella 4.8 sono riportati i risultati corrispondenti all'intero campione di prova. La valutazione dell'efficacia dei rinforzi è stata valutata sulla base delle medie dei valori ottenuti sul campione privo di rinforzo in termini di resistenza e rigidezza al taglio, rispettivamente pari a 1,08 e 2514 MPa.

Tabella 4.8 Risultati sperimentali ottenuti sull'intero campione di prova

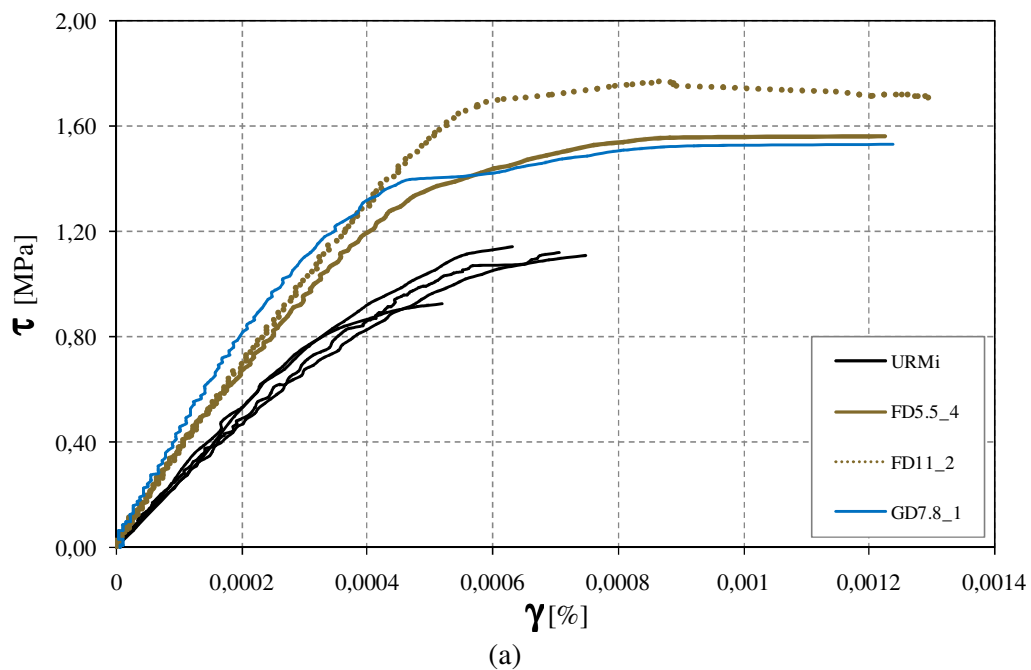
Provino	P_{max} [kN]	τ_0 [MPa]	Variazione resistenza [%]	$G_{1/3}$ [MPa]	Variazione modulo [%]	Tipo di rottura ^(*)
URM1	98.7	1.14	-	2734	-	DS
URM2	97.0	1.12	-	2453	-	DS
URM3	96.0	1.11	-	2390	-	DS
URM4	80.5	0.93	-	2478	-	SP
GD7.8_1 (1)	133.3	1.54	42.6	3772	50.0	DS
GD7.8_1 (2)	122.9	1.42	31.5	3867	53.8	DS
GG5.5_1 (1)	132.4	1.53	41.7	4128	64.2	JS
GG5.5_1 (2)	108.2	1.25	15.7	4074	62.0	JS
FD5.5_4	135.0	1.56	44.4	3463	37.7	DS
FD11_2	152.3	1.76	63.0	3381	34.5	DS
FG8_2	134.2	1.55	43.5	3076	22.3	JS
HG4_4	116.0	1.34	24.1	3065	21.9	JS
HG8_2	114.3	1.32	22.2	3096	23.2	JS

^(*) DS – Diagonal splitting; SP – Step Pattern; JS – Joint Sliding

I valori maggiori di resistenza sono stati forniti dal tessuto bidirezionale di lino per entrambe le configurazioni di applicazione sui pannelli. L'incremento medio rispetto agli URMi, di circa il 50%, supera quello apportato dalle fibre di vetro, che è risultato poco superiore al 30%. Se si considera poi la disposizione in diagonale delle due tipologie di fibre, si può osservare che la crisi del rinforzo in FF non ha interessato fenomeni di

debonding anche a crisi completa, aspetto quest'ultimo di grande importanza in quanto consente alle fibre di lavorare al massimo delle loro prestazioni nonostante esibiscano valori di resistenza a trazione inferiori a quelli delle fibre sintetiche. Riguardo, ancora, le modalità di crisi dei rinforzi con *FF*, non si sono evidenziati sostanziali differenze con quelle mostrate dalle fibre di canapa. Nel confronto tra le resistenze globali a taglio, invece, le differenze sono più marcate: l'incremento medio risulta essere più del doppio di quello apportato dai tessuti unidirezionali in *HF*. Ne consegue che, nel caso dei compositi con FRCM, data la forte compatibilità con le fibre naturali, il dimensionamento del rinforzo ($E_f \rho_f = \text{costante}$) attraverso la relazione [4.1] necessita di una rivisitazione che tenga conto delle resistenze dei materiali oltre che delle loro rigidezze estensionali. Per quanto concerne, invece, l'efficacia in termini di rigidezza globale dei pannelli, gli incrementi di modulo elastico prodotti dai materiali di rinforzo danno conferma dei valori risultanti dalla loro caratterizzazione sperimentale o contenuti nelle schede tecniche dei materiali (nel caso delle fibre di vetro).

La Figura 4.28 contiene i diagrammi risultanti dall'attività sperimentale in riferimento alle due disposizioni geometriche del rinforzo.



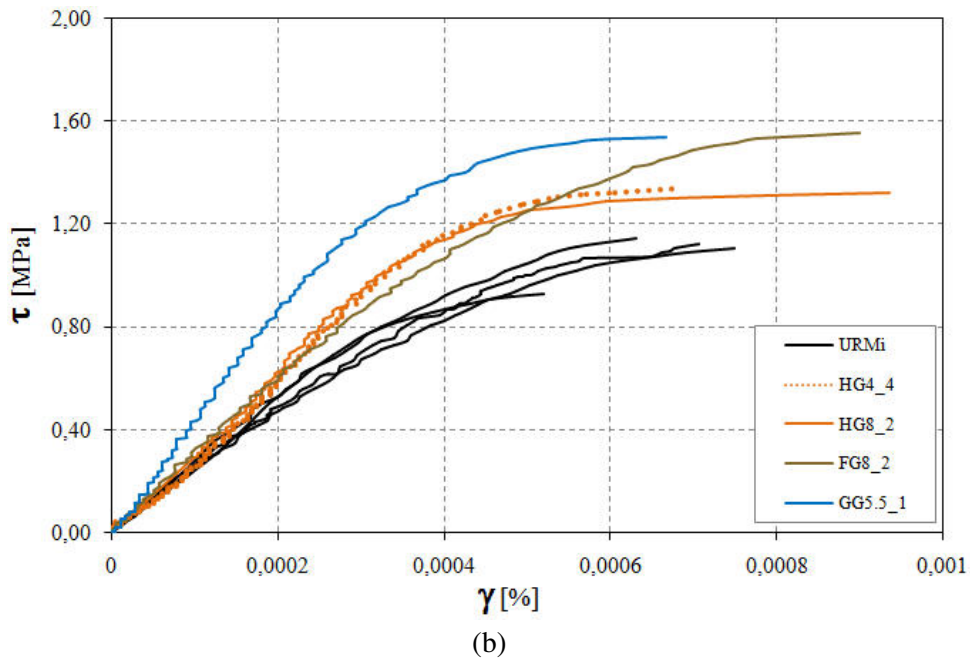


Figura 4.28 Curve τ - γ

(a) rinforzi in diagonale; (b) rinforzi a reticolo ortogonale

In generale, se si osservano le curve (a) e (b), si può notare che le deformazioni aumentano in prossimità della rottura per i casi con rinforzo, rendendo il comportamento complessivo sensibilmente meno fragile. Inoltre, sembrerebbe che l'estensione di superficie coinvolta direttamente dal materiale di rinforzo costituisca un fattore di maggiore rilevanza rispetto a parametri quali la quantità o la rigidità del materiale applicato. Pertanto, la presente indagine può trovare ulteriori sviluppi, inserendo nuove casistiche sperimentali nello studio dell'influenza della superficie di adesione, quali ad esempio nuovi sistemi di rinforzo strutturale FRCM con reti in fibre naturali.

4.3. Bibliografia

- [1] DM del 20/11/1987, Norme Tecniche per la progettazione, esecuzione e collaudo degli edifici in muratura e per il loro consolidamento, (1987).
- [2] Circolare 02/02/2009, n.617, Istruzioni per l'Applicazione delle "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui al decreto ministeriale 14 Gennaio 2008.
- [3] A. Borri, M. Corradi, *Il Problema della Valutazione della Resistenza a Taglio della Muratura mediante Prove Sperimentali*, X Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia" (ANIDIS), Potenza-Matera, 9-13 Settembre (2001).
- [4] CNR, 2004. *CNR-DT 200/2004, Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati – Materiali, Strutture di c.a. e di c.a.p., Strutture murarie*, Consiglio Nazionale delle Ricerche.
- [5] M.R. Valluzzi, D. Tinazzi, C. Modena, Shear behavior of masonry panels strengthened by FRP laminates, *Construction and Building Materials*, 16(7), pp. 409-416 (2002).
- [6] P. Alcaïno, H. Santa Maria, *Shear response of brick masonry walls externally retrofitted with bonded carbon fiber fabric*, 8th Pacific Conference on Earthquake Engineering, Singapore, (2007).
- [7] ASTM, 2007. *ASTM E 519-07, Standard Test Method for Diagonal Tension (Shear) in Masonry Assemblages*, American Society for Testing and Materials.
- [8] MIT, 2009. *Circolare n. 617 del 02/02/2009: Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni" di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008*, Ministero Infrastrutture e Trasporti.

- [9] RILEM, 1994. *RILEM TC 76-LUM: Diagonal tensile strength tests of small wall specimens*, International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systeme and Structures.
- [10] A. Borri, G. Castori, M. Corradi, *Sperimentazioni sul Comportamento Meccanico di alcune Murature Storiche Aquilane*, Atti del XIV Convegno Nazionale su l'Ingegneria Sismica in Italia (ANIDIS), Bari, 18-22 Settembre (2011).
- [11] F. Parisi, I. Iovinella, A. Balsamo, N. Augenti, A. Prota, *Indagine sperimentale sulla resistenza a taglio della muratura di tufo rinforzata con materiali compositi a matrice inorganica*, Atti del XIV Convegno Nazionale su l'Ingegneria Sismica in Italia (ANIDIS), Bari, 18-22 Settembre (2011).
- [12] A. Venneri, P. Taforel, F. Dubois, *Modelli di pannelli murari rinforzati con fibre naturali: analisi numerica e sperimentale*, 40° Convegno Nazionale AIAS, Palermo, Settembre (2011).

Capitolo 5

Modellazione numerica con il codice di calcolo LMGC90

5.1. Introduzione

In questo capitolo viene presentata un'analisi numerica dei pannelli murari, rinforzati e non, sottoposti ai carichi quasi statici di compressione diagonale. L'obiettivo è stato quello di fornire dei modelli capaci di descrivere il comportamento dei pannelli sotto le azioni di taglio nel piano sulla base della risposta sperimentale rilevata durante le prove di laboratorio.

In generale, si possono seguire diversi approcci per modellare le strutture in muratura da un punto di vista numerico. Le strategie di base possono essere classificate in [1]:

- *Metodi continui*: il metodo delle differenze finite (FDM), il metodo degli elementi finiti (FEM), e il metodo degli elementi di contorno (BEM);
- *Metodi discreti*: il metodo degli elementi discreti (DEM), e il metodo dei sistemi discreti di frattura (DFN);
- *Metodi ibridi Continui/Discreti*.

Per il presente lavoro, il carattere discontinuo delle strutture studiate ha orientato la scelta verso un approccio per elementi distinti. I metodi continui, infatti, come il metodo degli elementi finiti, non sono sempre capaci di descrivere tutti i fenomeni che si producono in questo genere di strutture, a condizione che il numero di superfici tra i blocchi non divenga importante. L'approccio continuo descrive il mezzo da un punto di vista macroscopico, contrariamente a quello per elementi distinti che utilizza una definizione su scala microscopica basandosi su una tecnica di discretizzazione temporale per differenze finite.

Più specificamente, l'attività numerica è stata condotta con un metodo basato sull'algoritmo NSCD (*Non Smooth Dynamic Contact*), introdotto e sviluppato da J.J. Moreau e M. Jean [2-5] e implementato nel codice di calcolo LMGC90 (*Logiciel de Mécanique Gérant le Contact*) (Dubois, 2003). Quest'ultimo è stato sviluppato al "Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil" dell'Università di Montpellier II per essere una piattaforma software aperta [6-8], ideale per la modellazione di una vasta collezione di oggetti (2D/3D) in interazione. Esso permette di gestire i problemi multicontatto consentendo di modellare il comportamento globale di sistemi discreti, quali i materiali granulari e le murature [9].

Nel prosieguo viene fornita una presentazione del metodo NSCD, con le sue caratteristiche peculiari e i vantaggi offerti rispetto agli altri metodi discreti, seguita da una breve illustrazione delle principali strategie di modellazione. Successivamente vengono presentati i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche insieme alle analisi riguardanti la calibrazione dei modelli volumetrici e di interazione tra gli elementi strutturali costituenti il materiale muratura, e tra questi e i materiali di rinforzo.

5.2. Il metodo NSCD

Nonostante i numerosi studi relativi alla cinematica dei corpi solidi, molte difficoltà a riguardo non sono state ancora superate, come il fenomeno complesso che si manifesta durante l'urto tra due corpi. Le caratteristiche principali possono riassumersi nella durata assai breve del contatto e nelle grandi entità delle forze generate.

