

**POLITECNICO DI TORINO E ESCOLA
POLITÉCNICA DA UFRJ**

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria dei sistemi edilizi

**Sviluppo e caratterizzazione di sistemi di rinforzo in
fibra naturale per il miglioramento e l'adeguamento
sismico delle strutture in muratura**



COPPE
UFRJ

Relatori:

*Prof. Alessandro Pasquale Fantilli
Prof. Romildo Toledo Filho*

Candidato:

Bonfanti Ilaria

Anno Accademico 2018-2019

*La misura dell'intelligenza è data dalla
capacità di cambiare quando è necessario.*

Albert Einstein

INDICE

PRESENTAZIONE DELL'ARGOMENTO	3
1.1 Introduzione	3
1.2 Obiettivo.....	7
1.3 Struttura della dissertazione	9
MECCANISMI DI DANNO DELLE MURATURE	10
2.1 Considerazioni introduttive	10
2.2 I meccanismi di collasso degli edifici in muratura.....	14
2.2.1 Meccanismi di primo modo	15
2.2.1.1 Meccanismi di ribaltamento semplice di parete	15
2.2.1.2 Meccanismi di flessione verticale.....	16
2.2.1.3 Meccanismi di flessione orizzontale.....	18
2.2.1.4 Meccanismi di ribaltamento composto	19
2.2.1.5 Meccanismi di martellamento dei solai e delle coperture.....	20
2.2.2 Meccanismi di secondo modo.....	23
2.2.3 Conclusioni	25
REVISIONE BIBLIOGRAFICA	26
3.1 Fibre naturali	26
3.1.1 Fibra di iuta.....	29
3.1.2 Fibra di Lino	30
3.1.3 Comportamento meccanico delle fibre naturali.....	33
3.2 Compositi rinforzati con fibre.....	36

PROGRAMMA SPERIMENTALE: MATERIALI E

METODOLOGIA41

4.1	Matrice cementizia	41
4.1.1	Progettazione.....	41
4.1.1.1	Sabbia	44
4.1.1.2	Additivo chimico	44
4.1.1.3	Procedimento di realizzazione della malta	45
4.1.1.4	Quantità del materiale.....	46
4.1.2	Test di compressione.....	48
4.1.2.1	Test di compressione 14 e 28 giorni	48
4.1.2.2	Risultato del test di compressione	52
4.1.3	Test di flessione	57
4.1.3.1	Risultati del test di flessione	58
4.1.4	Caratterizzazione chimica della matrice	61
4.1.4.1	TG/DTG.....	61
4.2	Fibra di Iuta.....	64
4.2.1	Descrizione della fibra	64
4.2.1.1	Lavaggio e trattamento in soluzione alcalina della fibra di iuta.....	64
4.2.2	Test di trazione diretta della singola corda di iuta	69
4.2.2.1	Setup della prova	69
4.2.2.2	SEM–Microscopio elettronico a scansione per la determinazione della sezione trasversale delle corde di iuta.....	73
4.2.2.3	Risultato e diagramma sforzo-deformazione delle corde di iuta.....	78
4.2.3	Caratteristiche meccaniche del Tessuto di Iuta.....	82
4.2.3.1	Test di Trazione diretta	82

4.2.4	Interfaccia fibra-matrice.....	92
4.2.4.1	Test Pull Out.....	92
4.2.4.2	Risultati.....	97
4.3	Caratterizzazione del composito Fibra-Matrice	98
4.3.1	RISULTATI.....	103
4.3.1.1	Composito rinforzato con tessuto di iuta non trattata..	103
4.3.1.2	Composito rinforzato con tessuto di iuta trattato.....	105
4.3.1.3	Confronto placca di composito rinforzato con iuta	108
4.3.1.4	Composito rinforzato con tessuto di lino non trattato .	110
4.3.1.5	Composito rinforzato con tessuto di lino trattato	113
4.3.1.6	Confronto placca di composito rinforzato con Lino....	116
4.3.1.7	Risultato finale.....	118
4.4	Compressione diagonale	119
4.4.2	Pannello murario privo di rinforzo	124
4.4.3	Pannello murario fibro-rinforzato	127
4.4.3.1	Pannello fibro-rinforzato in fibra di iuta.....	128
4.4.3.2	Pannello fibro-rinforzato in fibra di lino	136
	ANALISI DEI RISULTATI	144
	CONCLUSIONE	148
	BIBLIOGRAFIA	150

Abstract

La recente situazione italiana caratterizzata da eventi sismici, causa di numerosi crolli di edifici, ha determinato la perdita di gran parte del patrimonio monumentale di numerose cittadine del centro Italia, nonché la vita di moltissime persone. Le costruzioni in muratura realizzate negli ultimi decenni, si trovano in zone soggette a terremoti, esse sono caratterizzate da livelli importanti di vulnerabilità sismica. Il rinforzamento e l'adeguamento delle strutture diventano una priorità assoluta nell'attuale sfida sociale che risulta essere il denominatore comune per numerose iniziative di cambiamento, destinate al miglioramento della qualità della vita umana in termini di ecosostenibilità, tutela ambientale e difesa dalle calamità.

Sono numerose oggi le tecniche atte a migliorare la sicurezza sismica delle strutture in muratura, molte delle quali, però, fanno affidamento sull'utilizzo di materiali difficili da reperire, di complesse lavorazioni e per i quali si ha la necessità di spendere numerose risorse.

I sistemi compositi sono una tipologia di intervento ampiamente accreditato, rappresentano una delle opzioni più adatte per il miglioramento e l'adeguamento degli elementi strutturali. Generazioni di materiali compositi sono state consolidate negli anni, tra i quali ad esempio, quelli costituiti da matrice polimerica. Quest'ultimi nel tempo però, hanno mostrato problemi di bassa resistenza alle alte temperature e scarsa compatibilità con i supporti.

Un nuovo tipo di materiale, che adopera una matrice inorganica, sta guadagnando un importante interesse da parte degli studiosi, esso è spesso indicato come FRCM (Fabric-Reinforced Cementitious Matrix) e TRM (Textile Reinforced Mortar). Si tratta di sistemi compositi a base di malta rinforzati da reti in fibra; quest'ultima ha la capacità di incrementare la tenacità della struttura.

Le caratteristiche di basso costo, bassa densità, riciclabilità e biodegradabilità delle fibre vegetali, le rendono un'alternativa sostenibile alle fibre sintetiche, finora utilizzate.

Questa tesi raccoglie i risultati relativi alla caratterizzazione e a una serie di prove effettuate sui materiali costituenti un composito in matrice di malta e rinforzo in fibra

vegetale, con lo scopo di indagare sul funzionamento di questo nuovo composito, affinché possa migliorare la capacità di taglio in piano delle pareti in muratura.

Il sistema in esame è costituito da una malta a base cementizia progettata ex novo con l'aggiunta di tessuto in fibra vegetale di iuta e di lino come rinforzo interno. Il composito è caratterizzato pertanto da notevoli proprietà di sostenibilità e simultaneamente da un comportamento meccanico che, come verrà dimostrato dall'elaborato, migliora le caratteristiche di duttilità e tenacità del sistema murario. L'attività sperimentale mostra il potenziale presente nell'uso di sistemi compositi a base di fibre vegetali come rinforzo per le murature.

Le prove rivelano come il comportamento duttile e le tensioni residue siano aumentati con l'utilizzo del composito, rispetto al caso in cui non si ha la presenza di rinforzo e quindi la presenza di un comportamento prettamente fragile. Il confronto tra le fibre, inoltre, ha mostrato come il lino ha una resistenza e una tenacità nettamente maggiori rispetto a quella della iuta.

Questo studio di ricerca, infine, vuole aprire la strada a ulteriori indagini volte a valutare le prestazioni del composito in fibra vegetale anche in altre configurazioni di carico o altre tipologie di prova, che possano suggerire maggiori informazioni relative al miglioramento dell'interazione tra fibra e matrice e migliorare la risposta del materiale composito stesso.

CAPITOLO 1

Presentazione dell'argomento

1.1 Introduzione

La recente situazione italiana caratterizzata da eventi sismici, causa di numerosi crolli di edifici, ha determinato la perdita di gran parte del patrimonio monumentale di numerose cittadine del centro Italia, nonché la vita di moltissime persone. La maggior parte delle costruzioni già esistenti in Italia e in Europa nei loro centri storici, infatti, sono costituite da muratura ordinaria di pietra o di mattoni e spesso queste murature sono sprovviste di un'effettiva connessione tra loro soprattutto in presenza di azioni sismiche. Ciò ha fatto sì che l'attenzione si concentrasse maggiormente sull'adeguamento o miglioramento preventivo delle strutture maggiormente vulnerabili ai fenomeni sismici, tramite sistemi di diverso tipologia, col tempo sempre migliori¹.

È nota in letteratura l'efficacia delle murature come elementi di controventamento per la loro evidente resistenza alle forze agenti sul piano del muro stesso a differenza invece, delle forze ortogonali che le rendono eccessivamente vulnerabili.

Le fessure tipiche delle murature dipendono dal grado di ammorsamento delle stesse, esse sono, infatti, associate ai meccanismi fuori piano che possono causare il ribaltamento delle pareti stesse. Si ha quindi la necessità di prevenire o ritardare questi meccanismi, attraverso metodologie che possano sopperire agli scarsi collegamenti tra i vari elementi murari e le connessioni tra gli orizzontamenti e le murature stesse.

Sono numerosi i metodi utilizzati per il rinforzo delle murature, uno dei quali è caratterizzato dall'applicazione di sistemi compositi fibro-rinforzati.

Sono nati sistemi di rinforzo innovativi come i FRP (Fiber Reinforced Polymer), costituiti da una matrice polimerica di natura organica, con la quale viene impregnato un rinforzo in fibra continua con elevate proprietà meccaniche e più recentemente i

¹ Zanello E., Rinforzo strutturale e conservazione, esempio applicativo su edifici storici in tufo, in *Recupero e Conservazione magazine*, N.142, luglio-agosto 2017.

compositi FRCM (Fabric-Reinforced Cementitious Matrix) e i TRM (Textile Reinforced Mortar). I compositi FRCM, sono il risultato dell'accoppiamento di reti, realizzate con fibre continue di vetro, carbonio e aramide o con altre di più recente apparizione sul mercato di origine vegetale o animale e di una matrice inorganica a base di malta cementizia o di malta bastarda, i secondi (TRM), rappresentano composti in malta rinforzati con uno o più strati in tessuto collocato all'interno. I principali motivi che hanno favorito il rapido diffondersi dei sistemi di rinforzo FRCM e TRM, rispetto anche agli FRP, sono una maggiore resistenza alle alte temperature ed una maggiore compatibilità con il supporto, soprattutto nel caso delle murature ed in particolare di quelle a carattere storico e monumentale. Essi permettono infatti la permeabilità a vapore ed inoltre possono essere applicati su superfici bagnate.

Gli interventi con FRCM su costruzioni esistenti sono diventate sempre più frequenti, soprattutto per la riparazione di manufatti danneggiati dal terremoto come le recenti esperienze del centro Italia hanno ampiamente dimostrato.

Questi sistemi presentano numerosi vantaggi tecnici e applicativi a loro favore, quali la maneggevolezza e lavorabilità in cantiere o la radio-trasparenza rispetto alla rete, nonché la possibilità di applicazione della rete di rinforzo con matrici a base di calce idraulica naturale, che presenta una buona compatibilità con le murature esistenti².

Una questione che merita altresì attenzione in relazione ai materiali e al loro utilizzo nelle costruzioni, è quella del rimpiazzo dei materiali sintetici o artificiali, finora utilizzati, con corrispondenti di origine naturale o provenienti da processi di riciclo. E' noto come, con l'accelerazione del progresso tecnologico, la crescita demografica e la crisi energetica nei paesi occidentali negli anni '70, hanno fatto sì che il tema ambientale sia affrontato adesso in rapporto al futuro della vita del pianeta³.