Esistono diversi modelli per rappresentare questo fenomeno. In questa sede ci si limita a descrivere il metodo *Non Smooth Contact Dynamics* (NSCD) appartenente alla scuola newtoniana dei corpi indeformabili (ma che può essere applicato anche a quelli deformabili) e che presenta uno schema numerico implicito. Tale metodo è capace di prendere in considerazione gli eventuali urti e irregolarità che possono prodursi. Di seguito vengono fornite informazioni di base sulla cinematica dei corpi rigidi, seguite dall'equazione della dinamica alla base del metodo; successivamente, si passano in rassegna le principali leggi di contatto usate nell'algoritmo di risoluzione [10].

5.2.1. Parametrizzazione ed equazione della dinamica

Sia $\{O_m, m = 1, \dots, N\}$ una collezione di corpi rigidi. Ogni corpo al contatto è fatto di uno o più corpi della collezione. Si consideri ora una coppia di corpi ai quali ci riferiamo come *candidato* e *antagonista*, indicati con O_m e O_n , rispettivamente. Per motivi di semplicità, si assume che esiste un unico paio di punti prossimali, P appartenente al contorno del candidato ∂O_m e P' appartenente al contorno dell'antagonista ∂O_n , riducendo al minimo la distanza MM' , con $M \in \partial O_m$ e $M' \in \partial O_n$ tra i due contorni. Questi punti si chiameranno punto candidato e punto antagonista, rispettivamente.

Si assume inoltre che esiste un unico versore normale a ∂O_m in P e a ∂O_n in P' , denotato con \bar{n} , diretto dal corpo antagonista al corpo candidato. Queste assunzioni sono soddisfatte quando i corpi sono strettamente convessi (dischi 2D, sfere 3D, ...). Altrimenti, se i corpi si incontrano in diversi punti, per esempio quando i corpi sono poligoni con due facce parallele, bisogna applicare regole speciali. Un'altra situazione è il caso in cui i corpi si sovrappongono e che deve essere considerato nella simulazione numerica. Il concetto di *contattore* permette di costruire un database conveniente. Un contattore è un corpo, o parte di esso, o una parte virtuale attaccata a questo corpo, in cui i punti candidato-antagonista sono fissati con un'appropriata regola. In altre parole, "un paio di candidati al contatto" (o semplicemente un candidato al contatto) è una coppia unica di corpi (o contattori) candidato-antagonista, su cui è selezionato un unico paio di punti candidato-antagonista, dotata di un versore normale diretto dal contattore antagonista

al *contattore candidato*. Le coppie candidato-antagonista sono indicate con lettere greche. Una coppia candidato α è una coppia $\alpha=(m,n)$, dove m è l'indice di un contattore candidato e n è l'indice di un contattore antagonista. E' possibile associare al vettore \bar{n} una base ortonormale $(\bar{i}, \bar{n}, \bar{s})$. Questa base, con P' come origine, rappresenta il *riferimento locale* che viene utilizzato per definire le variabili locali (Fig. 5.1).

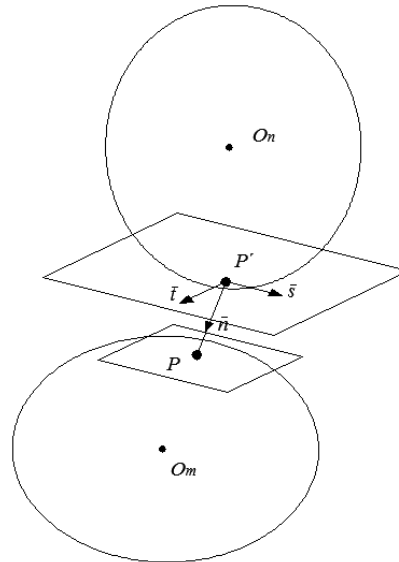


Figura 5.1 Riferimento locale

Esistono diversi algoritmi che permettono di costruire una lista di candidati al contatto abbastanza vicini. Occorre determinare, poi, i riferimenti locali e i gaps (distanze tra i contattori). Questo è un compito facile quando i contattori sono dischi o sfere mentre può essere abbastanza complesso nel caso di poligoni o poliedri. L'ordinamento può essere oneroso nel tempo e può costituire un vero problema nei metodi espliciti con piccoli passi temporali. Nei metodi con passi di tempo grandi, invece, quali il metodo NSCD, il tempo di ordinamento è meno importante rispetto al tempo del ciclo di iterazione.

Le forze di contatto tra due corpi sono vincolate dalla legge di azione e reazione. Il calcolo di tali forze col metodo NSCD viene eseguito in due fasi. Per prima cosa, il risultato dell'interazione del corpo antagonista O_n sul corpo candidato O_m può essere considerato pari alla forza r_α che agisce al contatto

(con α il candidato al contatto). Si denota con g_α la distanza tra i corpi lungo la direzione normale, quantità che sarà negativa nel caso di compenetrazione tra gli stessi. Successivamente, viene definito un operatore lineare H_α che collega le forze locali con quelle globali tramite la seguente relazione:

$$R_\alpha = H_\alpha(q)r_\alpha$$

dove $H_\alpha(q)$ è un operatore contenente le informazioni locali sui contattori e q è un parametro relativo alla configurazione che può rappresentare lo spostamento discretizzato o qualche coordinata generalizzata del moto rigido. Infine, la forza di contatto globale può essere ottenuta attraverso la relazione:

$$R = \sum_{\alpha} R_\alpha$$

Lo stesso procedimento viene impiegato per il calcolo delle velocità dei corpi che possono essere espresse nel riferimento locale. La velocità relativa u_α nel punto di contatto è definita, per i due punti a contatto, attraverso la seguente equazione:

$$u_\alpha = H_\alpha^T(q)\dot{q}$$

dove H^T è il trasposto di H e \dot{q} è la derivata nel tempo di q . La velocità relativa u_α è scomposta in una parte normale rappresentata da $u_{\alpha,n}$ e in una parte tangenziale $u_{\alpha,T} = (u_{\alpha,s}, u_{\alpha,t})$.

Occorre osservare che la derivata della funzione gap è pari a:

$$t \rightarrow g_\alpha(t) \quad u_\alpha \bullet n_\alpha = 0$$

Durante l'evoluzione di un modello multicontatto, possono verificarsi degli urti. Come risultato, essi producono delle discontinuità di velocità per cui rendono impossibile definire l'accelerazione come l'usuale derivata seconda nel tempo del parametro di configurazione. L'equazione del moto sarà scritta come:

$$Md\dot{q} = F(t, q, \dot{q})dt + dR \quad [5.1]$$

dove dt è la misura di Lebesgue su \mathfrak{R} , $d\dot{q}$ è una misura differenziale che denota l'accelerazione e dR è una misura reale non negativa rappresentante forze e impulsi. La matrice M nell'eq. [5.1] è la matrice di massa mentre il vettore $F(t, q, \dot{q})$ collega le forze interne ed esterne discretizzate che agiscono sul sistema.

5.2.2. Leggi di contatto attritivo

Le leggi di interazione tra corpi, nei casi in cui questi siano fatti dello stesso materiale, sono complesse a causa dei fenomeni fisici e chimici che si verificano al contorno. Per quanto riguarda i materiali granulari e/o le murature, le principali leggi che regolano le interazioni al contatto tra i corpi sono quelle di unilaterità e di attrito secco. Va precisato che nel codice LMGC90 esistono altre leggi di interazione, comprese quelle che sono state utilizzate per la modellazione della muratura e dei rinforzi e che descriveremo nel prosieguo.

Contrariamente al metodo di Cundall [11], appartenente alla scuola newtoniana dei corpi deformabili, nel metodo NSCD i corpi non possono compenetrarsi. Ciò significa che i corpi candidati al contatto devono evitare di attraversare la frontiera dei corpi antagonisti. Si assume quindi per convenzione che la componente normale della forza di reazione è sempre positiva o uguale a zero quando il contatto scompare. Questo comportamento conduce alla rappresentazione classica di Signorini (Fig. 5.2). In effetti, l'unilateralità consiste nel considerare che i due corpi non si penetrano, riflettendosi nel fatto che la distanza interstiziale g (gap) deve rimanere positiva ($g \geq 0$). In altre parole, finché c'è il contatto, la reazione che permette di garantire il legame $g = 0$ può soddisfare diverse leggi. La più semplice è quella che esclude tutti i fenomeni di adesione o attrazione tra i blocchi, vale a dire $r_n > 0$ (forza di reazione normale). Infine, quando non c'è contatto, cioè quando $g > 0$, la reazione R è nulla ($R = 0$).

$$g \geq 0 \quad r_n \geq 0 \quad g \bullet r_n = 0 \quad [5.2]$$

In seguito ai risultati ottenuti da Moreau [5], si propone di utilizzare una formulazione basata sulla velocità che ben si adatta a un trattamento numerico:

$$se \quad g \geq 0 \Rightarrow \quad u_n \geq 0 \quad r_n \geq 0 \quad u_n \bullet r_n = 0 \quad [5.3]$$

Se il movimento è sufficientemente regolare, cioè se esiste u , e r_n è una funzione continua del tempo, allora le equazioni [5.2] e [5.3] saranno equivalenti.

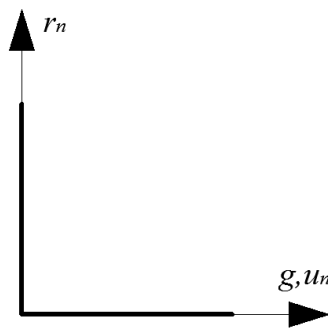


Figura 5.2 Legge di Signorini

La gestione del movimento dei corpi in un sistema necessita di leggi costitutive che tengano conto dei parametri fisici del modello. Una legge di attrito è una relazione tra la forza di attrito r_t e la velocità di scorrimento u_t . L'attrito secco ha come caratteristica il fatto che la forza motrice deve superare una certa soglia per provocare lo scorrimento. La legge più comune che considera l'attrito secco è la legge di Coulomb (Fig. 5.3).

Si può riassumere quanto detto attraverso la seguente relazione:

$$\begin{cases} se & \|u_t\| = 0, & \|r_t\| \leq \mu r_n \\ se & \|u_t\| \neq 0, & \|r_t\| = \mu r_n, \quad u_t = -k r_t, \quad k \geq 0 \end{cases} \quad [5.4]$$

La [5.4] esprime che la reazione, di componenti normale r_n e tangenziale r_t , si trova nel cono di Coulomb ($\|r_t\| \leq \mu r_n$, μ coefficiente di attrito). La seconda equazione della [5.4] mostra che se si produce lo scorrimento, la forza di attrito r_t è opposta alla velocità di scorrimento (con k = rigidità).

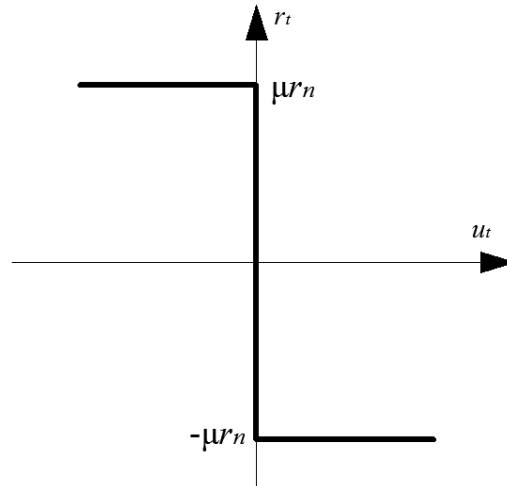


Figura 5.3 Legge di Coulomb

5.2.3. Struttura dell'approccio NSCD

In base a quanto esposto, risulta utile riassumere le principali caratteristiche dell'approccio NSCD in una struttura schematica (Fig. 5.4).

La relazione tra dinamica e interazione, che consente di risolvere il problema, si effettua per mezzo degli operatori lineari $H^T(q)$ e $H(q)$, costruiti grazie a considerazioni cinematiche e di dualità, permettendo di collegare velocità relative al contatto e velocità dei corpi o, ancora, di calcolare la risultante degli sforzi di contatto a partire dalle forze di contatto.

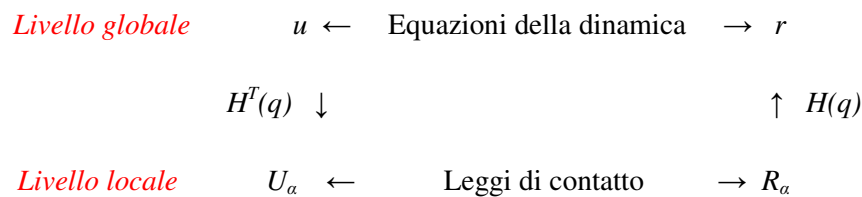


Figura 5.4 Schema sinottico dell'approccio NSCD

5.2.4. Schema numerico per l'integrazione nel tempo

Una delle caratteristiche più interessanti dello schema di integrazione con passi temporali è incluso nel fatto che esso non deve gestire esplicitamente gli eventi di contatto, contrariamente agli schemi abituali di tipo *event-driven*. Quando si procede a una discretizzazione temporale sugli intervalli $[t_i, t_{i+1}]$ di lunghezza finita $h = t_{i+1} - t_i$, il problema del contatto è risolto in termini di misura di questo intervallo. Per realizzare questa proprietà, l'eq. [5.1] è integrata su ogni suddivisione, per cui si ottiene:

$$\left\{ \begin{array}{l} M(\dot{q}_{i+1} - \dot{q}_i) = \int_{t_i}^{t_{i+1}} F(t, q, \dot{q}) dt + R_{i+1} \\ q_{i+1} = q_i + \int_{t_i}^{t_{i+1}} \dot{q}(t) dt \end{array} \right. \quad [5.5]$$

dove la variabile \dot{q}_{i+1} indica l'approssimazione del limite destro della velocità al tempo t_{i+1} , e $q_{i+1} \approx q(t_{i+1})$. Per il contatto, dR si approssima con la misura dell'intervallo temporale $[t_i, t_{i+1}]$ con l'ausilio di:

$$dR([t_i, t_{i+1}]) = \int_{[t_i, t_{i+1}]} dR \cong R_{i+1}$$

Per approssimare i due integrali del sistema [5.5], si adotta il θ -metodo, che è uno schema del primo ordine che utilizza solo il parametro di configurazione e le sue derivate prime. Va precisato che un θ -metodo è uno schema implicito, identico allo schema di Eulero all'indietro (*BE* – Backward Euler) quando $\theta = 1$. La condizione di stabilità dello schema implica che θ resti tra 0,5 e 1. Tale approssimazione porta alla seguente equazione:

$$\left\{ \begin{array}{l} \int_{t_i}^{t_{i+1}} F(t, q, \dot{q}) dt = h \vartheta F(t_{i+1}, q_{i+1}, \dot{q}_{i+1}) + h(1 - \vartheta) F(t_i, q_i, \dot{q}_i) \\ q_{i+1} = q_i + h \vartheta \dot{q}_{i+1} + h(1 - \vartheta) \dot{q}_i \end{array} \right.$$

Per completare la forma discreta dell'equazione della dinamica, deve essere eseguita una discretizzazione delle leggi di contatto attrittive. Discussioni più dettagliate sull'argomento possono trovarsi in Moreau (1988, 1998), Jean et al. (2001), Jean e Moreau (1992), Renouf et al. (2004, 2006).

In conclusione, i principi generali del metodo NSCD possono essere riassunti semplicemente nello schema seguente:

	- Rilevamento dei contatti
Cicli temporali	- Determinazione delle forze di contatto e delle velocità dei corpi
	- Aggiornamento delle posizioni dei corpi

Per la risoluzione si utilizza un “solver” basato sul metodo non lineare di Gauss-Seidel. In generale, l'unicità della soluzione non è garantita per le particelle perfettamente rigide. Tuttavia, riinizializzando ogni passo di calcolo con le forze computate nel passo precedente, l'insieme delle soluzioni ammissibili si restringe alle sole oscillazioni attorno alla soluzione numerica. In altre parole, affinché il metodo converga verso la soluzione esatta si deve verificare che l'errore diminuisca a ogni iterazione. Questo accade se il raggio spettrale della matrice di convergenza risulta strettamente minore di 1, il che implica la non singolarità del risultato.

Il metodo è in grado di trattare problemi di interazione tra corpi rigidi o deformabili tramite uno schema implicito. Questa importante caratteristica consente di impiegare dei passi temporali più grandi rispetto a quelli richiesti, ad esempio, da un approccio di tipo MD (Dinamica Molecolare) [10]; di contro, il numero di operazioni da effettuare è molto più grande (risoluzione iterativa, costruzione degli operatori di trasformazione, etc.).

5.3. Individuazione del contatto

Nella meccanica dei mezzi discreti, i punti di contatto devono essere scelti in modo pertinente. Nel caso delle strutture in muratura, questa operazione costituisce una fase molto delicata, più complessa rispetto al rilevamento del contatto nei mezzi granulari costituiti generalmente da particelle di forma circolare (2D) o sferica (3D). La muratura, in effetti, può essere vista come un materiale granulare ordinato, composto, però, da oggetti poliedrici in contatto tra loro. Per forme di questo tipo il numero di punti prossimali è molto esteso per cui nella maggior parte dei casi si sceglie di ridurre le configurazioni di contatto a un'associazione di legami puntuali.

L'individuazione del contatto rappresenta una parte importante della modellazione numerica in termini di affidabilità della soluzione e sforzo computazionale. Per ridurre quest'ultimo, correlato alla complessità degli algoritmi, i metodi di rilevamento sono suddivisi in diverse fasi [10]:

- *Fase ampia*: consiste nel costruire una lista di oggetti adiacenti tra loro all'interno di uno specifico criterio di vicinanza (tolleranza). Questa fase richiede una descrizione approssimativa della geometria degli oggetti basata principalmente sulla delimitazione dei volumi⁴ (Bounding Volumes – BVs);
- *Fase ristretta*: (non obbligatoria) migliora il lavoro eseguito nella fase precedente. Per gli oggetti più complessi può consistere nello specificare le parti dei corpi interessate dal contatto;
- *Determinazione del contatto*: le coppie di oggetti che si toccano sono individuate nella lista insieme alle zone di contatto, ai riferimenti locali, alle distanze, e così via. Questa fase andrebbe adattata alla strategia numerica.

⁴ Esistono diversi tipi di BVs: sfera, riquadro con assi allineati (AABB), riquadro di delimitazione orientato (OBB), politopo con orientazione discreta k (kDOP), e involucro convesso.

In riferimento alla valutazione delle condizioni di contatto tra corpi poliedrici convessi è utile introdurre alcune idee preliminari. È importante tener presente, innanzitutto, che possono presentarsi situazioni differenti al contatto (separazione, penetrazione o contatto radente), e che esistono vari metodi numerici per riuscire a rilevarli. Per contatti radenti ideali si possono verificare i casi seguenti: punto di contatto (Fig. 5.5a), linea di contatto (Fig. 5.5b) o superficie di contatto (Fig. 5.5c).

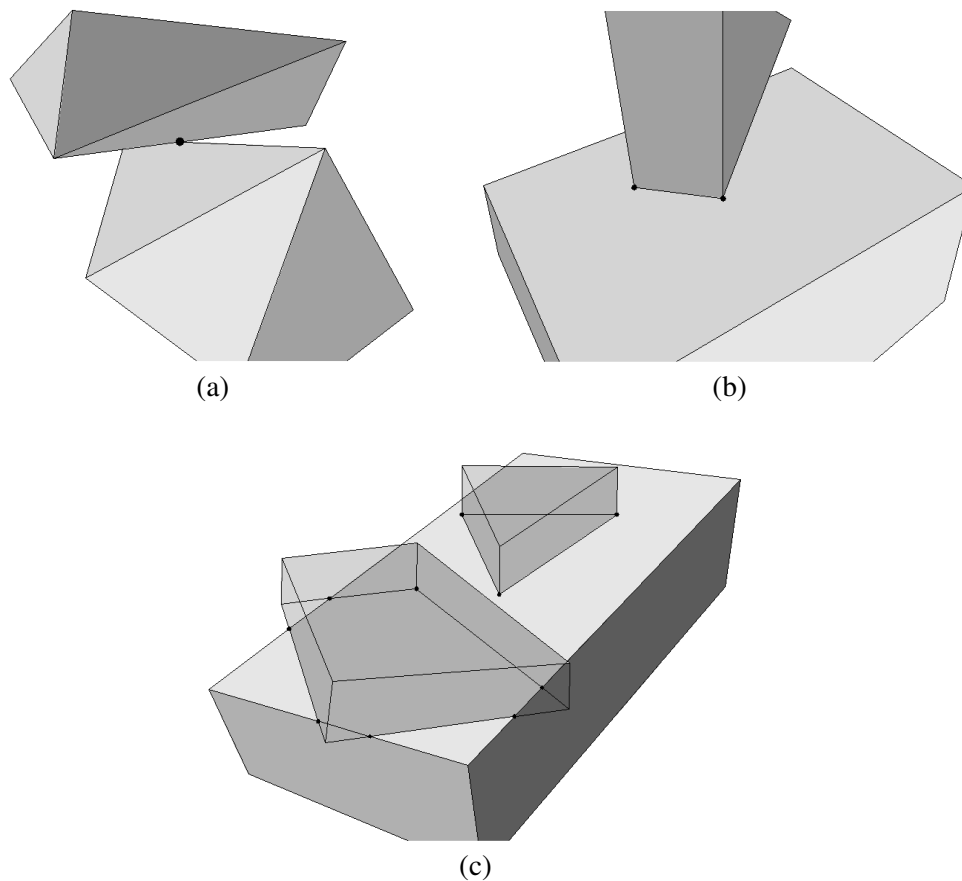


Figura 5.5 *Casi di contatto ideale per corpi poliedrici*
 (a) punto, (b) linea e (c) superficie di contatto

Le differenti situazioni descritte sollevano questioni piuttosto difficili da risolvere, quale ad esempio il problema della scelta di come modellare un contatto rappresentato da una linea o da una superficie. Come già accennato in

precedenza, la soluzione classica prevede di considerare un numero finito di punti con l'eventualità, però, che questa scelta possa dar luogo a una non singolarità locale della forza di contatto. L'unicità può essere comunque recuperata con l'introduzione di ulteriori relazioni tra forze di contatto nodali. Una linea di contatto può essere rappresentata da due punti e una superficie di contatto da tre punti. In quest'ultimo caso, poiché in alcune situazioni risulta difficile selezionare solo tre nodi (Fig. 5.5c), una soluzione potrebbe essere quella di introdurre un gran numero di punti lasciando che il solver selezioni quelli forza-trasmittenti. La stabilità meccanica dovrebbe aumentare nel caso in cui i nodi siano posizionati sui bordi che delimitano la superficie di contatto, anche se, da un punto di vista pratico, è meglio posizionarli all'interno.

Si possono descrivere a questo punto due metodi utilizzati per l'individuazione dei contatti tra corpi di geometria complessa:

- Il metodo di tipo *Shadow Overlap* introdotto da J.J. Moreau;
- Il metodo di tipo *Common Plane* introdotto da P.A. Cundall.

Tralasciando i particolari che interessano il primo metodo, applicato maggiormente ai materiali granulari, si descrivono brevemente le caratteristiche peculiari del metodo del "piano comune", usato con successo nella modellazione delle strutture in muratura, oltre che per le masse rocciose fratturate.

Se due poliedri convessi sono separati o radenti, esiste un piano di separazione che definisce due sottospazi, ciascuno contenente un oggetto. In molte situazioni, tale piano non è unico, ma quando esiste si può scegliere che sia una faccia di uno dei due poliedri o parallelo a due bordi (uno per ogni poliedro) e contenente uno degli spigoli (la normale al piano è il prodotto vettoriale tra le direzioni dei due bordi) (Fig. 5.6). In ogni caso, il metodo non fornisce la distanza tra i due corpi. Cundall propone un metodo conveniente per computare tale quantità sfruttando l'idea del piano di separazione: il metodo del "Piano Comune". Siano A e B due corpi poliedrici convessi, G_A e G_B i rispettivi centri di inerzia e X_A e X_B i rispettivi insiemi di vertici.

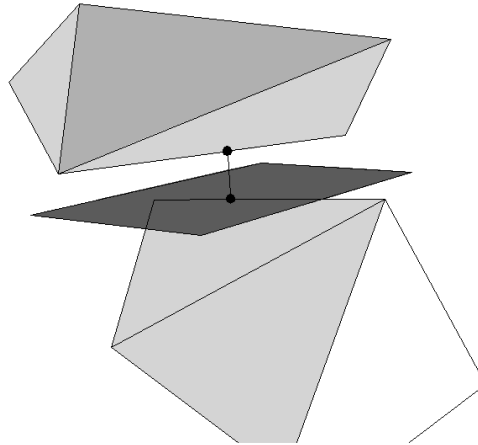


Figura 5.6 Piano di separazione

Considerando un piano P contenente il punto $M=(G_A+G_B)/2$ e perpendicolare a un vettore normale n , si definiscono le distanze:

$$d^+ = \min\{n \cdot MX : X \in X_A\}$$

$$d^- = \max\{n \cdot MX : X \in X_B\}$$

L'algoritmo di Cundall si basa sulla ricerca iterativa di un piano comune tra i due poliedri che abbia n tale da massimizzare la distanza $d^+ - d^-$.

Una volta calcolate le distanze e i vettori normali tra gli oggetti, bisogna definire la zona dove le forze di contatto agiscono. Solo i contatti che si verificano lungo una linea o una superficie necessitano di essere considerati. Questo può essere fatto seguendo i seguenti punti:

- costruire un piano comune (Cundall) tra gli oggetti A e B ;
- fissare su questo piano due sottoinsiemi dei vertici di A e B , rispettivamente, più vicini al piano con una assegnata tolleranza ε ;
- costruire l'involuppo convesso dei nodi segnati nei sottoinsiemi;
- calcolare l'intersezione di questi involuppi;
- scegliere i punti di contatto in questo dominio e ricostruire distanza, normale al contatto, e così via.

5.4. Micro e macro-modellazione

Come noto, la muratura è un materiale che esibisce proprietà anisotrope a causa dei giunti di malta che agiscono come piani di debolezza. Il passaggio a una rappresentazione numerica del suo comportamento può concentrarsi sugli elementi resistenti (mattoni, blocchi, etc.) e sulla malta, oppure su una macro-modellazione della muratura come materiale composito (Rots, 1991). A seconda del livello di accuratezza desiderato è possibile utilizzare le seguenti strategie di modellazione (Fig. 5.7):

- *Micro-modellazione dettagliata*: le diverse unità e la malta nei giunti sono rappresentati da elementi di continuità, mentre l'interfaccia malta-unità è individuata da elementi discontinui;
- *Micro-modellazione semplificata*: le unità espanse sono rappresentate mediante elementi continui, mentre il comportamento dei giunti di malta e dell'interfaccia malta-unità è concentrato in elementi discontinui;
- *Macro-modellazione*: elementi resistenti, malta e interfaccia malta-unità sono descritti mediante elementi continui equivalenti.

D'ora in avanti sarà utilizzata nel testo la denominazione "mattono" al posto di "unità", trattandosi dell'elemento resistente adoperato durante l'attività sperimentale.