Il tema ambientale ed equità dello sviluppo, oggi e in futuro, trova una definizione nel rapporto della Commissione Mondiale su Ambiente e Sviluppo, dettato da Brundtland⁴, a partire dal quale, l'argomento viene inquadrato in successivi documenti internazionali. La definizione di Brundtland stabilisce che lo sviluppo

² Ascione L., Poggi C., Savoia M., "La qualificazione degli FRCM", in *Compositi Magazine*, 29 Settembre, 2013.

³ Mit, Rapporto "The limits to Growth", 1972.

⁴ Wced, "Our Conservation Strategy", 1987.

sostenibile è quello “sviluppo che risponde ai bisogni del presente senza compromettere la capacità delle generazioni future di rispondere ai propri bisogni”. Non è semplice declinare questa definizione né sul piano teorico né su quello operativo. Emergono comunque come denominatori comuni alle diverse interpretazioni e declinazioni alcuni aspetti: la sostenibilità è un concetto multidimensionale, sia per quanto riguarda i bisogni da soddisfare e sia per le capacità da garantire nel tempo. Per quanto attiene ai “capitali” da proteggere e valorizzare, in particolare quello naturale, quello umano e quello sociale, in una prospettiva di sviluppo sostenibile, serve migliorare la conoscenza dei processi di cambiamento, dotarsi di indicatori per monitorarli e valutarli⁵ e intraprendere il cammino verso il rinnovo e l’uso di nuove tecnologie che possano migliorare la qualità dei materiali soprattutto dal punto di vista dell’ecosostenibilità.

Un approccio progettuale di tipo ecocompatibile deve tenere conto dei materiali da costruzione, dell’energia necessaria e delle risorse impiegate, considerandole in funzione di una loro scarsità e degli impatti ambientali e sociali connessi al loro uso. Il reperimento delle materie prime, la loro lavorazione e la confezione dei prodotti per l’edilizia, il trasporto, l’uso e lo smaltimento, possono causare enormi danni ambientali e sociali con un indotto di ampia scala tra cui riduzione delle risorse naturali, distruzione degli habitat naturali, inquinamento atmosferico, il surriscaldamento del pianeta, la desertificazione e problemi di salute dell’uomo.

Le materie prime utilizzabili per la produzione di materiali da costruzione in genere vengono classificate come rinnovabili o non rinnovabili. Le prime presentano cicli di rigenerazione che durano al massimo qualche decennio (legno, bambù, lino, canapa, sughero, iuta), mentre quelle non rinnovabili comprendono i “tipi” caratterizzati da cicli di rigenerazione millenari (pietra, carbone, petrolio, minerali grezzi). Le risorse rinnovabili sono di solito considerate abbondanti, tuttavia se una materia è sfruttata in maniera eccessiva, essa può cominciare a scarseggiare quindi a esaurirsi. Ne consegue la necessità di evitare il sovra sfruttamento delle risorse imponendo politiche di gestione adeguata.

⁵ Maria Chiara Torricelli, “Per ragionare di sostenibilità nelle costruzioni”, in imprese edili, 31 dicembre 2017.

L'accresciuto interesse sugli impatti ambientali, dovuti tra l'altro alle attività di estrazione di materie prime, ha migliorato di poco la situazione, i consumatori quindi possono spingere il mercato ad adottare soluzioni sempre più sostenibili prendendo in considerazione questi aspetti quando si apprestano a operare delle scelte.

Tutti i prodotti da costruzione derivano da materie prime naturali, anche quelli considerati sintetici, essi però subiscono dei lunghi processi di lavorazione. Ne è un esempio l'acciaio, oggi molto utilizzato, derivato del ferro minerale, esso subisce una lavorazione molto complessa, in quanto deve essere pulito, agglomerato per sinterizzazione, fuso e infine portato a 1.700-1.800 °C. La produzione di alluminio altresì richiede un enorme quantità di energia, pari a 180-250 GJ/tonnellata, di cui più del 70% è impiegata per la riduzione elettronica. Così come loro, tantissimi altri materiali attualmente diffusi nell'ambito edile determinano un quantitativo non indifferente di inquinamento dovuto alla lavorazione e trasporto, per non parlare dell'ingente spreco di energia.

È proprio la trasformazione delle materie prime in materiali e prodotti per l'edilizia che implica un consumo energetico legato ai processi industriali, al trasporto dai luoghi di produzione a quelli di costruzione e alle modalità di messa in opera.

Esistono, però, numerosissimi materiali eco-compatibili come alcuni di essi che risultano essere anche isolanti naturali. La fibra di cocco ad esempio è stata utilizzata nei paesi orientali fin dai tempi più remoti per tutti gli usi particolarmente gravosi in cui era richiesta eccezionale robustezza, resistenza allo sfregamento meccanico e alla rottura. Oltre agli usi canonici, veniva infatti utilizzata nel campo delle costruzioni navali per la sua caratteristica di non marcire a contatto con acqua o umidità, di non impregnarsi e non subire degrado come le altre fibre organiche, essa è riutilizzabile e riciclabile ma ha un alto valore di energia dovuto al trasporto, è un buon isolante termico, fonoisolante e fonoassorbente; i fiocchi di cellulosa hanno una struttura composta da pori in grado di rinchiudere grandi quantità di aria così da ridurre le perdite di calore, assorbe l'umidità dall'ambiente e lo cede successivamente; la canapa, invece, è una materia rinnovabile ed ha una crescita rapida e abbondante, cresce di 4 metri in 120 giorni, e non necessita di pesticidi ed erbicidi, è un buon traspirante, è fonoisolante e fonoassorbente ed inoltre è pure compostabile. Oltre a questi materiali ve ne sono numerosi altri, come il bambù, dalle fantastiche proprietà

di flessibilità e resistenza, che lo rendono uno dei materiali naturali maggiormente studiati come soluzione alternativa ai normali materiali strutturali, soprattutto quando si parla di flessibilità e resistenza al sisma. Un altro materiale naturale utilizzato nelle costruzioni è il legno che risulta essere un buonissimo isolante per le abitazioni, il sughero ottenuto dalla quercia da sughero, invece, è un buon materiale isolante ed infine la lana di pecora, che grazie alla sua particolare microstruttura risulta un'ottima alternativa alle fibre minerali per l'isolamento termico ed acustico. Sono vari i materiali che al giorno d'oggi potenzialmente possono rappresentare perfetti sostituti ai materiali tradizionali nelle costruzioni, si ripone all'uomo la responsabilità e l'intelligenza di riuscire a fare un uso intelligente, studiandone il comportamento.

1.2 Obiettivo

L'argomento della presente tesi di laurea magistrale, si prefigge lo scopo di valutare e caratterizzare due tipologie di materiali naturali, nello specifico la iuta ed il lino, stimandone il comportamento nel loro utilizzo come rinforzo per il miglioramento strutturale di murature presenti negli edifici già esistenti e altresì quelli di futura realizzazione, tramite l'applicazione di un sistema tecnologico caratterizzato da un composito matrice-fibra. Si vuole quindi dimostrare che il sistema, posto sotto analisi, abbia la capacità di rendere maggiormente compatta la muratura, evitare il crollo immediato della stessa, incrementare così la duttilità dell'elemento strutturale e favorirne la connessione tra i diversi elementi che lo compongono.

Si è proceduto progettando quindi una malta con caratteristiche il più possibile affini alle specifiche delle fibre, in termini di resistenza e modulo. Secondariamente si è realizzato il composito costituito da matrice di malta e da tessuto continuo in fibra naturale. Lo studio specifica poi il comportamento della componente strutturale in muratura in termini di rottura lungo l'asse della stessa.

L'elemento strutturale viene rivestito dalla malta cementizia di media resistenza progettata, con l'applicazione di una sottostante rete in fibra naturale atta a migliorare la resistenza della stessa e mantenere il corpo strutturale maggiormente compatto in caso di sollecitazioni orizzontali.

Lo studio ha avuto la durata di circa sei mesi, nella sede dell'Università di Ingegneria Civile di Coppe, UFRJ nella città di Rio de Janeiro, nel laboratorio di NUMATS.

Le fibre prese in esame sono state, come già accennato, la fibra di lino, maggiormente presente nel territorio Italiano ed Europeo e la fibra di iuta maggiormente presente nel territorio Brasiliano e Sud Americano.

Dopo una preliminare caratterizzazione dei materiali impiegati, si è proceduto con la caratterizzazione del composito ed infine delle murature. Il composito costituito da malta e due strati di tessuto, internamente ad essa, è stato sottoposto a una prova di trazione diretta sia nel caso di fibra allo stato naturale sia nel caso di fibra sottoposta a trattamento alcalino, ed infine si è proceduto con la valutazione del comportamento dell'elemento murario soggetto a compressione diagonale, la quale simula proprio il taglio, ovvero la deformazione tipica della struttura quando questa è soggetta al fenomeno sismico.

Gli obiettivi specifici sono:

- progettare una malta, sostituendo ad una percentuale di cemento, materiali provenienti da scarti come il metacaolino e la cenere volante, ottenendo una resistenza tale da essere compatibile con la fibra naturale;
- valutare la resistenza a trazione della corda di iuta, differenziando il caso di fibra al naturale e il caso in cui la fibra subisce un trattamento alcalino, mettendone a confronto i risultati;
- effettuare un test di *Pull out* tra la fibra e la malta, sempre nel caso di fibra trattata e non trattata, valutando così il comportamento relativo alla capacità della matrice di trattenere il più possibile la fibra al suo interno;
- effettuare test di trazione diretta su provini rettangolari di composito in malta e tessuto, ovvero del sistema di rinforzo, nel caso di fibra di iuta trattata e non trattata e nel caso di fibra di lino trattata e non trattata, mettendone così le caratteristiche meccaniche a confronto;
- realizzazione di prototipi in muratura di laterizio, applicazione del composito di rinforzo, ed esecuzione del test di compressione diagonale del sistema, per murature prive di rinforzo, murature con sistema di rinforzo caratterizzato da due strati di tessuto di lino trattato e murature con sistema di rinforzo caratterizzato da due strati di tessuto di iuta non trattata. Comparazione della risposta delle due tipologie di sistema in termini di: carica massima sopportata, deformazione massima registrata, tensione residua, multi-

fessurazione della parete, incremento della tenacità della stessa grazie all'applicazione del tessuto e infine maggiore compattezza dell'elemento murario nel caso di applicazione del sistema di rinforzo;

1.3 Struttura della dissertazione

Questo elaborato di ricerca si suddivide in 6 capitoli:

- Capitolo 1: Introduzione al tema, motivazione dello studio e importanza, obiettivi e organizzazione dell'elaborato;
- Capitolo 2: Delucidazione relativa ai meccanismi di danno delle murature e descrizione dei singoli meccanismi di rottura;
- Capitolo 3: Revisione bibliografica riguardante le fibre naturali e la loro caratterizzazione meccanica e relativa ai compositi FRCM e TRM in fibre sintetiche e in fibre naturali;
- Capitolo 4: Presentazione della caratterizzazione dei materiali utilizzati, nonché i metodi sperimentali utilizzati per la valutazione e caratterizzazione delle proprietà delle fibre e dei materiali compositi;
- Capitolo 5: Trattazione e analisi dei risultati sperimentali;
- Capitolo 6: Conclusione del caso di studio e proposte per studi futuri.

CAPITOLO 2

Meccanismi di danno delle murature

2.1 Considerazioni introduttive

Fin dall' inizio del secolo scorso la muratura e il legno, distintamente o congiuntamente, sono stati materiali principali del costruire e non stupisce, pertanto, che moltissimi edifici esistenti, in Italia e nel resto del mondo, siano in muratura.

Gli edifici in muratura hanno spesso dimostrato una notevole resistenza al sisma almeno in tutti quei casi in cui la capacità della struttura è risultata favorevolmente condizionata dall'istaurarsi del così detto comportamento scatolare.

È noto infatti che le pareti in muratura offrono una resistenza alle forze orizzontali agenti nel loro piano medio decisamente superiore a quella offerta per i carichi ortogonali, tanto che questa componente può essere trascurata.

La grande resistenza che una parete offre nel proprio piano è indice della potenzialità che essa ha come elemento strutturale portante e di controventamento in questa direzione. La rottura si manifesta prevalentemente per il taglio diagonale o flessionale negli spigoli. Fuori dal piano, invece, la muratura, oltre a non possedere una capacità resistente apprezzabile, manifesta meccanismi di collasso governati prevalentemente dal ribaltamento, dalla flessione o dall'instabilità⁶.

⁶Pasqualon G., "Il comportamento delle strutture in muratura sotto l'azione del sisma", in *Ingenio*, 2019, Pag.1-2

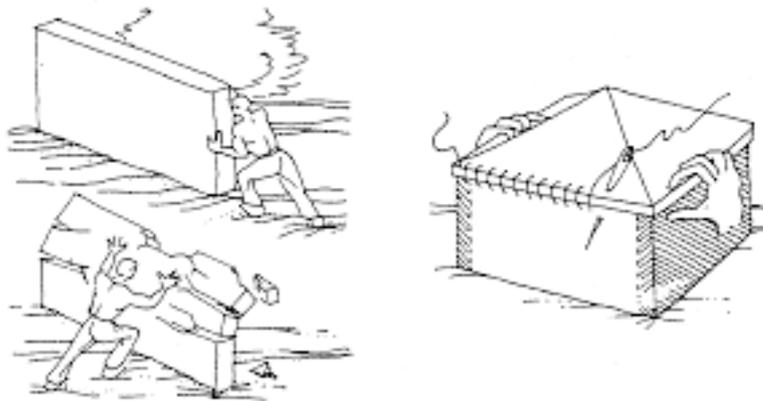


Figura 2. 1 - Piano resistente e non della muratura.

La ragione di questo comportamento è ben nota: la resistenza a trazione molto bassa della muratura (circa 1/30 di quella a compressione) evidenzia il suo comportamento intrinsecamente non lineare in quanto all'inversione delle forze sollecitanti corrisponde un comportamento completamente diverso della struttura.

Per garantire un funzionamento strutturale ottimale dell'edificio in muratura occorre limitare il più possibile le tensioni di trazione. Pertanto, è necessario che tutte le pareti siano in buona misura compresse, poiché all'aumentare della compressione aumenta la resistenza a flessione e a taglio, e che le sollecitazioni di flessione e taglio siano il più possibile limitate.

La diretta conseguenza di ciò appena detto è che le pareti dovrebbero avere dimensioni, in lunghezza e in altezza, limitate e dovrebbero essere ben vincolate agli elementi trasversali ovvero ai solai e ai muri di controvento. Solo in questo modo le azioni che agiscono ortogonalmente al piano della parete inducono sollecitazioni taglienti e flettenti di valore limitato. Di contro, i muri di controvento risultano così maggiormente sollecitati, ma in questi le forze taglienti e flettenti agiscono nel piano di maggior rigidezza e resistenza.

Nell'assorbimento delle azioni orizzontali, la collaborazione fra gli elementi della scatola muraria è essenziale affinché le azioni flettenti rimangano a livelli ridotti rispetto allo sforzo normale di compressione, e, quindi, sopportabili dalla muratura. Questa collaborazione dipende dal grado di connessione fra gli elementi e, dunque, dalla quantità degli stessi.

Il primo aspetto è connesso alla qualità e integrità della tessitura muraria; infatti, murature costituite da materiale incoerente possono raggiungere il collasso prima che si manifesti qualsiasi meccanismo in grado di offrire una resistenza apprezzabile. Numerosi sono infatti i crolli dovuti alla fatiscenza “intrinseca” delle murature.



Figura 2. 2– Crolli dovuti alla fatiscenza intrinseca della muratura

I motivi di questo comportamento disgregativo sono molteplici:

- La scarsa qualità dei materiali, ovvero la fatiscenza dei mattoni o la presenza di lacune, vetustà dei materiali, muratura in ciottoli, ecc;
- La scarsa qualità della malta, scadente o troppo magra. Le malte caratterizzate da scarsa quantità di legante, talvolta addirittura composte di terra cruda, sono diffuse soprattutto nelle costruzioni più povere, ma non si può escludere la loro presenza anche in costruzioni più pregiate, nascoste all'interno di parametri esterni più curati. Queste malte svolgono sostanzialmente solo un ruolo di ripartizione di carichi verticali, contribuendo in maniera molto limitata alla connessione tra i blocchi specie in presenza di sollecitazioni cicliche o vibrazionali. Una muratura disgregata nella quale i mattoni o le pietre non conservano traccia di malta attaccata alle proprie superfici e senz'altro un segnale di scarsa qualità della malta;
- La scarsa qualità della tessitura muraria e l'assenza di diatoni. Le murature a sacco sono senz'altro tra le più critiche, anche per la spinta che il riempimento stesso può generare sui paramenti esterni nel caso sia poco

coerente. Molto diffuse sono anche le murature in pietrame realizzare con due parametri sostanzialmente accostati, con scarsa presenza di diatoni per il collegamento trasversale e con solai spesso appoggiati solo sul paramento esterno.

Inoltre, le murature in ciottoli rotondeggianti o in pietra non squadrata difficilmente riescono a garantire un efficace livello di connessione; in queste murature, molto spesso, i veri elementi sono sovrapposti in maniera poco ordinata, dove l'elemento "malta" non veniva posto in opera con la funzione di "legante" ma per permettere il collocamento reciproco dei vari elementi, creando locali piani "regolari" di sovrapposizione delle varie pezzature non squadrate. Una muratura siffatta trasmette i carichi verticali attraverso il contatto, spesso puntiforme, tra sasso e sasso creando in questo modo picchi di tensione che rendono precaria la funzione stessa di maschio murario nell'accezione corrente del termine⁷.

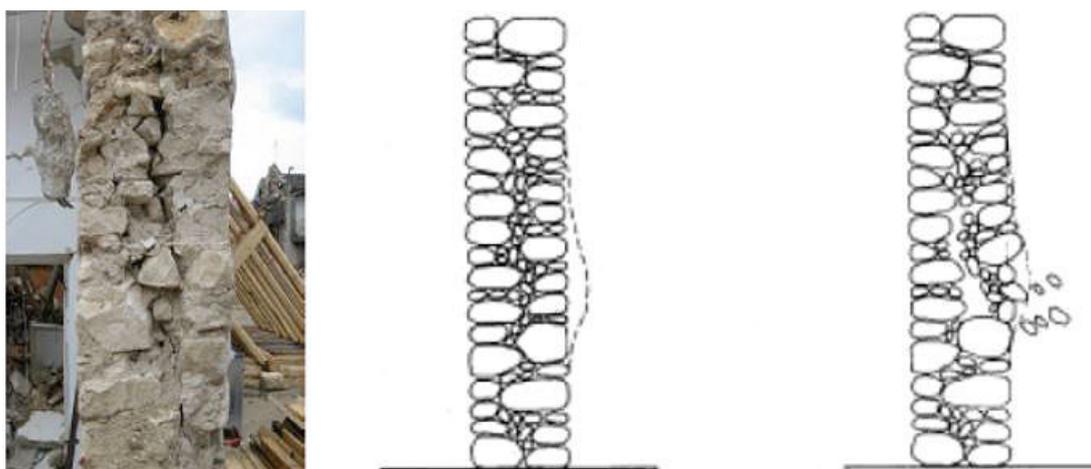


Figura 2. 3 - Comportamenti disregativi delle murature in ciottoli.

Non sempre la situazione migliora passando ai mattoni; si deve, infatti, considerare che anche le murature a più teste in molti casi sono state realizzate come più murature a testa, tra loro sostanzialmente scollegate, e negli esempi reali ciò ha determinato crolli inattesi.

⁷ Gianluca Pasqualon, "Il comportamento delle strutture in muratura sotto l'azione del sisma", in *Ingenio*, 2019, Pag.3-4

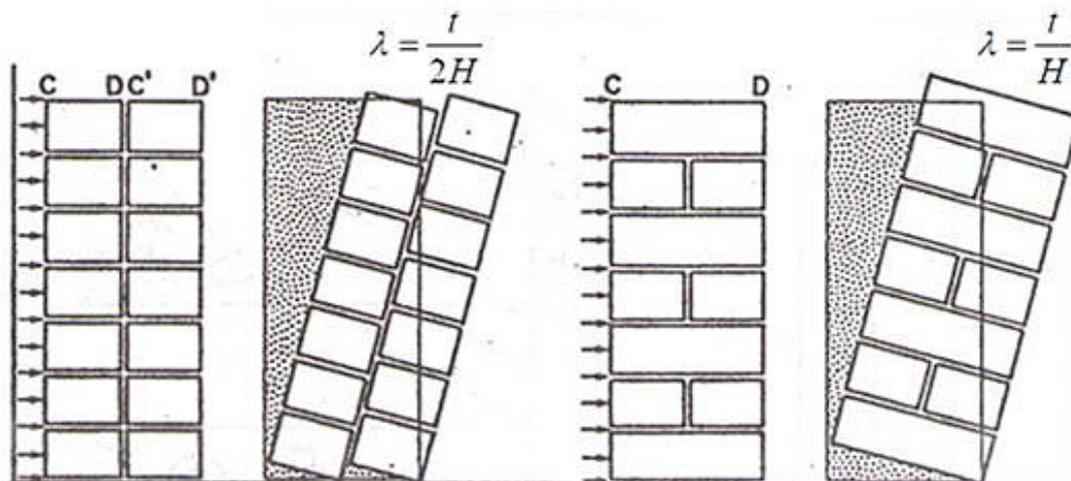


Figura 2. 4 – Comportamento di una muratura a due teste senza e con collegamento.

È evidente quindi che la fase zero di un qualsiasi intervento di recupero di un edificio esistente, successivo ad un crollo o deterioramento, dovrà essere quella del consolidamento “intrinseco” dell’apparecchiatura muraria che, si badi bene, non deve essere orientato verso l’esasperata ricerca di conferire alle strutture elevate resistenze e rigidissime connessioni bensì verso la riomogenizzazione o meglio “riaggregazione” della muratura portandola ad un grado di resistenza quanto più uniforme possibile, anche se non elevatissimo, permettendo così di poter verificare la capacità portante sotto i nuovi carichi di esercizio con la garanzia di sezioni omogenee e ben aggregate⁸.

2.2 I meccanismi di collasso degli edifici in muratura

Dall’osservazione del danno che una struttura soggetta a sisma può subire è possibile evidenziare, con strumenti della meccanica e della scienza delle costruzioni, come, a differenti caratteristiche tipologico – costruttive corrispondano diversità di comportamento della struttura sollecitata dal terremoto.

I danni che caratterizzano le murature possono essere distinti in due tipologie principali: *meccanismi di primo e secondo modo* (Giuffrè, 1993).

Per *meccanismi di primo modo* si intendono quei cinematismi connessi al comportamento delle pareti in muratura fuori dal proprio piano, quindi con comportamento delle pareti in muratura fuori dal proprio piano con un

⁸ Pasqualon G., “Il comportamento delle strutture in muratura sotto l’azione del sisma”, in *Ingenio*, 2019, Pag.5

comportamento flessionale e ribaltamento. I *meccanismi di secondo modo* riguardano invece la risposta della parete nel proprio piano, con tipici danneggiamenti per taglio e flessione.