Nel primo approccio sono presi in conto il modulo di Young, il coefficiente di Poisson ed eventualmente le proprietà anelastiche dei mattoni e della malta. L'interfaccia costituisce una superficie potenziale di frattura o di scorrimento e presenta una rigidità iniziale fittizia in modo da evitare l'interpenetrazione di materia. Questo tipo di approccio permette di studiare precisamente le azioni combinate di mattoni, malta e interfaccia.

Nel secondo approccio, ogni giunto è concentrato in una interfaccia "media" mentre i mattoni sono espansi per mantenere invariata la geometria del problema. La muratura è quindi considerata come un insieme di blocchi elastici collegati per mezzo di una superficie potenziale di scorrimento.

Rispetto all'approccio precedente si perde in accuratezza nella descrizione del comportamento della muratura dal momento che non è incluso l'effetto dovuto al coefficiente di Poisson della malta.

Il terzo approccio non fa distinzione tra mattoni e giunti ma tratta la muratura come un continuo omogeneo anisotropo.

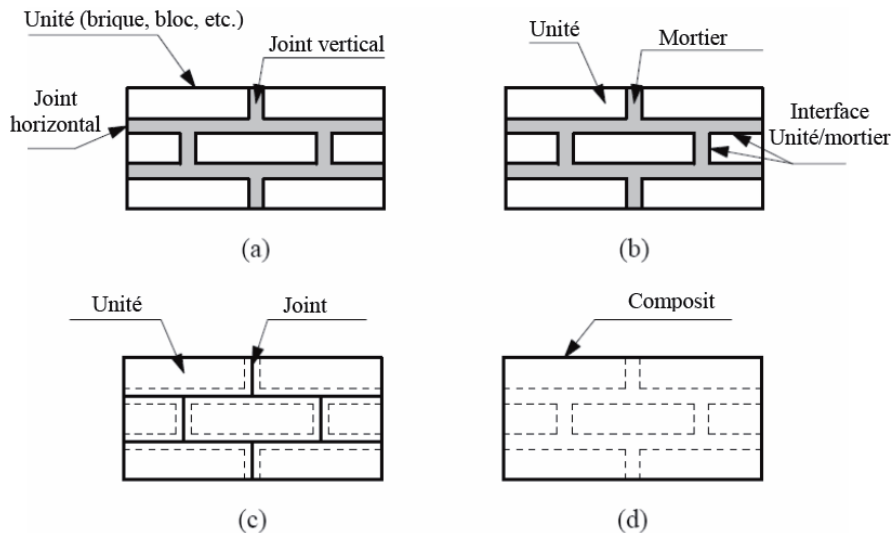


Figura 5.7 Strategie di modellazione per le strutture in muratura:
 (a) elemento modulare di muratura; (b) micro-medellazione dettagliata;
 (c) micro-modellazione semplificata; (d) macro-modellazione

Una strategia non può essere preferita all'altra poiché esistono diversi campi di applicazione per i micro e i macro-modelli. L'approccio della micro-modellazione viene preferito quando si vogliono avere maggiori informazioni circa il comportamento locale delle strutture in muratura. Questo tipo di modellazione si applica specialmente allo studio di dettagli costruttivi. Un approccio mediante macro-modellazione, invece, viene utilizzato quando la struttura è composta da pareti solide dalle dimensioni tali da assicurare che le sollecitazioni attraverso o lungo i muri siano sostanzialmente uniformi. Si tratta di un approccio evidentemente orientato verso la pratica grazie alla riduzione dei tempi di calcolo e di memoria. Ne consegue che questo tipo di modellazione è apprezzato quando si rende necessario un buon compromesso tra la precisione e l'efficienza computazionale.

Entrambe le strategie di modellazione richiedono una buona descrizione sperimentale dei materiali. Tuttavia, le proprietà della muratura sono influenzate da una grande varietà di fattori, tra cui le proprietà dei costituenti, la configurazione e lo spessore dei giunti, l'anisotropia e le dimensioni dei mattoni, la qualità della manodopera, l'età e le condizioni ambientali. A causa di queste diversità, la comunità scientifica ha cominciato a manifestare già da diverso tempo l'interesse nei confronti di sofisticate modellazioni numeriche in contrapposizione con la tradizione dove prevalevano delle regole, delle prove o delle formule empiriche. Occorre evidenziare che l'ottenimento di dati sperimentali che fossero utili e affidabili per i modelli numerici, spesso è stato ostacolato dalla mancanza di comunicazione tra sperimentatore e chi esegue le analisi. È pratica comune, ad esempio, menzionare e misurare la forza ignorando le caratteristiche di deformazione o non fornendo alcuna informazione riguardo le risposte post-picco. Va comunque precisato che si tratta generalmente di relazioni meccaniche difficili da monitorare e che un'attività sperimentale esaustiva richiede attrezzature adeguate, spesso costose, e tempi di realizzazione relativamente lunghi.

A ogni modo, trascurando le problematiche che investono il "connubio" fra prove sperimentali e analisi numeriche, in questo capitolo vengono illustrati i primi risultati di un'indagine numerica condotta allo scopo di riprodurre il comportamento globale sotto le azioni di taglio dei pannelli murari descritti nel capitolo precedente. Per la maggior parte dei modelli è stato utilizzato un approccio per micro-modellazione semplificata (Fig. 5.7c), supportata da quantità e relazioni meccaniche ottenute sperimentalmente attraverso prove di caratterizzazione dei materiali di base e prove su microelementi.

5.4. Indagine numerica

L'analisi numerica condotta con il codice di calcolo LMGC90 ha interessato, in prima istanza, la modellazione agli elementi discreti della muratura ordinaria in blocchi di laterizio pieno con malta di allettamento. Successivamente viene proposto un modello per il rinforzo allo scopo di interpretare il suo comportamento e la sua interazione con gli elementi murari

sui quali è applicato, tenendo conto anche del tipo di disposizione geometrica utilizzata.

Il programma consente di modellare un qualsiasi sistema discreto con la possibilità di scegliere il tipo di contattore tra una vasta gamma di forme (dischi/sfere, poligoni/poliedri, etc.) (Fig. 5.8a), le leggi di interazione (contatto, attrito, coesione, etc.) (Fig. 5.8b), e il comportamento volumetrico (rigido, elastico, etc.) (Fig. 5.8c). Un contattore lega le variabili locali alle variabili del modello volumetrico e l'individuazione del contatto tra due contattori genera interazione (zona di contatto, riferimento locale, gap, $H(q)$, etc.). Un oggetto ovviamente può contenere più contattori (*clusters*).

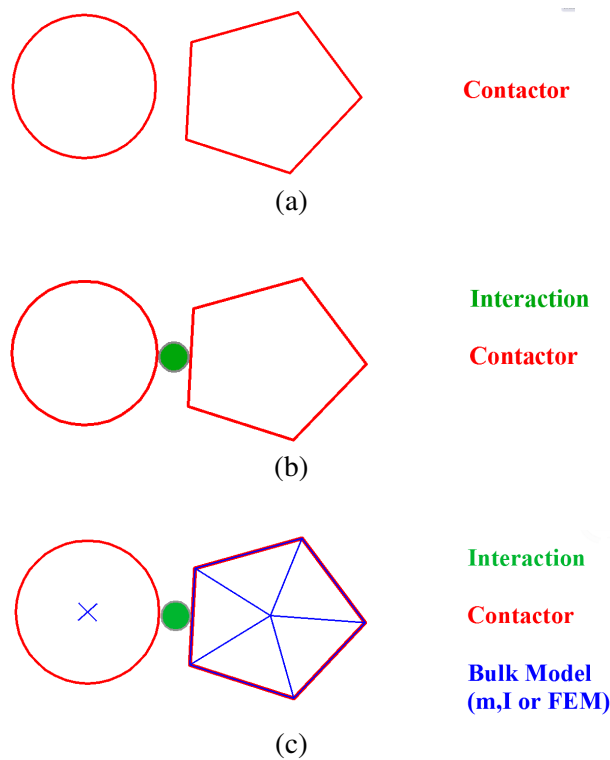


Figura 5.8 Struttura della modellazione con LMGC90

Nel prosieguo vengono discussi i risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche specificando le scelte operate per i diversi modelli (contattori, leggi di interazione e modelli volumetrici).

5.4.1. Modellazione della muratura

La calibrazione dei modelli volumetrici e delle leggi di interazione costituisce un aspetto essenziale per rappresentare adeguatamente il comportamento delle strutture modellate. Nel caso di elementi in muratura con giunti di malta, i parametri del modello vengono calibrati in modo tale da ottenere la rigidezza apparente della struttura nella fase di risposta lineare e lo stesso comportamento a rottura. Quest'ultimo si traduce nella stima della risposta al picco (coppie forza-spostamento) e nell'analisi delle superfici di rottura.

Nel presente studio viene utilizzata la prova di taglio diretto su triplette (Fig. 5.9) in cui vengono considerati i tre diversi livelli di confinamento laterale. Il modello così ottenuto viene successivamente convalidato mediante la simulazione di un'altra prova di taglio, e cioè quella di compressione diagonale (Fig. 5.10) su una struttura più complessa che sarà utilizzata nel prosieguo dell'analisi per testare i rinforzi.

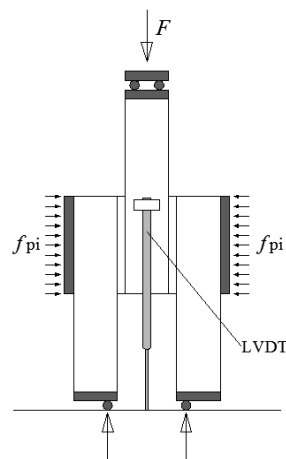


Figura 5.9

Prova di scorrimento su tripletta

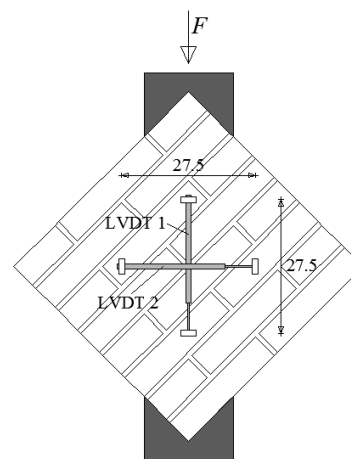


Figura 5.10

Prova di compressione diagonale

5.4.1.1. Calibrazione dei modelli volumetrici

La rigidezza apparente della struttura dipende fisicamente dalle rigidzze apportate dagli elementi componenti (mattoni e malta), descritte dal modulo

di Young dei materiali (E_b , E_m) e dal loro coefficiente di Poisson (ν_b , ν_m). Questi parametri, contenuti in Tabella 5.1 insieme alla densità dei materiali, sono stati utilizzati per una prima validazione numerica.

Tabella 5.1 *Proprietà dei materiali*

Materiali	ρ [kg/ m ³]	E [MPa]	ν [-]
Mattone	1780	1290	0.30
Malta	2090	550	0.25

La struttura della tripletta, costituita da tre mattoni e due giunti di malta modellati in 2D con il metodo degli elementi finiti, è descritta attraverso un'unica mesh per la quale il comportamento dei due materiali è rappresentato localmente da modelli elastici lineari senza danneggiamento (E , ν , ρ). La generazione delle maglie di forma triangolare è stata eseguita utilizzando il software Gmsh interfacciabile col codice di calcolo numerico adottato (Fig. 5.11). Tale software permette la creazione di mesh mediante estrusione di elementi base (punti, linee, superfici), creando così domini discretizzati altamente simmetrici.

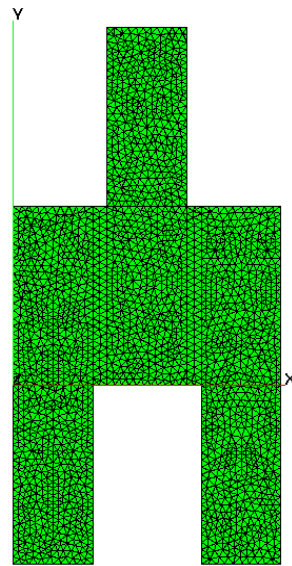


Figura 5.11 *Mesh del modello*

Ai mattoni laterali è stata impedita la traslazione verticale mentre non è stata imposta alcuna condizione di vincolo all'elemento centrale. Per quanto riguarda la forza di confinamento, essa è stata applicata sui nodi esterni della mesh, sulla parte interessata dal caricamento, attraverso una funzione della sua evoluzione. Una volta raggiunto il carico corrispondente a uno dei tre livelli di tensione normale, si è proceduto a imporre quello verticale di taglio al mattone intermedio utilizzando ancora una volta una funzione di evoluzione. L'intero processo è stato eseguito adottando un numero abbastanza elevato di passi temporali di ampiezza modesta tale da simulare una prova di tipo quasi statico.

I risultati numerici sono stati messi a confronto con quelli delle prove sperimentali (Fig. 5.12), specificatamente con le curve forza-spostamento ottenute grazie alla presenza dei trasduttori LVDT che hanno monitorato la traslazione verticale del laterizio centrale.