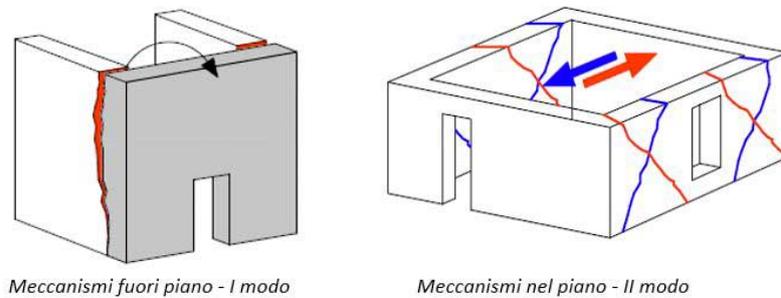


Figura 2. 5– immagine (1) meccanismi fuori piano – 1°modo, immagine (2) meccanismi nel piano – 2°modo

2.2.1 Meccanismi di primo modo

I meccanismi di primo modo corrispondono a cinematismi fuori piano di singole pareti o di porzioni di struttura. Si tratta di fenomeni di ribaltamento (rocking) e flessione che portano a collasso la struttura per perdita di equilibrio. Questi cinematismi possono presentarsi in costruzioni in cui l'assenza o scarsa efficacia di collegamento tra le pareti e gli orizzontamenti e tra le pareti stesse negli incroci murari non garantisce l'instaurarsi di un comportamento d'insieme della struttura, ciascuna parete tende quindi a comportarsi in modo indipendente attivando meccanismi fuori piano.

2.2.1.1 Meccanismi di ribaltamento semplice di parete

Il ribaltamento semplice di pareti esterne degli edifici dovute all'azione del sisma rappresenta una situazione di danno tra le più frequenti e pericolose. Questa situazione si verifica generalmente per la carenza di connessione tra la parete investita dal sisma e quelle ortogonali; in presenza di cordoli, tiranti, ecc., difficilmente questo tipo di meccanismo si manifesta, in quanto tali elementi ne ostacolano l'attivazione.

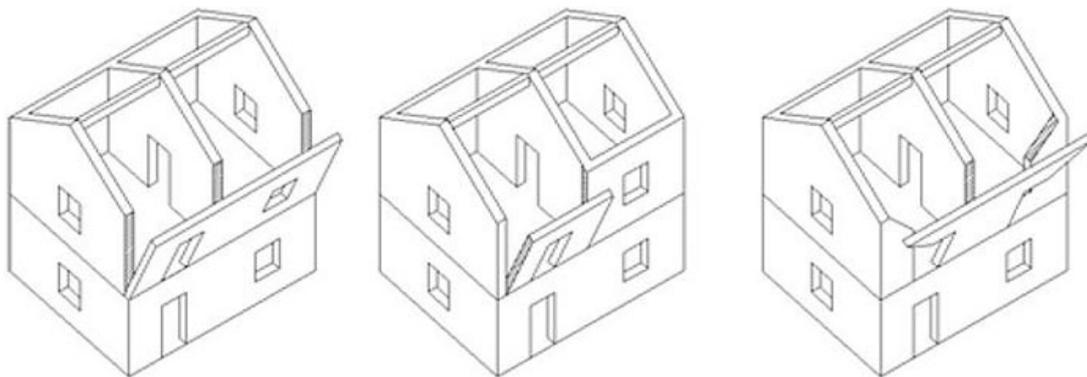


Figura 2. 6– Possibili meccanismi di ribaltamento semplice.

I principali sintomi che manifestano l'avvenuta attivazione del meccanismo sono la presenza di lesioni verticali in corrispondenza delle intersezioni murarie, angolate e martelli murari, la presenza di fuori piombo della parete ribaltante e lo sfilamento delle travi degli orizzontamenti. Il ribaltamento semplice si può sviluppare in varie maniere, seguendo geometrie diverse, dettate anche dalla disposizione delle aperture e quindi di porte e finestre. Può interessare uno solo o più piani dell'edificio, in funzione di come sono connessi i vari solai e murature lungo tutto l'edificio.

2.2.1.2 Meccanismi di flessione verticale

Una situazione piuttosto comune negli edifici in muratura è rappresentata da una tesa muraria vincolata agli estremi e libera nella zona centrale. È questo ad esempio il caso di un edificio con un cordolo in sommità e i solai intermedi privi di qualsiasi connessione; una situazione di questo tipo si presenta anche quando si considera la porzione di parete compresa tra due solai ben collegati a essa. Sostanzialmente, la flessione verticale si verifica quando la parete è ben ammorsata agli estremi, poco ammorsata ai lati e libera nella parte centrale.

Questo meccanismo è anche causato dalla snellezza eccessiva delle pareti, dalla presenza di murature a sacco o paramenti mal collegati, dalla presenza di spinte orizzontali localizzate (archi, volte) o da orizzontamenti intermedi mal collegati. La flessione verticale si manifesta con la formazione di una cerniera cilindrica orizzontale che divide la parete in due blocchi ed è descritta dalla rotazione reciproca degli stessi attorno a tale asse per azioni fuori dal piano.

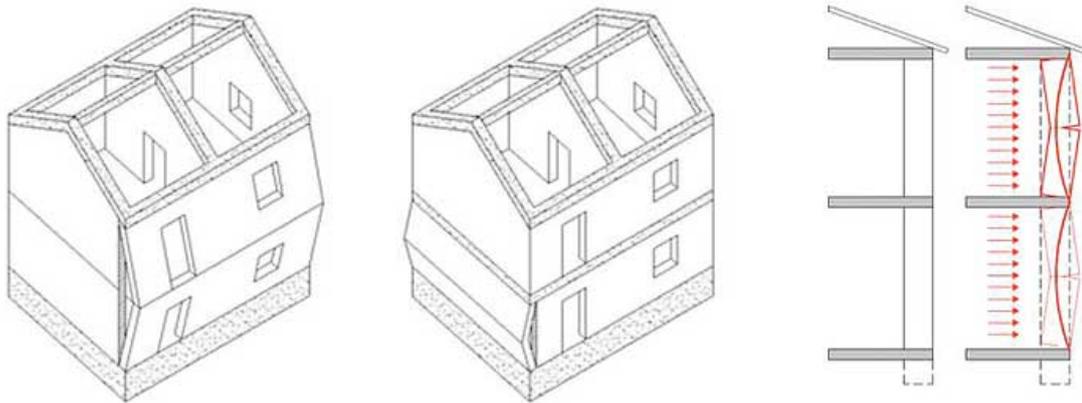


Figura 2. 7– Possibili meccanismi di flessione semplice.

I principali sintomi che manifestano l'avvenuta attivazione del meccanismo sono la presenza di spancamenti e fuori piombo della parete, lesioni orizzontali e verticali, lo sfilamento delle travi degli orizzontamenti intermedi.



Figura 2. 8– Spancamenti e fuori piombo della parete.

2.2.1.3 *Meccanismi di flessione orizzontale*

Il meccanismo di flessione orizzontale si manifesta sulle pareti ed interessa la zona alta della parete; si verifica quando la parete è libera o mal collegata in sommità e ben ammorsata alle pareti laterali. Il cinematismo è innescato da una spinta orizzontale ortogonale alla parete risultante dalla spinta del tetto o di un solaio. La flessione orizzontale si manifesta con l'espulsione di materiale dalla zona sommitale della parete e col distacco di corpi cuneiformi accompagnato dalla formazione di cerniere cilindriche oblique e verticali per azioni fuori dal piano. Per comprendere l'attivazione del meccanismo si immagini la formazione di un arco ideale resistente orizzontale a tre cerniere nello spessore della parete, una in mezzeria e le altre due in prossimità delle pareti laterali. L'arco ideale orizzontale resiste alla forza orizzontale fino a quando la muratura cede per schiacciamento. Si ha una rotazione fuori dal piano della parete con la formazione di fessure paraboliche.

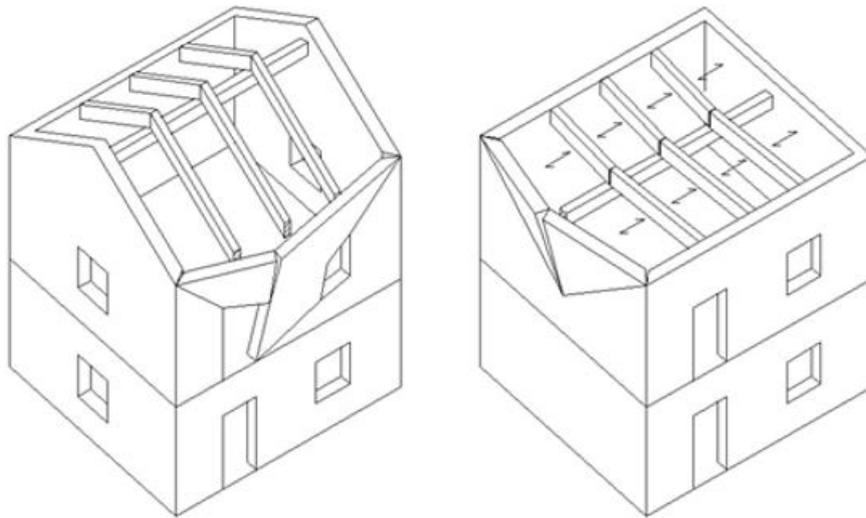


Figura 2. 9– Possibili meccanismi di flessione orizzontale.

Questo meccanismo è spesso causato dalla presenza di coperture spingenti, dalla presenza di aperture ricavate nello spessore murario (nicchie, canne fumarie, ecc.), dalla presenza di murature a sacco o paramenti mal collegati.

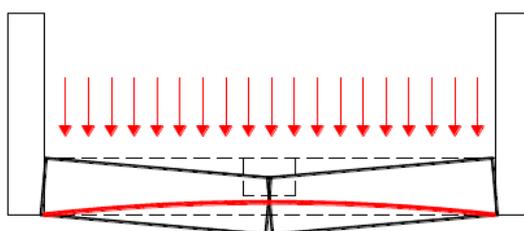


Figura 2. 10– Flessione orizzontale.

I principali sintomi che manifestano l'avvenuta attivazione del meccanismo sono la presenza di evidenti lesioni verticali ed oblique sulla faccia esterna ed interna della parete, la presenza di rigonfiamenti, lo sfilamento delle travi del tetto.



Figura 2. 11– Esempio di flessione orizzontale.

2.2.1.4 Meccanismi di ribaltamento composto

Per ribaltamento composto si indica un insieme di situazioni in cui al ribaltamento della parete ortogonale all'azione sismica si accompagna il trascinarsi di una porzione di struttura muraria appartenente ad un'angolatura libera oppure a pareti di spina. Affinché si possa prevedere un meccanismo di ribaltamento composto in un edificio integro, devono esserci condizioni caratterizzate dall'assenza di vincoli in sommità della parete ribaltante e dalla presenza di un efficace collegamento tra la parete investita dal sisma e quella a essa ortogonale.

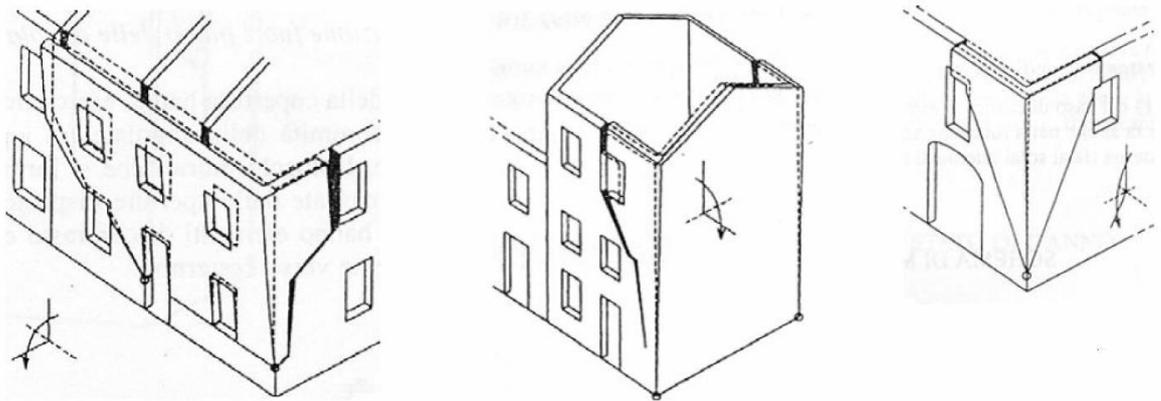


Figura 2. 12– Possibili meccanismi di ribaltamento composto.

I principali sintomi che manifestano l'avvenuta attivazione del meccanismo sono la presenza di lesioni diagonali sulle pareti di controvento, fuori piombo della parete ribaltante, sfilamento delle travi degli orizzontamenti.



Figura 2. 13– Esempio di ribaltamento composto.

2.2.1.5 Meccanismi di martellamento dei solai e delle coperture

I meccanismi di danno misti possono essere provocati dal martellamento delle strutture della copertura e dalla spinta di diagonali.

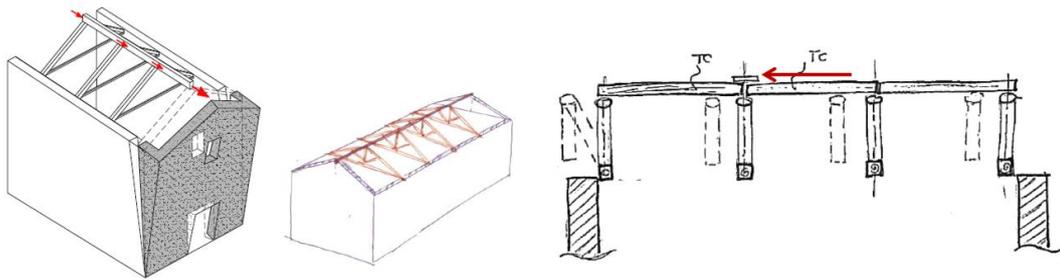
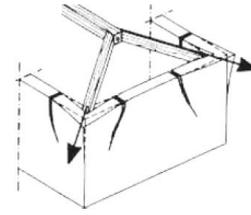


Figura 2. 14 – Meccanismo di martellamento.



Figura 2. 15– Martellamento della copertura.



Innesco del meccanismo

Figura 2. 16 – Martellamento dei diagonali.

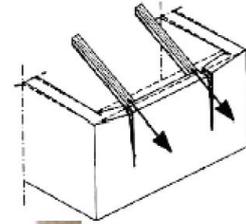


Figura 2. 17– Martellamento dei puntoni della copertura.

2.2.2 Meccanismi di secondo modo

I meccanismi di secondo modo interessano la risposta delle pareti nel proprio piano e generano danneggiamenti per flessione e taglio. La rottura avviene per superamento della resistenza ultima del materiale.



Figura 2. 18– Meccanismi nel piano – rottura a taglio dei maschi murari.

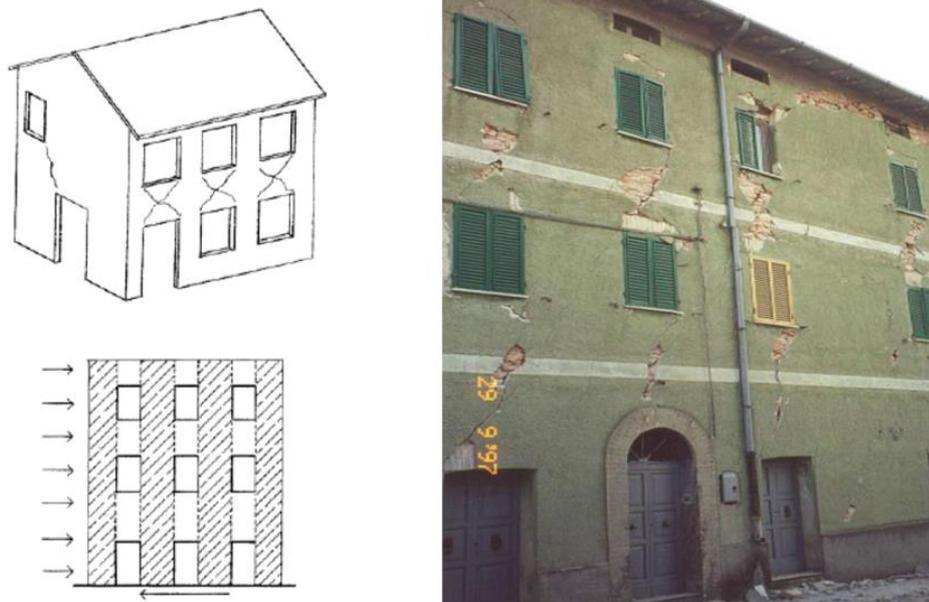


Figura 2. 19– Meccanismo nel piano – rottura a taglio delle fasce di piano.

A differenza dei meccanismi di primo modo, questi cinematismi si attivano in strutture in grado di sviluppare una risposta globale alla sollecitazione sismica

ovvero quando sono impediti, o comunque resi poco probabili, i meccanismi di collasso locali fuori dal piano con presenze di catene, cordoli, ecc....⁹

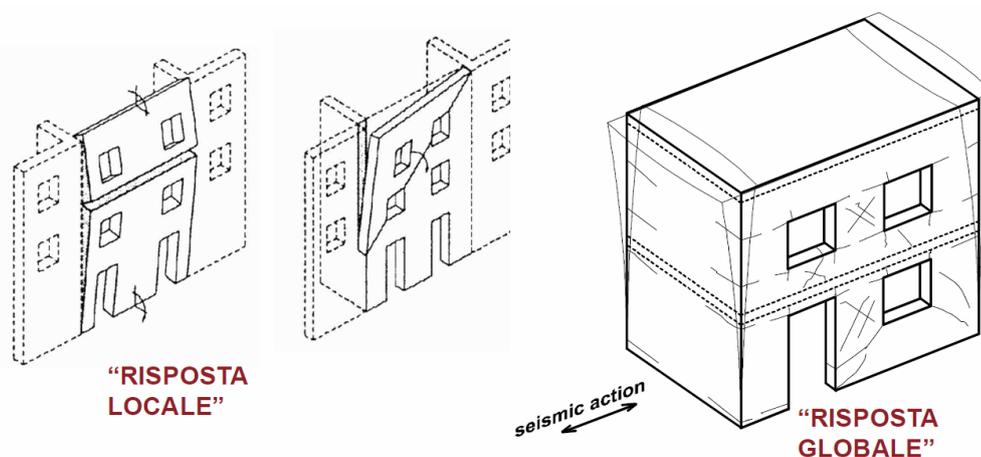


Figura 2. 20– Meccanismo nel piano.

Il buon ammorsamento delle pareti e l'efficace vincolo tra pareti e orizzontamenti scongiurano fenomeni di ribaltamento e flessione fuori dal piano; le pareti collaborando tra loro, riescono ad attivare una risposta nel loro piano che meglio sfrutta la capacità di rigidità e di resistenza della muratura stessa e garantiscono maggiore sicurezza.

Nel caso in cui si realizzi il comportamento scatolare dell'edificio, la rigidità dei solai nel proprio piano assume un ruolo fondamentale, infatti solai rigidi ripartiscono le azioni fra le pareti in base alla loro rigidità ed alla posizione in pianta, favorendo così l'instaurarsi di meccanismi di collasso nel piano.

Di contro nel caso di solai molto flessibili, la ripartizione delle azioni sulle varie pareti resistenti avviene in funzione della loro area d'influenza per i carichi verticali accentuandone il comportamento indipendente.

La rigidità degli orizzontamenti in tale contesto accentua il comportamento scatolare della struttura, solai rigidi, infatti, consentono la ripartizione della sollecitazione sismica tra le pareti in base alla loro rigidità nel piano; ciascuna parete sarà pertanto chiamata a rispondere in modo proporzionale alla capacità intrinseca di resistere.

⁹ Pasqualon G., "Il comportamento delle strutture in muratura sotto l'azione del sisma", in *Ingenio*, 2019, Pag.6-14

Se si ha invece il caso di un impalcato deformabile, come per esempio nei solai tradizionali in legno, non si ha questa redistribuzione benefica con la conseguenza che ciascuna parete, indipendentemente dalla sua rigidità, risulta caricata da un'azione sismica proporzionale alla massa di competenza per area di influenza, in pratica ai carichi verticali che esse sopporta¹⁰.

2.2.3 Conclusioni

La valutazione della sicurezza sismica va eseguita oltre che con riferimento alla scena sismica globale, anche in funzione dei relativi meccanismi di collasso, visti in precedenza. Sulla base di quest'ultimi è possibile affermare che in molti casi è necessaria la realizzazione di interventi tecnologici che abbiano lo scopo di mettere in sicurezza o recuperare gli edifici che risultano essere maggiormente vulnerabili al fenomeno sismico. È intuitivo quindi che sistemi come quello preso in esame in questo elaborato possano migliorare la funzionalità degli elementi murari, rinforzarli e allo stesso tempo aprire le porte all'utilizzo di materiali naturali perfettamente compatibili con l'ambiente e 100 % smaltibili.

¹⁰ Pasqualon G., "Il comportamento delle strutture in muratura sotto l'azione del sisma", in *Ingenio*, 2019, Pag.14-15

CAPITOLO 3

Revisione bibliografica

3.1 Fibre naturali

Le fibre naturali, comparate con le fibre sintetiche, hanno basso costo, sono più facili da maneggiare, hanno buone proprietà meccaniche e hanno necessità di meno energia nel processo di produzione, infine esse sono biodegradabili. Lo sviluppo di materiali compositi rinforzati da fibre naturali è in gran parte motivato da una maggiore consapevolezza ambientale, in gran parte dovuta ai recenti problemi di smaltimento di rifiuti e all'esaurimento delle risorse petrolchimiche. L'uso di materiali naturali nelle costruzioni moderne può ridurre gli sprechi, aumentare l'efficienza energetica e allo stesso tempo promuovere il concetto di stabilità¹¹.

Le fibre naturali sono ottenute da diverse parti della pianta. Possono essere estratte dal gambo, dalla foglia, dai semi o dai frutti delle piante stesse. Le fibre ottenute dallo stelo sono caratterizzate da fasci di fibre, ciascuna contenente singoli filamenti. Le fibre di iuta, lino, canapa sono esempi di questo tipo. Le fibre provenienti da foglie, come la sisal e la banana, hanno un diametro maggiore rispetto alle fibre provenienti dallo stelo. Il cotone è un esempio di fibra di semi e la fibra di cocco un esempio di fibra proveniente dal frutto. Ci sono anche altre fonti di fibra, che possono essere ottenute da residui agricoli come buccia di riso, buccia di semi di girasole e bagassa di canna da zucchero¹².

Le fibre naturali sono esse stesse materiali compositi naturali. Presentano, infatti, una struttura complessa costituita da una sottile parete primaria e una parete secondaria formata da tre strati: lo strato di spessore medio determina le proprietà meccaniche della fibra¹³, alcuni autori parlano di esse come pareti rispettivamente primarie, secondarie e terziarie¹⁴. Le fibre vegetali sono come tubi microscopici, dove il lume,

¹¹ Dittenber et al., 2012.

¹² Thomas et al., 2011.

¹³ Thomas et al., 2011.

¹⁴ John et al., 2008.

ovvero il compartimento interno della cellula, si trova internamente alle pareti cellulari¹⁵.

Le pareti cellulari sono composti di microfibrille, matrice lignina e emicellulosa, e hanno diversi orientamenti su ogni parete cellulare. Le microfibrille hanno un diametro di circa 10-30 nm e consistono di 30-100 molecole di cellulosa¹⁶.

L'angolo costituito da fibrille o angolo medio che si forma tra le microfibrille e l'asse della fibra, varia da una fibra all'altra e possono essere responsabili per le proprietà meccaniche delle stesse. Fibre con angoli più piccoli hanno generalmente una maggiore resistenza e rigidità, mentre fibre aventi angoli maggiori risultano avere un comportamento duttile¹⁷.

La lignina è responsabile del legame che esiste tra i filamenti, i quali formano un fascio di pectina che si lega allo stelo. La lignina e la pectina sono più deboli dei polimeri celluloseici, esse infatti devono essere rimosse nel caso in cui le fibre vengano utilizzate come rinforzo in materiali compositi. La maggior parte della pectina viene rimossa quando i fasci vengono separati dal fusto tramite macerazione, ovvero una delle fasi di lavorazione della fibra che consiste nell'immersione della stessa in acqua al fine di facilitarne la separazione dalla corteccia e stigliatura¹⁸ che è letteralmente la separazione delle fibre.