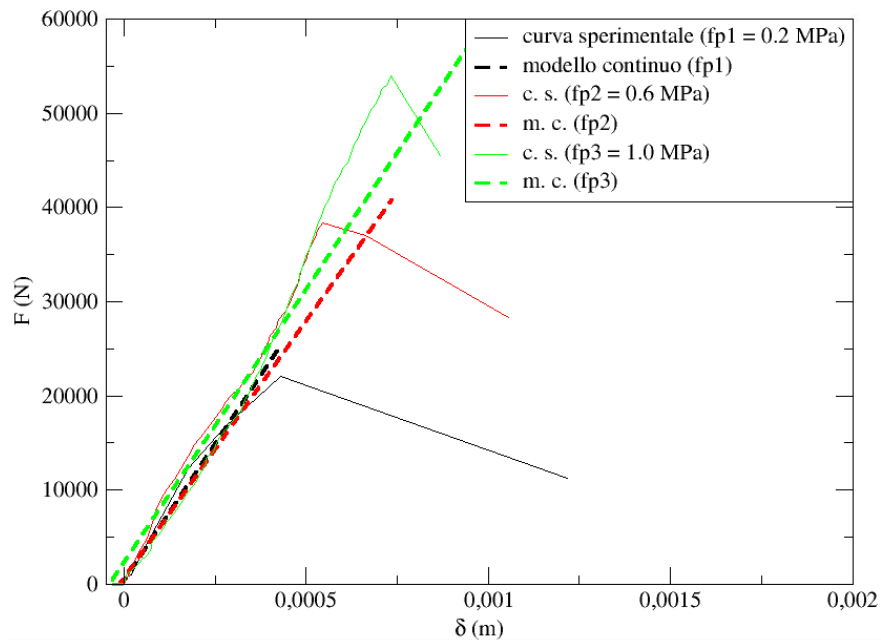


Figura 5.12 Confronto tra la risposta del modello continuo deformabile e le curve sperimentali ottenute dalle prove sulle triplette

Il programma è infatti capace di gestire il “post-elaborazione” (*post-processing*) attraverso una lista di comandi che consentono di monitorare quantità utili per l’analisi. Nel caso specifico, è stato computato lo spostamento dell’elemento caricato a taglio lungo la linea orizzontale mediana della mesh (zona in cui è stato applicato il trasduttore) in funzione della risultante degli sforzi subiti dallo stesso. Questi ultimi sono stati poi espressi in termini di forza per eseguire il confronto. La risposta della struttura sembra convalidare il modello volumetrico proposto dal momento che la rigidità apparente della tripletta viene correttamente descritta.

5.4.1.2. Calibrazione dei modelli di interfaccia e di danneggiamento

La rottura della tripletta viene introdotta dal modello coesivo di interfaccia proposto da Raous-Cangémi-Cocu (RCC) [12-14] che considera l’effetto del danneggiamento (Fig. 5.13). Tale modello propone una transizione da uno stato integro di aderenza a uno stato governato da legami unilaterali con attrito alla Coulomb. Un’idea fondamentale del modello è quella di considerare una variabile di stato supplementare per descrivere la condizione di contatto. Questa variabile, nota come “intensità di aderenza” β è stata introdotta inizialmente da Frémond (1987) e permette di distinguere un contatto classico con attrito da un contatto adesivo. In altre parole, essa traduce la proporzione dei legami adesivi attivi tra due corpi a contatto assumendo valori compresi tra 1 (aderenza perfetta) e 0 (contatto non aderente). Per $0 < \beta < 1$ l’interfaccia è parzialmente danneggiata.

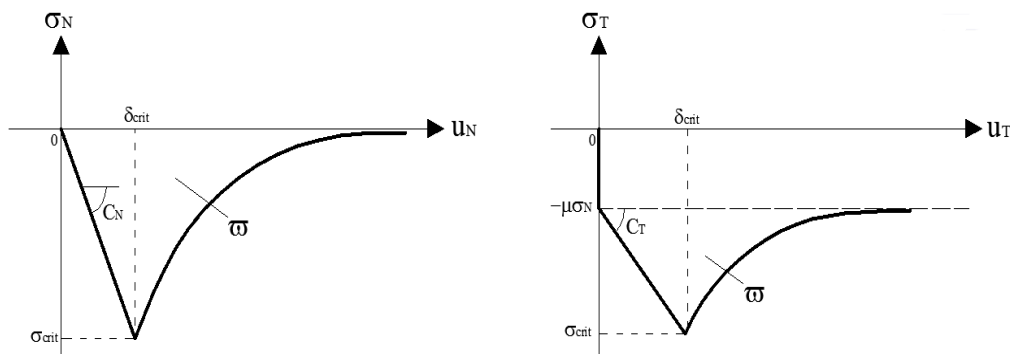


Figura 5.13 Legge di danneggiamento coesivo

Si è scelto di utilizzare tale modello allo scopo di riprodurre il comportamento della malta e dell'interfaccia malta-mattoni supponendo che il danneggiamento della muratura interessi esclusivamente i giunti mentre i blocchi continuano ad avere un comportamento indefinitamente elastico lineare. La rigidità normale C_N e quella tangenziale C_T del modello sono state calibrate in modo da conservare la rigidità apparente della struttura e utilizzando dei metodi di omogeneizzazione locale (Fig. 5.14) [15].

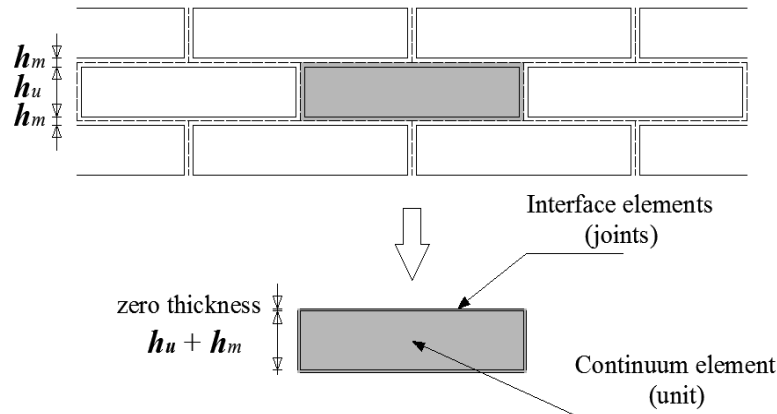


Figura 5.14 Descrizione dei modelli continuo e di interfaccia

In particolare, le quantità suddette sono state calcolate mediante le seguenti equazioni:

$$C_N = \frac{E_b E_m}{h_m (E_b - E_m)}, \quad C_T = \frac{G_b G_m}{h_m (G_b - G_m)},$$

dove E_b ed E_m sono i moduli di Young e G_b e G_m sono i moduli di taglio⁵, rispettivamente per il mattone e la malta, e h_m è lo spessore reale del giunto. La Tabella 5.2 riporta le proprietà dei materiali utilizzate nei modelli proposti.

⁵ Il modulo di taglio è correlato al modulo di elasticità e al coefficiente di Poisson dall'equazione $\nu = \frac{E}{2G} - 1$.

Tabella 5.2 Proprietà dei materiali

Modello continuo		Modello di interfaccia	
mattone	$E_b = 1290 \text{ Mpa}$ $\nu_b = 0,30$	“unità”	$E_b = 1290 \text{ Mpa}$ $\nu_b = 0,30$
malta	$E_m = 550 \text{ Mpa}$ $\nu_m = 0,25$	interfaccia	$C_N = 9,3e+10 \text{ N/m}^3$ $C_T = 3,6e+10 \text{ N/m}^3$

Per la rottura, il modello necessita di caratterizzare l'energia consumata. Tale energia di “decoesione” permette di determinare, insieme alle rigidità di interfaccia, la tensione e lo spostamento critici a rottura. Ne consegue che, con il modello di interfaccia adottato, si può determinare un gioco di parametri che consente di descrivere adeguatamente la rigidità della struttura e la rottura della tripletta (Fig. 5.15). Per le diverse prove con i livelli di precompressione variabili (0.2, 0.6 e 1.0 MPa), la crisi si è verificata per valori forza-spostamento abbastanza prossimi ai risultati sperimentali (Tab. 5.3).

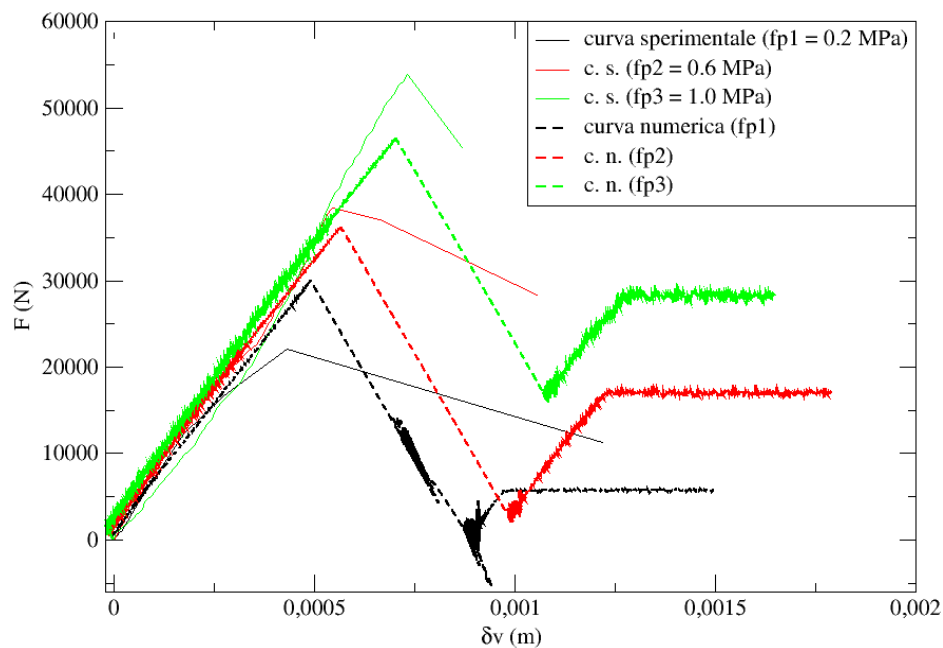


Figura 5.15 Confronto tra la risposta del modello deformabile discreto e i risultati sperimentali

Il regime post-picco si riferisce a un comportamento classico: la risposta della struttura converge verso un valore di soglia corrispondente all'attrito tra i mattoni e proporzionale ai livelli di confinamento applicati alle diverse prove.

Tabella 5.3 Stima delle risposte di picco in termini di forza massima e spostamento critico

Prova	F_{\max} (kN)		δ_{crit} (mm)	
	Exp.	Num	Exp.	Num
f_{p1}	22,06	29,95	0,440	0,490
f_{p2}	38,41	36,20	0,545	0,560
f_{p3}	53,94	46,48	0,731	0,710

Di seguito si riportano alcune immagini relative alla simulazione numerica. GMV è il programma adottato dal codice LMGC90 per la visualizzazione dei risultati di analisi in 2D. Nello specifico, le immagini fanno riferimento alla distribuzione degli sforzi all'interno della struttura secondo Von Mises (Fig. 5.16) e le diverse fasi del danno attraverso la variabile β ($0 < \beta < 1$): all'inizio, durante e a rottura completa (Fig. 5.17).