La figura 3.1, mostra la struttura di una fibra naturale¹⁹.

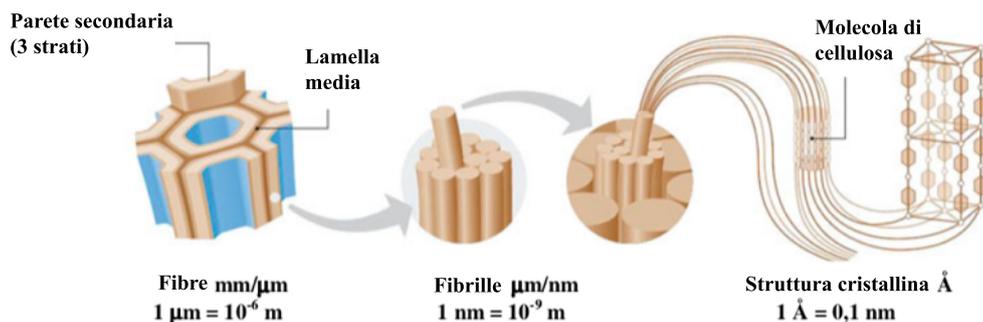


Figura 3. 1 – Struttura di una fibra naturale, Zimmermann et al. (2004).

¹⁵ Thomas et al., 2011.

¹⁶ John et al., 2008, THOMAS et al., 2011, DITTENBER et al., 2012.

¹⁷ Deifoirt et al., 2010.

¹⁸ Dittenber et al., 2012.

¹⁹ Zimmermann et al., 2004.

La figura 3.2 presenta delle micrografie di fibre di iuta e cocco per l'osservazione della loro morfologia. Sebbene le fibre naturali abbiano la stessa struttura cellulosa, ovvero pareti cellulari, lamelle centrali e lumi, presentano differenze nella sezione trasversale totale, nello spessore delle pareti delle cellule, nella quantità e nell'area dei lumi. Questi fattori influenzano la resistenza meccanica delle fibre.

Un altro fattore che può essere influente per la resistenza meccanica è la composizione chimica. Le fibre naturali sono composte principalmente da lignina, cellulosa ed emicellulosa. Il contenuto di cellulosa è il principale costituente responsabile della resistenza della fibra. La fibra di sisal, ad esempio, è composta da 73% di cellulosa, 10% di emicellulosa e 7,6% di lignina²⁰, mentre la fibra di iuta ha circa il 65% di cellulosa, il 17% di emicellulosa e il 14% di lignina²¹.

La struttura cristallina dei polimeri è correlata all'organizzazione delle catene polimeriche e influenza le proprietà meccaniche come rigidità e resistenza. Più alto è il grado di cristallinità, migliore è l'allineamento delle catene e, quindi, maggiore sarà la resistenza²².

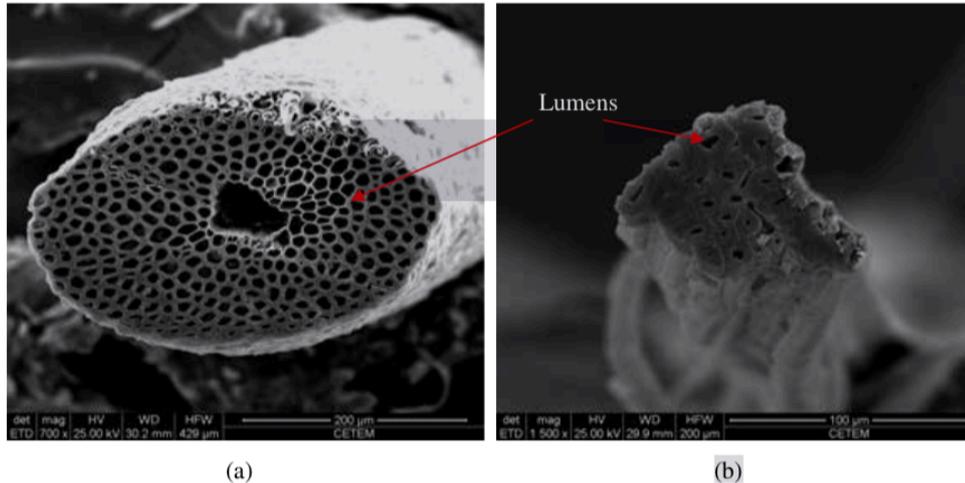


Figura 3. 2 – Micrografia della fibra di (a) cocco e (b) iuta.

Diversi fattori influenzano la qualità della fibra, in diverse fasi della vita della pianta. La forma, le dimensioni e la resistenza meccanica delle fibre naturali possono variare

²⁰ Sydenstricker et al., 2003.

²¹ Wang et al., 2008.

²² Canevarolo, 2006.

ampiamente a seconda dell'ambiente di coltivazione, della regione di origine e di altre caratteristiche²³.

Uno studio sull'influenza dell'ambiente culturale sulla resistenza a trazione della fibra di kenaf è stato eseguito da uno studioso, Ochi, nel 2008. Le fibre sono state coltivate in una regione fredda con una temperatura media di 22°C (condizione A) e calda con una temperatura media di 30°C (condizione B) in Giappone. Per le prove di trazione sono state utilizzate fibre di 500 mm di lunghezza e diametro tra 50 e 150 µm. L'area della sezione trasversale delle fibre è stata determinata calcolando la media di dieci valori del diametro misurato dalle immagini ottenute grazie al microscopio ottico. La fibra cresciuta in condizioni "B" ha raggiunto una lunghezza maggiore di quella coltivata in condizioni "A", indicando che le differenze di temperatura nelle condizioni di crescita possono influenzare la lunghezza della fibra e di conseguenza il suo comportamento meccanico. I valori medi di resistenza a trazione e modulo di elasticità erano 250 MPa e 15 GPa, per la condizione "A" e 600 MPa e 38 GPa per la condizione "B".

3.1.1 Fibra di iuta

La iuta è il nome dato alla fibra estratta dal fusto delle piante appartenenti al genere *Corchorus*, appartenente alla famiglia delle Tiliaceae. Circa quaranta specie di questo genere sono cresciute in tutto il mondo, ma solo le specie *C.capsularis*, ovvero la iuta bianca, e *C.olitorius*, ovvero la iuta tossa, sono coltivate²⁴.

La fibra di iuta è ampiamente utilizzata, oltre a imballaggi in tutto il mondo, come rivestimenti per pavimenti, materiale isolante, protezione del suolo, artigianato, etc. Essa può essere utilizzata come geotessile per applicazioni relative alla stabilizzazione del suolo e controllo dell'erosione²⁵.

La coltivazione della iuta è molto laboriosa, ma richiede comunque una quantità relativamente piccola di altri fattori come, fertilizzanti e pesticidi, e può essere coltivata in piccole aziende agricole. Per questi motivi, la produzione di iuta è

²³ Ochi, 2008.

²⁴ Singh et al., 2011; Rahman, 2010.

²⁵ Graupner e Müssig, 2010.

sempre di più concentrata in Bangladesh, India, Nepal, Cina e Tailandia, che insieme rappresentano oltre il 95% della produzione mondiale. L'India è il più grande produttore e consumatore di iuta al mondo. Il Bangladesh è il secondo principale produttore e principale esportatore di fibre²⁶.

La produzione di fibre di iuta era prevalente lungo il fiume delle Amazzoni, tra Manaus e Santarém, nelle regioni di pianura, dalla fine degli anni '30 ai primi anni '90. Gli immigrati giapponesi introdussero l'usanza di realizzare e utilizzare sacchi di iuta nel sud del Brasile per confezionare merci, principalmente caffè. Il mercato della iuta è crollato nei primi anni '90. Fattori come, i cambiamenti relativi al confezionamento merci, il declino della qualità delle fibre e la rimozione delle tariffe di importazione della iuta, hanno contribuito al suo crollo. Nonostante ciò, l'eredità della iuta è ancora visibile all'interno del panorama culturale e sociale della regione²⁷. La figura 3.3 mostra la pianta da cui viene estratta la fibra di iuta e l'aspetto che la fibra ha dopo essere stata estratta.



(a)



(b)

Figura 3.3 – (a) Pianta da dove viene estratta la fibra di Iuta (Fonte: Alila et al., 2013) e (b) Fibra dopo l'estrazione (Fonte: <http://www.parintins.am.gov.br>).

3.1.2 Fibra di Lino

La fibra di lino si ricava dalla fibratura floematica dello stelo del lino, il *Linum usitatissimum*, pianta appartenente alle Linaceae. La raccolta avviene nel periodo della fioritura e la maturazione del frutto e la fibra mostra diverse caratteristiche a

²⁶ Rahman, 2010.

²⁷ Winklerprins, 2006.

seconda della precocità in cui avviene la mietitura. Quando il fusto è ancora verde si ottiene il cosiddetto *lino azzurro*, una fibra molto sottile, ma scarsamente resistente, per questo utilizzata nella fabbricazione di merletti e ricami. Il *lino bianco*, maggiormente resistente ma meno fine, si ottiene quando il fusto è giallo ed il frutto giallo-verdastro. Infine quando il fusto e il frutto sono scuri, la fibra ottenuta è molto resistente, ma molto grossolana.

Dopo essere stati raccolti, gli steli di lino vengono lasciati ad essiccare, poi a macerare in acqua ed infine vengono battuti al fine di eliminare i residui legnosi, prima di essere filati. Le singole fibre ottenute, hanno forma cilindrica e mostrano un sottile lume al centro²⁸. Il ciclo di coltivazione del lino è breve e dura solo 100 giorni dalla semina in marzo alla raccolta finale nel mese di luglio.

Il più grande produttore ed esportatore del lino in tutto il mondo è il Canada dal 1994, anche Francia, Belgio e Paesi Bassi sono paesi leader nella sua produzione, si incontrano infatti condizioni climatiche piuttosto favorevoli alla coltivazione del lino²⁹. Come il cotone, anche il lino è costituito prevalentemente da cellulosa, la cui struttura però è più cristallina e ordinata e quindi più resistente³⁰.

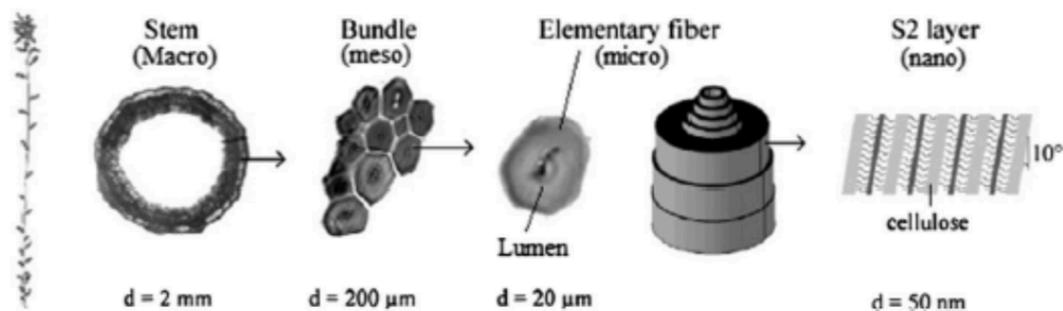


Figura 3. 4 – Struttura del lino dalla pianta alle fibrille di cellulosa (Yan et al., 2014).

La figura 3.4 sovrastante, mostra il lino dalla scala macroscopica a quella microscopica.

²⁸ Caneva et al., 2005.

²⁹ Fabiola Nardon, "Materiali compositi per il rinforzo di strutture in legno: Problemi di durabilità e compatibilità", Università degli studi di Padova, 2014.

³⁰ Fabiola Nardon, "Materiali compositi per il rinforzo di strutture in legno: Problemi di durabilità e compatibilità", Università degli studi di Padova, 2014.