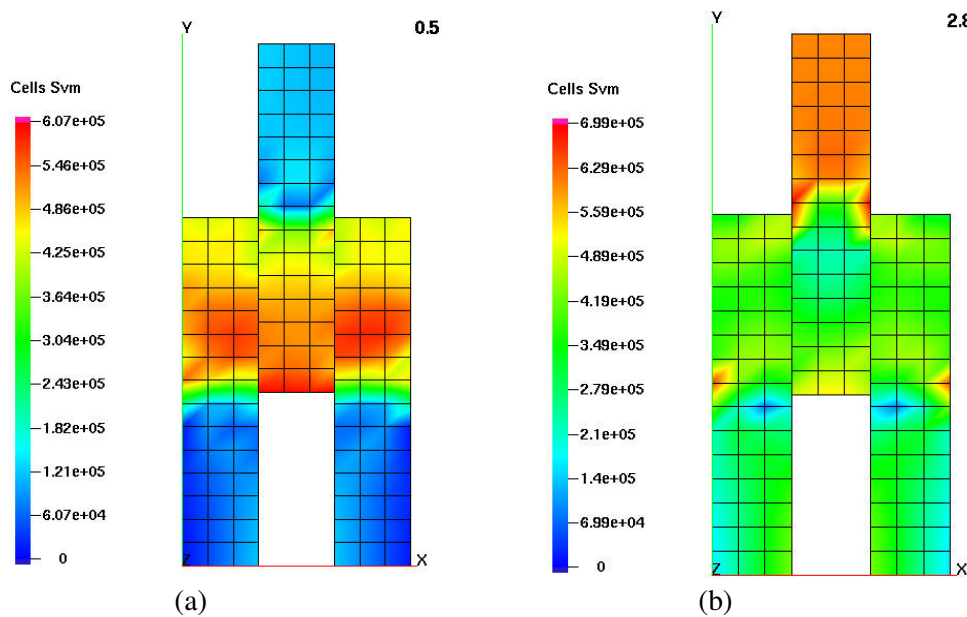
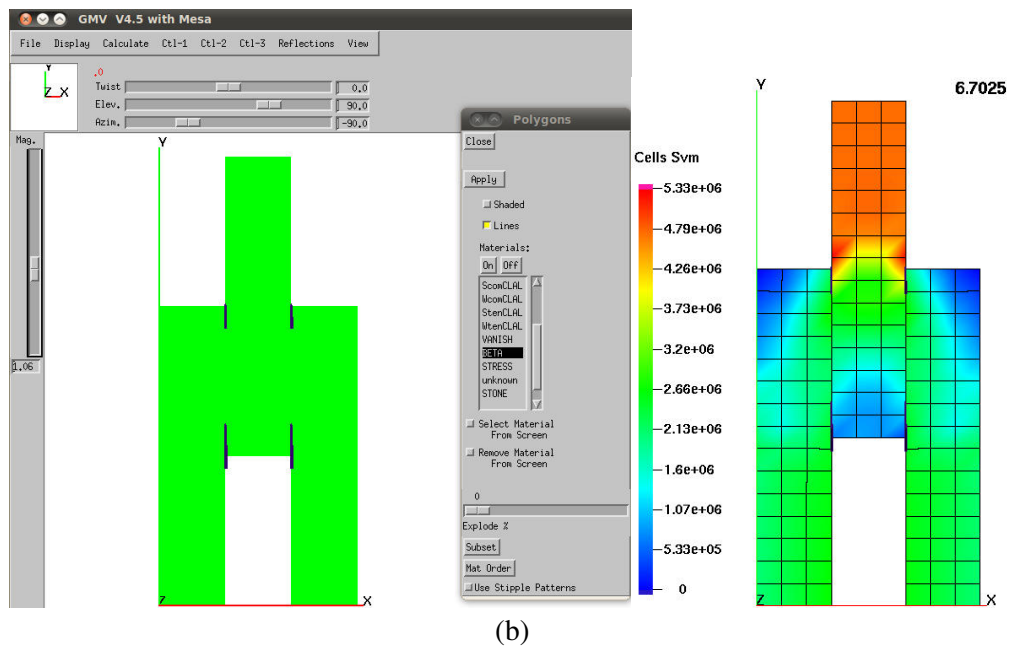
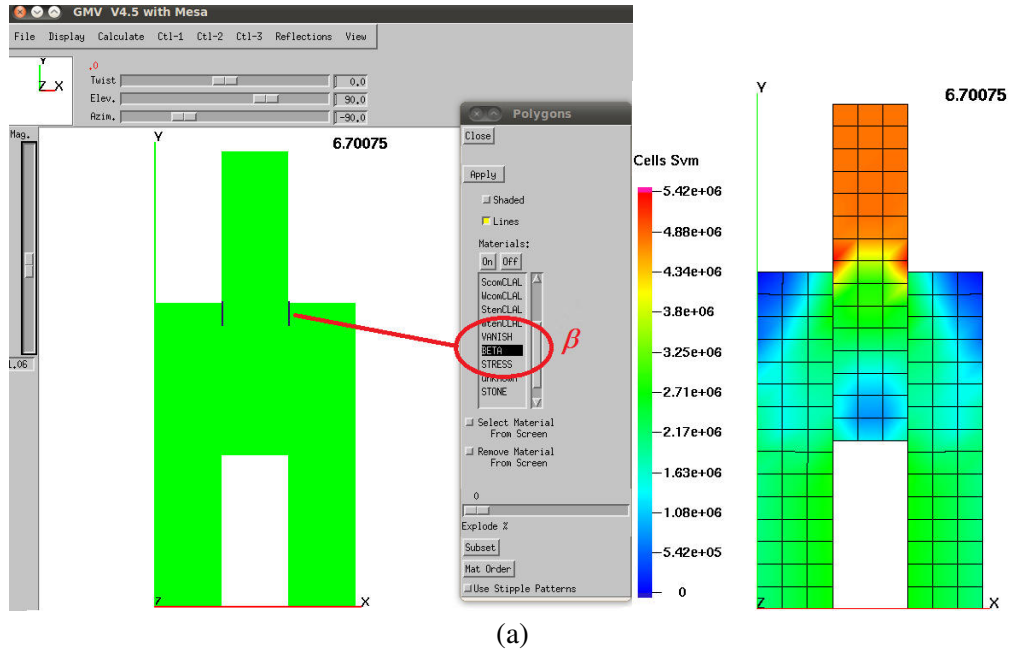
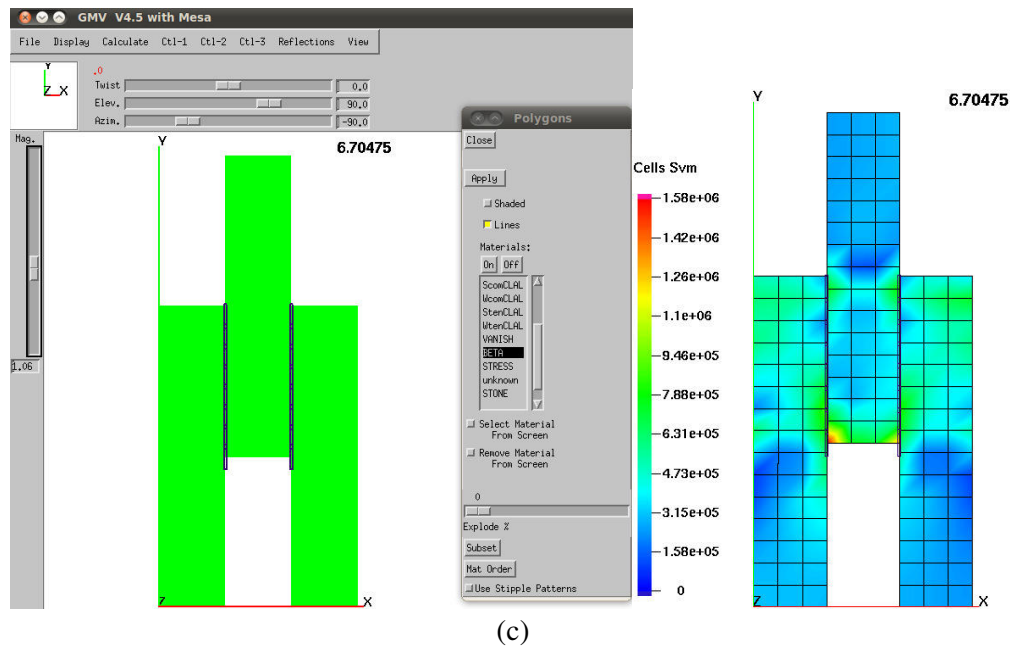


Figura 5.16 Distribuzione di tensioni nelle triplette:
(a) alla fine del confinamento laterale; (b) durante il caricamento verticale di taglio





(c)
Figura 5.17 Stato di danneggiamento:
 (a) inizio; (b) istante generico; (c) rottura completa

La mesh a maglie rettangolari, di dimensioni più grandi rispetto alle precedenti, è stata creata tramite script e sfruttando strumenti interni al programma (*Python based*). La scelta del tipo di mesh, effettuata allo scopo di ridurre lo sforzo computazionale, è stata presa solo dopo aver accertato che sia la forma che le dimensioni degli elementi non andavano a modificare in maniera rilevante il risultato finale della simulazione. Si precisa, inoltre, che le ampiezze dei passi temporali sono state ridotte ulteriormente nell'intervallo che interessa la condizione del danneggiamento con lo scopo di osservare più attentamente il progredire del fenomeno. L'impiego di una micro-modellazione semplificata non comporta evidentemente l'eventualità che si verificano modalità di crisi più complesse rispetto a quella per scorrimento dei giunti.

5.4.1.3. Validazione dei modelli su un elemento murario semplice

I modelli volumetrici e di interfaccia sono stati poi convalidati simulando una serie di prove di compressione diagonale su una struttura più complessa

(composta da 20 mattoni in 8 ricorsi) delle stesse dimensioni del pannello testato sperimentalmente. Per prima cosa, come per la tripletta, si è proceduto a eseguire un'analisi considerando la struttura come un continuo, generando automaticamente la mesh di griglie a elementi finiti col software Gmsh. La simulazione fornisce buoni risultati in termini di confronto tra la rigidità apparente sperimentale e quella numerica (Fig. 5.19).

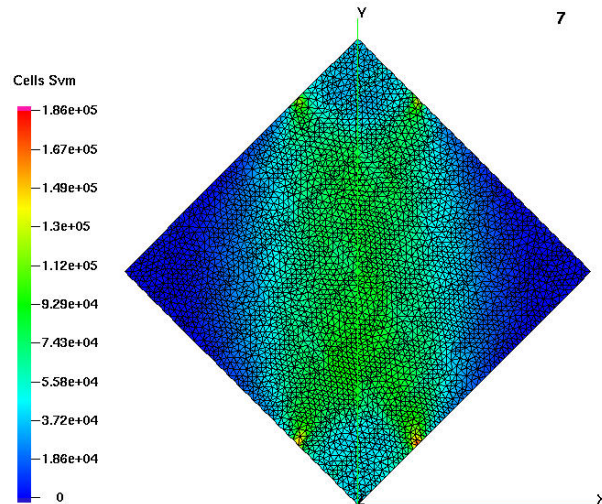


Figura 5.18 Prova di compressione diagonale sul modello continuo

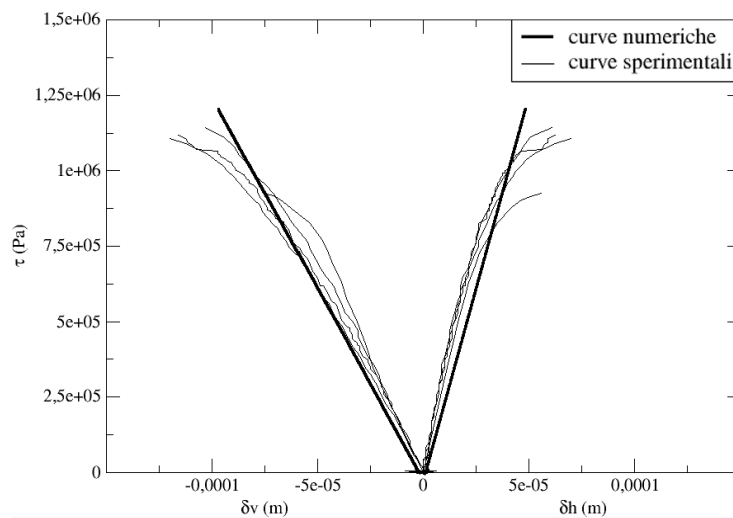


Figura 5.19 Confronto tra la risposta del modello continuo deformabile e le curve sperimentali ottenute dalle prove di compressione diagonale

Il pannello è stato successivamente modellato riducendo i giunti a interfaccia e considerando la legge di danneggiamento di tipo RCC calibrata sulle prove eseguite sulle triplette. La simulazione ha condotto a dei buoni risultati riguardanti il comportamento lineare della struttura ma ha sovrastimato significativamente la rottura (coppia forza-spostamento), nonostante si sia osservato un quadro fessurativo simile a quello esaminato sperimentalmente.

L'energia di decoesione, che guida la rottura, è stata quindi ricalibrata in modo da descrivere adeguatamente la crisi del pannello (Fig.5.20). Tale ricalibrazione sembra dovuta alla scelta di voler modellare la presenza della malta direttamente nel modello d'interfaccia. In questo caso non si è in grado di riprodurre alcun effetto strutturale dovuto allo spessore del giunto.

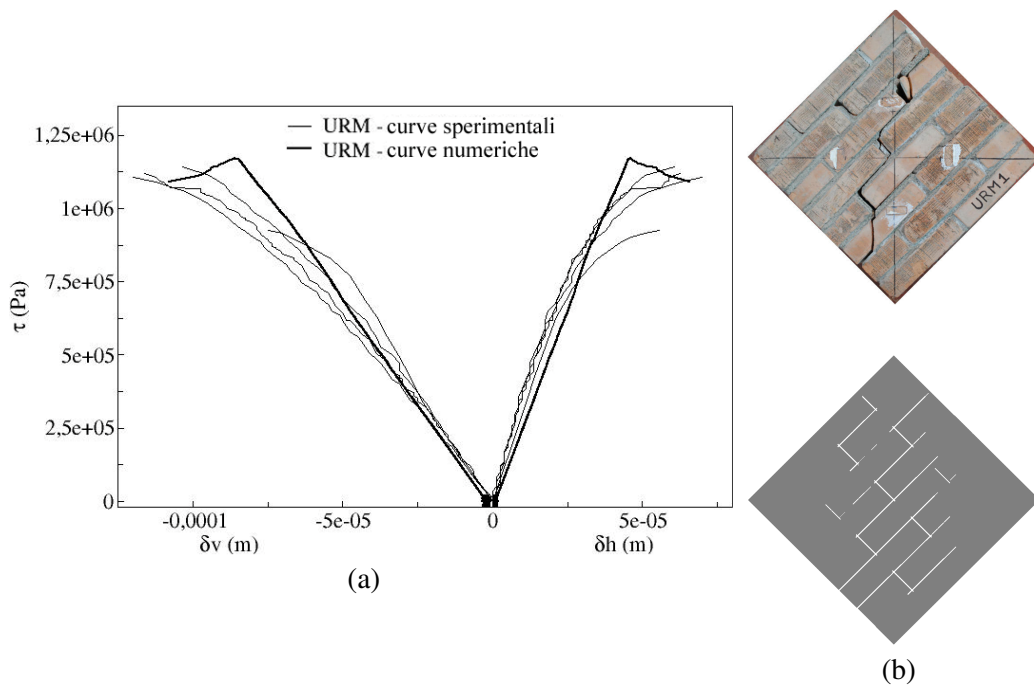


Figura 5.20

*Confronto tra le risposte sperimentali e quelle del modello di interfaccia ricalibrato:
(a) curve τ - δ_{v-h} ; (b) superfici di rottura*

5.4.2. Modello proposto per la modellazione del rinforzo

Il modello proposto di seguito vuole rappresentare unicamente, in un primo approccio, la modalità di rottura a trazione delle fibre. Queste sono state modellate per mezzo di cavi collegati agli elementi della muratura mediante un legame perfetto. La modalità di rottura associata al fenomeno della delaminazione, e cioè la perdita di aderenza tra rinforzo e supporto o tra fibra e matrice, non è stata quindi inclusa nel modello. I cavi sono stati caratterizzati da una rigidità che traduce quella del complesso fibra/matrice (caratterizzata dal modulo di elasticità E_c) e da una tensione di rottura a trazione. Il cavo agisce come una molla, trasmettendo ai corpi ai quali è collegata una forza di ripristino proporzionale al suo allungamento. Al di là di una forza limite di trazione (F_{max}), definita considerando l'allungamento a rottura della molla, questa è irreversibilmente danneggiata e non riprende più alcuno sforzo (Fig. 5.21).

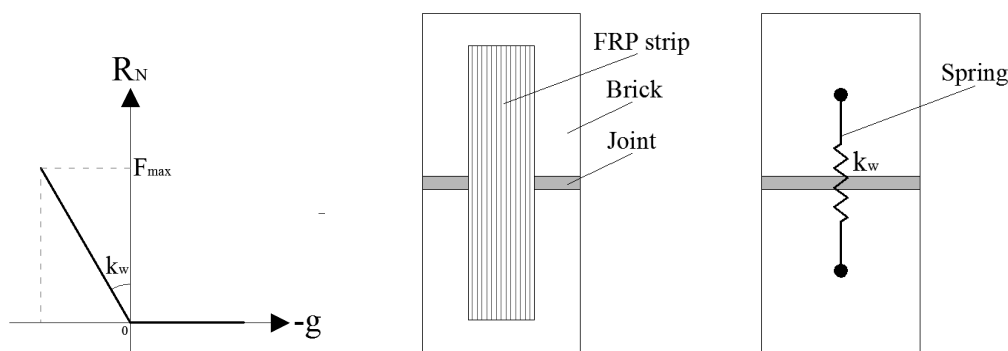


Figura 5.21 Modellazione del rinforzo

Per meglio rappresentare la fenomenologia del rinforzo, le strisce non sono state modellate tramite un unico cavo ma da una serie di cavi che assicurano la continuità del composito, collegando localmente tutti gli elementi in muratura su cui il tessuto è applicato. Si possono considerare diverse configurazioni per descrivere questa rete di molle: disposizione monoassiale di una serie di molle, disposizione biassiale di due serie in posizione simmetrica rispetto alla lunghezza della striscia, etc. (Fig. 5.22).

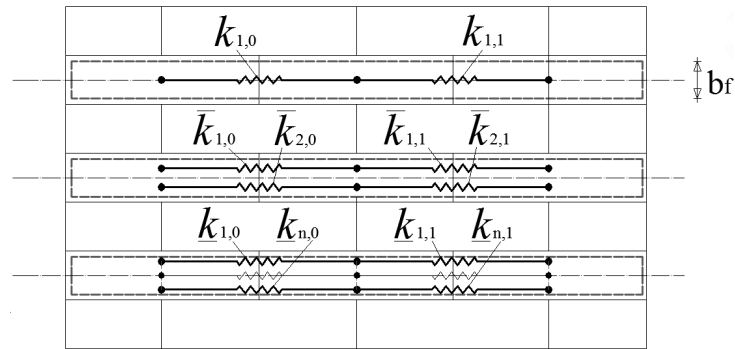


Figura 5.22 *Disposizione delle reti di molle*

I modelli adottati per la muratura corrispondono a dei modelli classici, identici a quelli calibrati discussi in precedenza, ai quali è stato aggiunto il composito, ovvero differenti reti di molle, secondo le disposizioni in diagonale e a reticolo a maglia quadrate.

5.4.2.1. Configurazione in diagonale

Per motivi di regolarità e di simmetria, il rinforzo in diagonale è stato modellato secondo una disposizione monoassiale delle molle e in modo tale che queste avessero tutte la stessa lunghezza e che fossero applicate al muretto simmetricamente (Fig. 5.23).

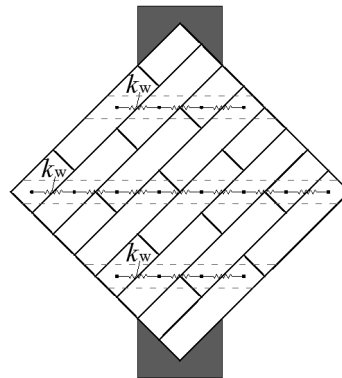


Figura 5.23 *Disposizione in diagonale*

La simulazione numerica ha permesso di ritrovare il comportamento della struttura rinforzata (Fig.5.24a). Il composito ha lavorato in trazione pura e in modo simmetrico. La rigidezza apparente della struttura è stata modificata per la presenza del rinforzo in modo del tutto paragonabile a quanto osservato sperimentalmente e la struttura è stata caricata oltre il carico ammissibile senza rinforzo. La crisi è avvenuta per delle coppie forza-spostamento e secondo superfici di rottura confrontabili con quelle sperimentali (Fig 5.24b), interessando, in particolare, la rottura di un cavo centrale della serie intermedia (Fig. 5.25).

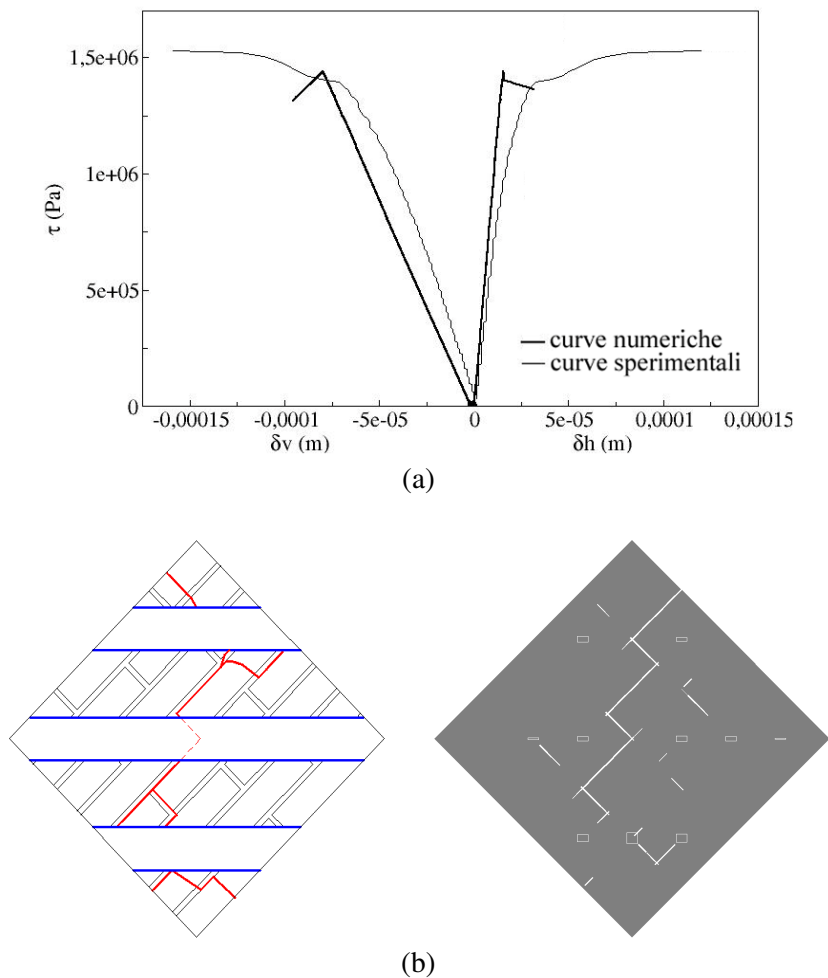


Figura 5.24 Confronto numerico-sperimentale:
 (a) Curve τ - δ_{v-h} ; (b) superfici di rottura

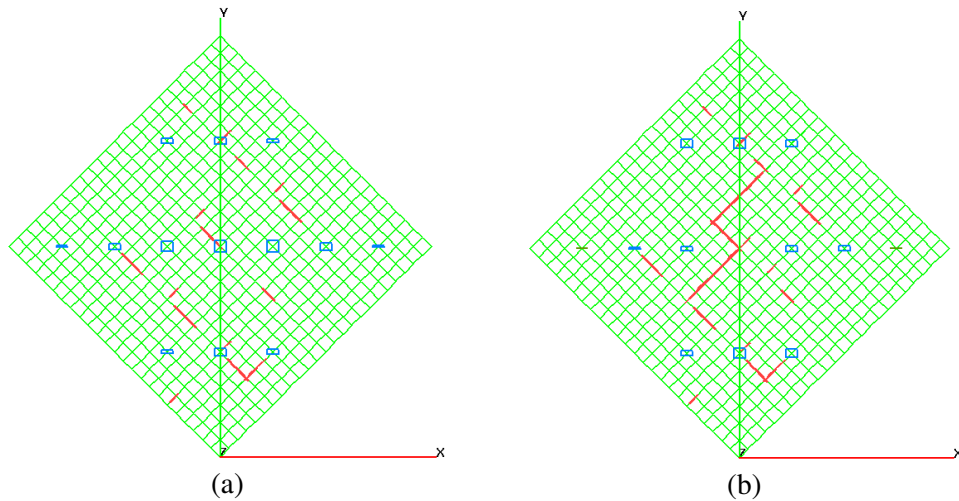


Figura 5.25 Quadro fessurativo:
 (a) prima e (b) dopo la rottura del cavo centrale

5.4.2.2. Configurazione a griglia ortogonale

Per quanto concerne la configurazione reticolare del rinforzo, è stato scelto di modellare il composito secondo una disposizione biassiale delle serie di cavi al fine di sollecitare tutti gli elementi su cui sono fissate le strisce di rinforzo (Fig. 5.26).

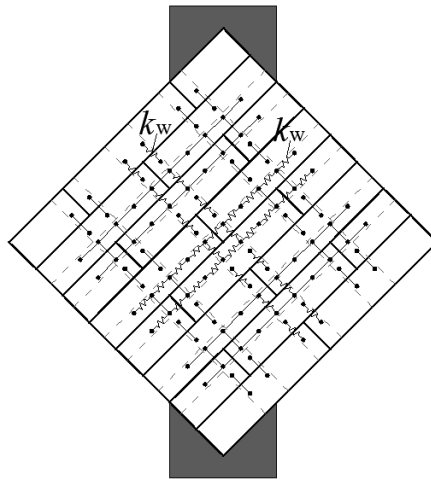


Figura 5.26 Configurazione a reticolo

La disposizione del composito lascia intendere che esso non lavora in trazione pura, e ciò viene convalidato dalla simulazione numerica (Fig. 5.27). Le curve di risposta del modello rinforzato vanno quasi a coincidere con quelle numeriche e sperimentali dei pannelli privi di rinforzo. Il modello proposto raggiunge dunque i suoi limiti per disposizioni del composito che portano a sollecitazioni e modalità di rottura più complesse (nel caso in esame, sollecitazione e rottura a flessione). D'altra parte le prove sperimentali sui pannelli rinforzati secondo tale configurazione avevano mostrato un comportamento flessionale abbastanza marcato delle strisce lungo il piano di carico, che aveva portato successivamente a una rottura dei provini per scorrimento lungo un giunto orizzontale. Per far sì che l'evoluzione del modello tenga in conto della rigidità flessionale del sistema composito occorre che il tipo di rinforzo FRCM sia caratterizzato anche secondo questo tipo di sollecitazione, eseguendo ad esempio prove di flessione su tre punti su provini costituiti da alcuni strati alternati di tessuto e malta cementizia.

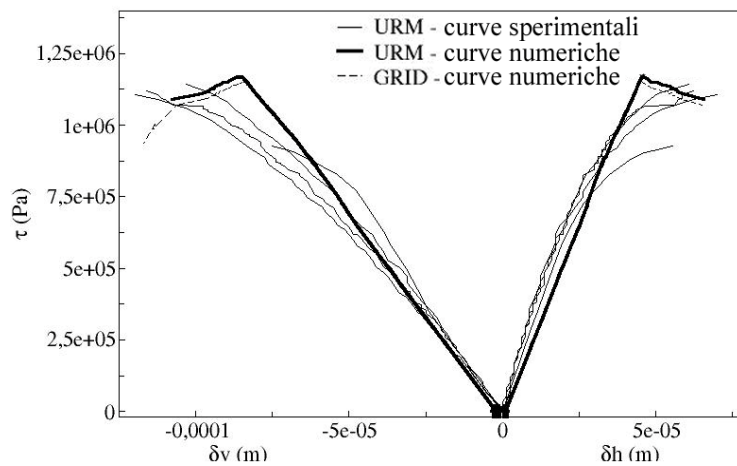


Figura 5.27 Confronto tra le curve numeriche e sperimentali di risposta dei muri URM e quelle numeriche del muro rinforzato secondo la configurazione a griglia

5.5. Bibliografia

- [1] A. Rafiee, M. Vinches, C. Bohatier, *Application of the NSCD method to analyse the dynamic behaviour of stone arched structures*, International Journal of Solids and Structures, 45, 6269-6283 (2008).
- [2] M. Jean, J.J. Moreau, *Unilaterality and dry friction in the dynamic of rigid body collections*, Composites Science and Technology, ed. A. Curnier, 31-48 (1992).
- [3] M. Jean, *Frictional contact in collections of rigid and deformable bodies: numerical simulation of geomaterials*, Mechanics of geomaterials Interfaces, A.P.S. Saladurai and Mr. JJ. Bolt, Elsevier Science, Amsterdam, 463-486 (1995).
- [4] M. Jean, *The non-smooth contact dynamic method*, Computer Method in Applied mechanics and Engineering, 177, 235-257 (1999).
- [5] J.J. Moreau, *Unilateral contact and dry friction in finited freedom dynamics*, CISM Races and Readings, 302 Springer-Verlag, 1-82 (1998).
- [6] F. Dubois, M. Jean, *Une plateforme de développement dédiée à la modélisation des problèmes d'interaction*, In M. Pottier-Ferry, M. Bonnet et A. Bignonnet éditeurs, 6ème Colloque National en Calcul des Structures, Giens, 1, 111-118 (2003).
- [7] F. Dubois, M. Jean, M. Renouf, R. Mozul, A. Martin, M. Bagnéris, LMGC90, 11ème Colloque National en Calcul des Structures, Giens (2011).
- [8] A. Martin, M. Bagnéris, F. Dubois, R. Mozul, *Conception d'un outil adapté à la mise en donne des systèmes discrets*, 10ème Colloque National en Calcul des Structures, Giens (2011).