La pianta di lino arriva fino a 90 cm di altezza e lungo tutto il fusto è costituita da forti fibre con diametro medio di 12-16 μm . A livello macroscopico, il gambo di lino è costituito, dall'esterno verso l'interno, da corteccia, floema, xilema e una cavità centrale. La sezione trasversale di un fascio contiene 10-40 fibre collegate tra loro principalmente da pectina. Su scala microscopica, ciascuna fibra elementare è costituita da pareti concentriche, che differiscono le une dalle altre per lo spessore e le componenti costitutive. Al centro della fibra elementare troviamo un piccolo canale aperto chiamato lumen, che contribuisce all'assorbimento dell'acqua. All'esterno vi è una parete cellulare primaria di spessore di 0,2 μm ed internamente una spessa parete cellulare secondaria che è responsabile della resistenza della fibra e racchiude il lumen.

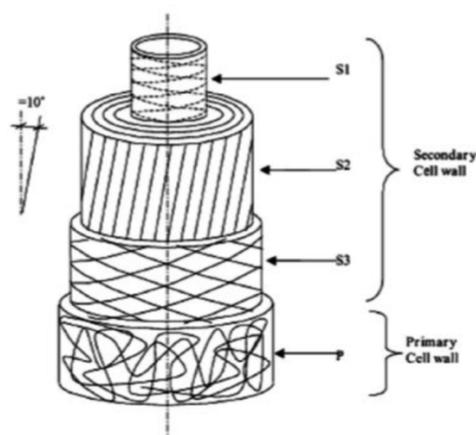


Figura 3. 5 – Micro-struttura di una cellula di fibra di lino (Yan et al., 2014).

La maggior parte della fibra è essenzialmente costituita dallo strato S2 della parete secondaria, composta da microfibrille di cellulosa cristallina ed emicellulosa amorfa orientate a 10° rispetto all'asse della fibra, che forniscono un'elevata resistenza alla trazione, come mostrato in figura 3.5. Una microfibrilla è costituita da catene di cellulosa, che sono zone cristalline, incorporate in una matrice amorfa prevalentemente di pectine ed emicellulose. L'angolo tra l'asse della fibra e le fibrille può influenzare la resistenza del lino³¹.

I principali costituenti delle fibre di lino sono cellulosa, emicellulose, lignina, cera e pectina, in quantità che possono variare. Le prime tre sono le componenti principali,

³¹ Yan et al., 2014.

esse infatti determinano le caratteristiche fisiche proprie del lino. La cellulosa è l'elemento organico della fibra più rigido e solido, ma essendo un polisaccaride semicristallino con una grande quantità di gruppi ossidrilici, esso è responsabile della natura idrofila del lino, comportando così una pessima adesione fibra-matrice nel caso specifico di matrice idrofobica. Le emicellulose sono legate alle catene di cellulosa grazie a legami ad idrogeno e la loro struttura chimica le rende solubili in acqua e favorisce l'igroscopicità della fibra. La lignina e le pectine fungono principalmente da leganti, mentre le cere possono influenzare la bagnabilità e le caratteristiche di adesione delle fibre.

Il lino è ricco di cellulosa, circa il 70% della composizione chimica totale, ma le percentuali dei diversi costituenti possono variare anche significativamente nei diversi materiali. Tali variazioni sono imputabili principalmente alle specie e alla varietà di pianta in questione, ma anche da fattori di coltivazione e produzione delle fibre, esse possono influenzare le proprietà meccaniche e fisiche del prodotto³².

3.1.3 Comportamento meccanico delle fibre naturali

Le proprietà meccaniche delle fibre naturali variano notevolmente e dipendono da fattori quali: diametro della fibra, struttura, grado di polimerizzazione, struttura cristallina, origine in funzione del gambo, la foglia, il frutto e il seme, e le condizioni di crescita. Oltre alle caratteristiche delle fibre, anche il calcolo dell'area e le condizioni di prova possono influire sui risultati. Parametri quali precisione della strumentazione, velocità di deformazione, tipo di impugnatura, lunghezza e flessibilità della macchina sono esempi di fattori che influenzano i risultati di resistenza meccanica³³. La tabella 3.1 presenta valori di riferimento di alcune fibre, comparandole anche con alcune fibre sintetiche tradizionali.

³² Yan et al., 2014.

³³ Thomas et al., 2011, Silva et al., 2008.

Fibra	Densità	Diametro	Resistenza a trazione	Modulo di Young	Allungamento a Rottura
	g/cm ³	µm	Mpa	Gpa	%
Cotone	1.5-1.6	-	287-800	5.5-12.6	7.0-8.0
Iuta	1.45	25-200	393-773	13-26.5	1.16-1.5
Lino	1.50	-	345-1100	27.6	2.7-3.2
Canapa	-	-	690	-	1.6
Ramiè	1.50	-	400-938	61.4-128	1.2-3.8
Sisal	1.45	50-200	468-640	9.4-22.0	3.7
Cocco	1.15	100-450	131-175	4-6	15-40
Fibra vetro	2.5	-	2000-3500	70	2.5
Fibra aramidica	1.4	-	3000-3150	63-67	3.3-3.7
Fibra carbonio	1.7	-	4000	230-240	1.4-1.8

Tabella 3. 1 – Proprietà comparative di alcune fibre naturali con tradizionali fibre sintetiche (Start Innovetion S.r.l).

Defoirdt et al. (2010) hanno studiato la resistenza a trazione delle fibre di cocco, bambù e iuta. I test sono stati eseguiti per diverse lunghezze della fibra al fine di valutarne l'influenza per la resistenza a trazione. Gli autori affermano che il principale costituente responsabile della resistenza a trazione è il contenuto di cellulosa, mentre l'angolo microfibrillare è proporzionale alla capacità della fibra di deformarsi. Il modulo di elasticità è proporzionale al contenuto di cellulosa e inversamente proporzionale all'angolo microfibrillare. Le fibre di iuta hanno un contenuto di cellulosa nell'intervallo di 61-71,5% e un angolo microfibrillare di 8°, che rende la fibra resistente (393-800 MPa), con un alto modulo di elasticità (13-26,15 GPa) e dunque bassa capacità di allungamento a rottura (1,16-1,5 %). Il lino invece ha un angolo microfibrillare che varia da 5 a 10^{o34}, un contenuto di cellulosa che varia tra 70-84%, anche esso ha una bassa capacità di deformazione (2,7-3,2 %) è quindi poco elastico, ha un modulo elevato e maggiore della iuta (27,6 GPa), e una resistenza elevata (345-1500 MPa)³⁵.

Diversi studi sono stati condotti con diverse fibre, con lo scopo di valutare alcuni fattori che influenzano il comportamento meccanico. Tomczak et al. (2007) hanno correlato le proprietà meccaniche delle fibre di curaua con diametro, lunghezza e

³⁴ Carlo Santulli, "Selezione delle fibre vegetali per composite resistenti all'impatto", in *www.academia.edu*, 2014

³⁵ F. P. La Mantia & M. Morreale, Green composites: A brief review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (2011) 579–588. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.01.017>.

velocità di deformazione. Hanno osservato che, per diversi diametri, da 24 a 64 μm , la resistenza alla trazione e il modulo di elasticità diminuivano con l'aumentare del diametro, rispettivamente da 310 MPa a 131 MPa e da 96,1 a 30,0 GPa. Per fibre dello stesso diametro (46 μm), variando le lunghezze tra 5 e 25 mm, con l'aumentare della lunghezza, la resistenza alla trazione diminuisce da 223 a 173 MPa, ed il modulo aumenta da 26,6 a 52,9 GPa. Ciò può essere spiegato dall'aumento dei difetti presenti nelle fibre all'aumentare della loro lunghezza.

Le fibre naturali presentano irregolarità che possono essere associate a difetti che influiscono sulla resistenza. In questo caso maggiore è la lunghezza della fibra, maggiore è la possibilità di incontrarne difetti. Per quanto invece riguarda la velocità di deformazione, fibre con il medesimo diametro di 46 μm e la medesima lunghezza di 20 mm, sottoposte rispettivamente a velocità di 5, 10, 20 e 50 mm/min hanno mostrato un aumento della resistenza alla trazione da 178 a 217 MPa, mantenendo però il modulo invariato con un valore medio di 48,7 GPa, essendovi stato in contemporanea un aumento del tasso di deformazione.

D'Almeida et al. (2006), presentano i risultati dei test meccanici e della composizione chimica della fibra piassava, correlandola con la fibra di cocco. La prima ha mostrato bassi valori di resistenza a trazione (133 MPa) e basso modulo di elasticità (2,9 GPa) rispetto alle fibre come sisal e iuta. Tuttavia, la fibra di piassava presenta proprietà meccaniche paragonabili a quelle della fibra di cocco, che ha una resistenza a trazione tra 106 e 270 MPa e un modulo compreso tra 3 e 6 GPa. I risultati relativi alla composizione chimica hanno mostrato che la fibra piassava ha il 31,6 % di cellulosa e alto contenuto di lignina, il quale può essere responsabile della sua elevata rigidità.

Nella sezione sulla durabilità, viene presentato come il trattamento delle fibre possa influire sul comportamento meccanico delle stesse e del composito. Per quanto riguarda il comportamento meccanico delle fibre, Roy et al. (2012), hanno studiato l'influenza del trattamento alcalino sulla resistenza a trazione della fibra di iuta. Hanno osservato che con l'aumento della concentrazione di idrossido di sodio, c'era una maggiore perdita di massa delle fibre, probabilmente dovuta alla graduale perdita di emicellulosa e lignina. È stato constatato che il trattamento alcalino rompe i legami idrogeno tra i gruppi idrossilici (OH-) della cellulosa e porta alla

defibrillazione, ovvero la rottura del fascio di fibre in fibre più piccole, aumentandone così l'area superficiale effettiva. La resistenza della fibra a trazione è aumentata rispetto alla fibra non trattata ed è aumentata la sua deformabilità.

3.2 Compositi rinforzati con fibre

I compositi rinforzati con fibre rappresentano una soluzione praticabile per rafforzare e migliorare gli elementi strutturali esistenti. Tra questi, i compositi in polimero rinforzato con fibra (FRP) hanno guadagnato grande popolarità negli ultimi decenni grazie alla loro facilità di installazione, all'elevato rapporto resistenza/peso e al tempo di indurimento relativamente limitato. Tuttavia, l'uso di leganti organici nei compositi in FRP è responsabile di alcuni inconvenienti, quali scarse prestazioni a temperature relativamente elevate, scarsa compatibilità con substrati come murature, formazione di barriere al vapore e difficoltà di applicazione su superfici bagnate. Per ovviare a questi problemi, i leganti organici, in combinazione con fogli di fibre continue, sono stati sostituiti con quelli inorganici, in combinazione con griglie di fibre, per formare una nuova generazione di materiali compositi ad alta resistenza ad alte temperature e una migliore compatibilità con substrati di cemento e muratura. Le matrici a base di malta, infatti, presentano una significativa resistenza al calore, consentono la permeabilità al vapore, possono essere applicate a basse temperature o su superfici bagnate, hanno una migliore compatibilità con i substrati in muratura e consentono la reversibilità degli interventi. Quest'ultimo è di grande importanza in caso di rafforzamento delle strutture storiche.

Nomi diversi sono stati proposti per descrivere questi materiali compositi rinforzati con fibre inorganiche: Textile Reinced Concrete (TRC) è un termine usato per descrivere materiali compositi, che originariamente erano intesi come elementi da integrare in nuove applicazioni civili anziché essere utilizzati come mezzo di rinforzo per strutture esistenti, che comprende strati sottili di calcestruzzo rinforzata con tessuti ad alta resistenza. Il termine "Textile Reinforced Mortar" (TRM) descrive essenzialmente lo stesso tipo di compositi a matrice inorganica con un campo primario di applicazione nel rinforzo di strutture esistenti seguendo il metodo di posa a umido. Il termine "Fabric Reinced Cementitious Matrix" (FRCM), descrive invece materiali compositi costituiti da una sequenza di uno o più strati di matrice

cementizia rinforzati appunto con fibre secche sotto forma di maglie aperte a strato singolo o multiplo. Il termine “Steel Reinforced Grout” (SRG), descrive i materiali compositi comprendenti corde di acciaio formate da fili di acciaio intrecciati incorporati in una matrice cementizia³⁶.