- [9] F. Radjaï, F. Dubois, *Modélisation numérique discrète des matériaux granulaires*, Hermès Science, Lavoisier (2010).
- [10] F. Radjaï (edt) and F. Dubois (edt), *Discrete-element Modeling of Granular Materials*, pubblicato da John Wiley & Sons Ltd., (2011).
- [11] P.A. Cundall, O.D.L. Strack, *A discrete numerical model for granular assemblies*, *Géotechnique*, 29, 47-65 (1979).
- [12] L. Cangémi, M. Cocu, M. Raous, *Adhesion and frictional model for the fibre/matrix interface of a composite*, Third biennial Joint Conference on engineering system design and analysis, Montpellier, ASME, 157-163 (1996).
- [13] M. Raous, L. Cangémi, M. Cocu, *Un modèle couplant adhérence et frottement pour le contact unilatéral entre deux solides déformables*, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 329, n° Série II b, 503-509 (1997).
- [14] M. Raous, L. Cangémi, M. Cocu, *Consistent model coupling adhesion, friction and unilateral contact*, *Computer Meth. Appl. Mech. And Engrg*, 177, n° 3-4, 383-399 (1999).
- [15] P.B. Lourenço, *Computational strategies for masonry structures*, PhD Thesis, Technische Universiteit Delft (1996).
- [16] A. Venneri, P. Taforel, F. Dubois, *Modelli di pannelli murari rinforzati con fibre naturali: analisi numerica e sperimentale*, 40° Convegno Nazionale AIAS, Palermo, Settembre (2011).

Conclusioni

Lo studio di un innovativo sistema di rinforzo da impiegare nel campo del recupero strutturale di elementi in muratura, spinto dal recente interesse da parte della comunità scientifica verso problematiche di sostenibilità e compatibilità ambientali, ha portato alla definizione di un composito in fibre naturali a matrice cementizia in sostituzione dei più tradizionali materiali FRP. Agli indiscutibili vantaggi derivanti dall'uso di questi ultimi, quali le elevate prestazioni meccaniche, la notevole leggerezza, la rapidità di posa in opera, nonché la sostanziale reversibilità degli interventi, si affiancano, infatti, gravi inconvenienti legati all'elevato livello di inquinamento ambientale prodotto durante la loro lavorazione e nella fase di smaltimento alla fine del loro ciclo di vita. In tale contesto, le fibre naturali stanno emergendo, oltre che per essere realistiche alternative ecologicamente superiori alle fibre sintetiche, anche per il loro basso costo e per le loro caratteristiche meccaniche del tutto paragonabili a quelle delle fibre di vetro di medie prestazioni.

Nel presente lavoro di ricerca, il sistema ottenuto dall'unione di fibre di lino e canapa, nella forma di tessuti e nastri uni e bi-direzionali, con una malta cementizia a base di leganti idraulici specifica per interventi di rinforzo esterno con compositi, è stato indicato con l'acronimo NFRCM (*Natural Fiber Reinforced Cementitious Matrix*).

Esso è stato pensato come una possibile soluzione per migliorare la resistenza a taglio nel piano di pannelli murari. La verifica attraverso prove di compressione diagonale dell'efficacia del tipo di composito applicato su campioni in muratura è stata preceduta da una serie di prove di caratterizzazione meccanica dei tessuti, che hanno consentito di determinarne sperimentalmente la resistenza. Le strisce di prova hanno mostrato un andamento simile sotto il carico monotono di trazione consistente in una progressiva lacerazione dei fili costituenti le strisce medesime. I risultati delle prove di aderenza (*pull-out tests*) su elementi in laterizio fibrorinforzati hanno evidenziato una modalità di collasso differente rispetto a provini rinforzati con fibre di vetro annegate nella stessa matrice delle fibre naturali. Nel caso del lino e della canapa, infatti, lo sfilamento delle fibre che si protrae dagli strati più esterni fino al nucleo del filato (*debonding* o *pull-out failure*) si

combina a un secondo meccanismo di crisi che coinvolge i filamenti più esterni, i quali, prima di subire l'estrazione dalla matrice cementizia, giungono a rottura per il superamento della resistenza a trazione ultima (*tensile failure*). Nel caso delle fibre di vetro, invece, il collasso del provino ha interessato esclusivamente la prima modalità sopra descritta senza interessare la rottura a trazione delle fibre, comportando di conseguenza una maggiore fragilità nella modalità di crisi osservata. In ogni caso, per i rinforzi con FRCM, l'interfaccia tra fibra e matrice si è mostrata l'elemento debole, contrariamente a quanto accade generalmente per i sistemi FRP in cui si assiste a una delaminazione tra rinforzo e superficie dell'elemento di supporto. Si è riscontrato successivamente nelle prove di taglio che la presenza di più strati di tessuto e una maggiore lunghezza di ancoraggio migliorano le prestazioni di aderenza.

Per quanto concerne le prove di compressione diagonale, i risultati della sperimentazione condotta su pannelli di dimensioni 51 x 51 x 12 cm in laterizio pieno e giunti di malta, hanno dimostrato che la presenza del rinforzo comporta un evidente aumento delle caratteristiche di resistenza e rigidità a taglio rispetto a quelle esibite dai provini non rinforzati (*URMi*). I valori maggiori di resistenza sono stati forniti dal tessuto bidirezionale di lino per entrambe le configurazioni di applicazione sui pannelli (in diagonale e a griglia ortogonale). L'incremento medio rispetto ai provini testati in assenza di rinforzo, di circa il 50%, è maggiore di quello apportato dalle fibre unidirezionali di vetro che è risultato di poco superiore al 30%. L'aumento relativo all'impiego delle fibre di canapa, invece, è risultato di circa il 20% rispetto ai provini senza rinforzo. Riguardo all'aumento di rigidità globale, le fibre di vetro hanno prodotto un incremento più alto, superiore al 55%, mentre le fibre naturali hanno provocato incrementi confrontabili (23% per la canapa e 30% per il lino). Questo risultato è in accordo con i moduli elastici dei diversi materiali. Le deformazioni sono aumentate in prossimità della rottura per tutti i casi rinforzati, rendendo il comportamento complessivo sensibilmente meno fragile. La configurazione con strisce di rinforzo lungo la diagonale non compressa risulta comunque più efficace in termini di duttilità rispetto alla distribuzione a reticolo a maglie quadrate. Quest'ultima, per contro, offre migliori proprietà di aderenza e conduce a una rottura meno improvvisa. Inoltre, la disposizione a reticolo ha mostrato, per il tipo di

configurazione del pannello sottoposto a carico diagonale, un comportamento marcato a flessione lungo il piano del carico da parte delle fibre, che, anche a rottura completa, sono rimaste adese al substrato contenendo l'esplosione dei muretti.

Le sperimentazioni sin qui eseguite hanno mostrato in modo evidente il buon funzionamento dei compositi FRCM marcando, peraltro, una maggiore compatibilità con la matrice da parte delle fibre naturali. Si aprono dunque nuove e interessanti prospettive nel settore degli interventi di consolidamento delle costruzioni murarie esistenti. In questo ambito, vantaggi economici a parte, appare di particolare rilievo la possibilità degli NFRCM di superare molti dei problemi degli FRP tradizionali, mantenendone comunque i vantaggi più significativi.

L'attività sperimentale è stata accompagnata da un'analisi numerica eseguita con il codice di calcolo LMGC90 agli elementi discreti, con lo scopo di fornire dei modelli capaci di rappresentare il comportamento esibito dai pannelli durante le prove. Il software risulta particolarmente adatto a modellare sistemi discontinui, quali i materiali granulari e le murature, ed è basato sull'algoritmo NSCD (*Non Smooth Contact Dynamic*) che presenta uno schema di integrazione implicito per risolvere problemi di dinamica non regolare. Il metodo è capace di affrontare i fenomeni degli urti tra corpi durante la simulazione e presenta il vantaggio di non ricorrere a smorzamenti artificiali per assicurare la propria stabilità. L'indagine numerica ha interessato in un primo momento la calibrazione dei modelli volumetrici attraverso la simulazione della prova di taglio su tripletta. La struttura, costituita da tre mattoni e due giunti di malta modellati in 2D con il metodo degli elementi finiti, è stata descritta attraverso un'unica mesh per la quale il comportamento dei materiali è rappresentato localmente da modelli elastici lineari senza danneggiamento. La risposta della struttura, messa a confronto con le prove sperimentali, ha convalidato la descrizione del modello volumetrico proposto. Successivamente il modello è stato modificato utilizzando una micro-modellazione semplificata (mattoni espansi e giunti ridotti a interfaccia), ed è stato introdotto un modello coesivo di danneggiamento che ha permesso di ritrovare la rigidità apparente della tripletta e di descriverne adeguatamente la rottura. La corrispondenza tra i risultati numerici e sperimentali, anche in termini di quadri fessurativi, è stata

riscontrata nuovamente nel caso della simulazione della prova di compressione diagonale, eccetto il fatto che si è resa necessaria una ricalibrazione dell'energia di "decoesione" nella legge utilizzata per ritrovare il punto di rottura sperimentale (coppia forza-spostamento). Tale ricalibrazione sembra dovuta alla scelta di voler modellare la presenza della malta direttamente nel modello di interfaccia. In questo caso non si è in grado di riprodurre alcun effetto strutturale dovuto allo spessore del giunto. Per quanto riguarda il rinforzo, esso è stato modellato, in un primo approccio, attraverso cavi elasto-fragili che tengono conto della modalità a rottura a trazione delle fibre nell'ipotesi di perfetta aderenza al supporto murario. Per rappresentare meglio la fenomenologia del rinforzo, le strisce sono state modellate attraverso una serie di cavi che collegano localmente tutti gli elementi in muratura su cui le strisce sono applicate. La simulazione numerica condotta per il rinforzo disposto secondo la configurazione in diagonale ha permesso di ritrovare il comportamento sperimentale del pannello rinforzato. Per quanto riguarda invece il rinforzo a reticolo, dal momento che esso non si trova in condizioni di trazione pura, la simulazione non ha fornito risultati confrontabili con quelli sperimentali. Il modello proposto per la modellazione dei rinforzi raggiunge dunque i suoi limiti per disposizioni del composito che portano a stati di sollecitazione e modalità di rottura più complessi (nel caso specifico, sollecitazione e crisi delle strisce per flessione). Pertanto, l'indagine numerica necessita di ulteriori affinamenti per poter simulare tipologie di crisi differenti dalla sola rottura per trazione del composito, oltre all'evoluzione dei modelli rappresentanti il comportamento del materiale muratura (fessurazione dei blocchi e biforcazione nei giunti di malta).

Ringraziamenti

A conclusione di questo percorso di studio desidero ringraziare, innanzitutto, il tutor di questa tesi, il professor Renato Sante Olivito, per i preziosi insegnamenti che mi ha dato durante i tre anni di dottorato, per avermi introdotto nel duro ma meraviglioso mondo della ricerca e per la disponibilità, il sostegno e la pazienza che ha saputo dedicarmi anche quando le mie piccole ansie caratteriali mi portavano a credere che non avrei ultimato il lavoro nei tempi previsti.

Un doveroso ringraziamento va al personale tecnico del “Laboratorio Ufficiale Prove Materiali e Strutture” dell’Università della Calabria, in particolare a Tonino, per avermi aiutato nella realizzazione delle prove durante l’attività sperimentale, e ai miei colleghi del Dipartimento di Strutture per avermi sempre incoraggiato ad affrontare con serenità e ottimismo le inevitabili difficoltà che si incontrano durante un lavoro di ricerca.

Desidero ringraziare sentitamente il professor Frédéric Dubois per l’amichevole collaborazione iniziata lo scorso anno presso il “Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil” dell’Università di Montpellier, per aver contribuito significativamente ad alcuni dei risultati discussi in questa tesi, per avermi accolta con simpatia e gentilezza, e per la sua magnanimità verso il mio francese. Oltre a lui, sono debitrice con la maggior parte del suo staff: i ragazzi del “level 0” che mi hanno dimostrato cordialità e disponibilità durante l’intero periodo di stage. Un ringraziamento di cuore va al mio amico Paul, che ha rappresentato uno stimolo necessario per portare a termine i lavori correlati alla parte numerica della tesi e verso il quale esprimo profonda gratitudine. Grazie anche a Riccardo per aver allietato con la sua musica e la sua simpatia il mio soggiorno all’estero, per avermi regalato sempre un sorriso e per la sua capacità di sdrammatizzare i momenti più difficili.

Un ringraziamento enorme va alla mia famiglia che, con il suo incrollabile sostegno morale, mi ha permesso di raggiungere questo traguardo. A mia madre per aver sopportato in silenzio la mia assenza, per la sua discrezione e il suo amore. Ai miei gemelli Pierluigi e Alessandra e a mia cognata Tatiana che riescono a trasmettermi sempre il loro sostegno e il loro affetto da ogni parte del mondo! Al mio fratellone Carmine che con umiltà e generosità si è prestato a risolvere tutti i problemi pratici che mi si sono presentati in questi

anni, forse inconsapevole del fatto che mi è stato di grande aiuto e perché non se l'è presa se - non volutamente - l'ho cercato solo nei momenti del bisogno. E a mio padre, certa che sarebbe stato orgoglioso di me oggi, per avermi insegnato tanto, soprattutto ad affrontare la vita con positività e allegria. A lui devo il mio interesse verso ciò che è nuovo, la passione per la cultura e la ricerca, parte del suo carisma e della sua inesauribile gioia di vivere.

Ringrazio infine Gianpaolo per il coraggio e la forza che mi ha spinto a trovare nei momenti duri, per aver contribuito materialmente nelle vesti di operaio alla realizzazione dei provini, per esserci sempre stato con estrema pazienza comprendendo il grande valore che per me ha avuto questa esperienza, per aver sopportato i miei sbalzi di umore e le mie paranoie quando non avevo altra valvola di sfogo che lui, per tutto ciò che mi sta regalando giorno per giorno, per la fiducia, la comprensione e l'amore che sa trasmettermi.