I materiali di malta cementizia fibrorinforzata si stanno diffondendo come tecnica di rinforzo alternativa all’uso tradizionale dei sistemi di polimero rinforzato esternamente, per elementi strutturali e non strutturali di edifici civili e industriali³⁷.

Essi rappresentano un innovativo sistema di retrofitting comprendente un tessuto in fibra incorporato in una matrice inorganica. Il rinforzo potrebbe essere fabbricato con diversi tipi di tessuti (ad es. Carbonio, vetro, basalto, aramide, PBO, acciaio e fibra vegetale) solitamente sotto forma di filati continui disposti in modo tale da formare griglie con differenti geometrie. I fasci di fibra disposti in due direzioni ortogonali forniscono l’interblocco meccanico necessario tra il rinforzo ovvero la griglia o tessuto e la rilegatura ovvero la malta che sporge attraverso le aperture della griglia stessa, garantendo un’adeguata azione composita. Inoltre, nel caso dell’utilizzo di fibre secche, le caratteristiche del legame matrice-rinforzo sono ulteriormente migliorate dall’eventuale penetrazione della pasta di malta nei fasci³⁸.

I seguenti compositi, quindi, quando applicati a substrati in muratura, sono preferibili ai sistemi di rinforzo FRP per la loro maggiore compatibilità con il substrato, la reversibilità, la permeabilità al vapore, una migliore resistenza alle alte temperature e la durata contro agenti nocivi. Inoltre, la trasmissione delle tensioni tra matrici e maglie è uno dei requisiti principali da considerare nonché l’adattabilità geometrica della rete e la sua stabilità chimica, ovvero durata, all’interno della matrice³⁹.

Le modalità di guasto dei sistemi compositi, potrebbero essere diverse e influenzare le proprietà geometriche e meccaniche della griglia e della matrice⁴⁰. Quando infatti la matrice della struttura dell’interfaccia e la connessione matrice-fibra funzionano correttamente, si può osservare un guasto a causa dell’esaurimento della resistenza a trazione della rete⁴¹.

³⁶ D’Antino, 2017.

³⁷ Bilotta et al, 2017.

³⁸ Leone, 2017.

³⁹ Mercedes et al, 2018.

⁴⁰ Carozzi, 2017.

⁴¹ Mercedes et al, 2018.

A base di cemento o a base di calce, le malte utilizzate come collante sono più compatibili con i substrati in muratura rispetto agli adesivi epossidici e la configurazione a “griglia” del rinforzo è molto adatta per l’applicazione su elementi bidimensionali, come pareti in muratura, volte e cupole.

Negli ultimi anni sono stati condotti numerosi studi relativi a questi tipi di sistemi di rinforzo esterni che hanno lo scopo di ridurre la vulnerabilità sismica delle strutture esistenti.

Test sperimentali, simulando azioni sismiche, hanno mostrato chiaramente che gli elementi in muratura rinforzati possono ottenere miglioramenti significativi sia in termini di resistenza che di duttilità.

Le prestazioni dei seguenti sistemi non dipendono solo dal tipo di fibre, ma anche dalla geometria di rinforzo, ovvero singoli cavi o cavi intrecciati per creare una griglia, spaziatura più o meno densa della rete nelle direzioni di trama e ordito, numero di strati sovrapposti, presenza di preimpregnazione delle fibre e altro. Due fattori, come la rugosità delle singole corde, nonché la composizione della matrice organica, possono influenzare fortemente la compatibilità tra griglia e matrice, che è fondamentale per il comportamento dell’interfaccia. Come ulteriore variabile che influenza le prestazioni dei sistemi FRCM-TMR, vale la pena notare che le miscele della matrice inorganica possono essere molto variabili. In alcuni casi vengono aggiunte all’impasto fibre corte per migliorare sia la resistenza alla trazione della matrice, sia il suo comportamento di “irrigidimento della tensione” dopo la rottura. Inoltre, le prestazioni eterogenee delle malte a base di cemento o calce si riflettono in una maggiore dispersione del comportamento meccanico dell’intero sistema⁴².

Le caratteristiche di basso costo, bassa densità, riciclabilità e biodegradabilità delle fibre vegetali, le rendono un’alternativa sostenibile alle fibre sintetiche comunemente utilizzate in questo tipo di compositi. In termini di capacità di resistenza, l’uso di queste fibre è limitato dalle loro basse proprietà meccaniche rispetto a quelle sintetiche. Tuttavia, il basso costo e la bassa densità delle fibre vegetali consentono di utilizzarne un volume maggiore. Pertanto, esiste una sfida nello sviluppo di materiali compositi con proprietà meccaniche paragonabili a quelli realizzati in fibre sintetiche.

⁴² Bilotta et al, 2017.

Uno studio pubblicato da Wambua et al, in cui le proprietà meccaniche dei compositi di fibre naturali su matrice organica si confrontano favorevolmente con le proprietà corrispondenti ai compositi di fibre di vetro, è un esempio delle possibilità delle fibre vegetali.

D'altro canto, l'origine organica delle fibre vegetali favorisce il loro degrado nell'ambiente delle composizioni a matrice cementizia a causa dei cicli di alcalinità e umidità elevati. Alla luce di questo inconveniente, alcuni autori hanno studiato la fattibilità dell'applicazione di trattamenti per evitare il degrado delle fibre. Uno di questi trattamenti è il rivestimento di fibre con una resina. Esso influisce sulla sostenibilità, per il relativo costo e la tossicità, delle fibre vegetali. Tuttavia, al giorno d'oggi, il rivestimento su maglie commerciali da utilizzare nei compositi FRCM è una tecnica ampiamente utilizzata. In alcuni casi, ciò evita il degrado delle fibre all'interno della matrice cementizia e, in altri casi, migliora le proprietà meccaniche e il legame delle maglie con la matrice.

Per le maglie di fibre vegetali, l'uso di un rivestimento è giustificato, per la sostituzione di fibre sintetiche, dalla protezione della fibra in una matrice cementizia aggressiva e dal miglioramento dell'interazione meccanica tra matrice e fibra. Sebbene l'uso della resina per ricoprire le fibre non sia rispettoso dell'ambiente, la proposta sostituzione delle fibre sintetiche con le fibre vegetali è un passo avanti in questa linea.

Al giorno d'oggi, ci sono alcuni studi che analizzano il comportamento delle fibre vegetali all'interno dei compositi FRCM prive di rivestimento. Questi studi dimostrano il grande potenziale delle fibre vegetali come rinforzo. Uno di questi è stato presentato da Menna et al., che, con l'obiettivo di utilizzare le fibre vegetali con la migliore efficienza all'interno di un FRCM con maglie di canapa impregnate di resina epossidica, ha aumentato la resistenza al taglio di un fattore 2-3 nel caso di pareti in muratura di tufo e di circa 5 nel caso di muratura di argilla. Tuttavia, l'influenza dei rivestimenti in resina su altri filati di fibre vegetali e l'effetto sui compositi FRCM fabbricati richiedono studi più approfonditi⁴³.

Sono stati effettuati numerosi studi anche relativi a compositi FRCM e TRM rinforzati con fibre naturali, i quali sono stati caratterizzati prevalentemente da prove

⁴³ Mercedes et al, 2018.

di trazione e di estrazione o pull out. Essi hanno restituito buoni risultati in termini di prestazioni meccaniche dei composti, con rottura a trazione dopo uno sviluppo uniforme delle fessure a trazione lungo gli strati di malta⁴⁴.

Alcuni studi relativi ai sistemi composti di malta rinforzata con tessuto di origine naturale sono nati dall'intenzione di migliorare la sostenibilità di questi sistemi composti, data la grande capacità in termini di proprietà fisiche, meccaniche e termiche delle fibre.

Lo studio condotto da G. Ferrara e E. Martinelli (2019), mette alla luce le caratteristiche prestazionali di composti ottenuti incorporando tessuti di lino in una malta a base di calce idraulica testati a tensione in diverse frazioni di volume di fibra. Lo studio ha dimostrato che il sistema composito TMR rinforzato mediante fibre vegetali rappresenta una tecnica promettente nel campo dell'ingegneria civile in termini di materiali innovativi e più sostenibili, nonostante siano necessari ulteriori studi relativi alla compatibilità tra il tessuto naturale e la matrice affinché possa essere migliorata l'aderenza sulla superficie di interfaccia fibra-matrice⁴⁵.

⁴⁴ Ghiassi et al, 2015.

⁴⁵ G.Ferrara, E.Martinelli, 2019.

CAPITOLO 4

Programma sperimentale: Materiali e Metodologia

4.1 Matrice cementizia

4.1.1 Progettazione

Il caso studio ha avuto inizio con la progettazione della malta. Si è scelto di non utilizzare una classica malta di cemento industrializzata presente in commercio, piuttosto si è preferito svilupparne una differente utilizzando materiali provenienti da scarti e destinati allo smaltimento, affinché la malta potesse essere definita *eco-friendly*.

Nello specifico, il metacaolino (MK) è stato utilizzato come aggiunta pozzolanica, il quale si ottiene a 650°C calcinando un caolino commerciale. Il caolino è una roccia clastica o dentritica coerente prevalentemente costituita da caolinite, un minerale silicatico delle argille. Il caolino ha un aspetto terroso, è piuttosto tenero ed è prodotto dall'azione dell'acqua meteorica sul feldspato. Nel caso specifico si è utilizzato un metacaolino color rossastro arancio a causa della presenza di ossidi di ferro derivato da *Metacaulim do Brasil Industria e commercio Ltda*. Esso è un materiale ecologico, infatti è caratterizzato da basse temperature di calcinazione, è atossico ovvero non è costituito da nessun additivo chimico e per il seguente motivo esso viene associato alla bioedilizia.

Un secondo materiale utilizzato nella produzione della malta è la cenere volante. Questa risulta essere un sottoprodotto della combustione di carbone polverizzato proveniente dalle centrali termoelettriche. Esse sono costituite da silice, allumina e ossido di ferro, tutti composti che reagiscono a temperatura ambiente con la calce generando prodotti di idratazione del tutto simili a quelli che si ottengono durante l'idratazione del cemento Portland, pertanto esse hanno un comportamento pozzolanico. Grazie al loro contributo fisico e chimico le ceneri volanti garantiscono calcestruzzi e malte più compatti, impermeabili e duraturi nel tempo.

Le ceneri volanti dunque prendono parte alla reazione di idratazione del cemento, l'utilizzo di questo materiale in sostituzione ad una parte di cemento garantisce numerosi vantaggi come: minor sviluppo di calore durante l'idratazione poiché nella miscela è presente una più bassa percentuale di composti del cemento quali ad esempio alluminato tricalcico o silicato tricalcico; si ha una maggiore impermeabilità, poiché viene prodotto un minor tenore di idrossido di calcio che può essere dilavato, divenendo causa di porosità nella matrice cementizia; maggiore fluidità dell'impasto fresco e pertanto rapporti a/c più bassi, alla fine si ottiene una maggiore resistenza meccanica del composto. Nel caso specifico si è utilizzata una cenere volante silicica prodotta da POZOFLY.

Il cemento che è stato utilizzato nella progettazione della malta è il cemento di Mauá CP II F32, prodotto da *Lafarge Holcim*.

La distribuzione delle dimensioni delle particelle di cemento, cenere volante e metacaolino è stata ottenuta in precedenza tramite laser di granulometria Malvem con il macchinario MasterSizer 2000, la quale mi è stata gentilmente fornita. Il funzionamento di questo macchinario si basa sulla diffusione della luce, dove viene misurata la distanza degli angoli di diffrazione del raggio laser che viene messo in relazione con i diametri delle particelle. Tramite un disperdente in cui il materiale non è solubile, avviene la separazione dell'agglomerato di particelle, così da evitare errori nella misura. Per il metacaolino e la cenere volante è stata utilizzata l'acqua come disperdente, per il cemento è stato utilizzato l'etanolo assoluto. La figura seguente mostra le curve delle dimensioni dei grani di questi materiali.

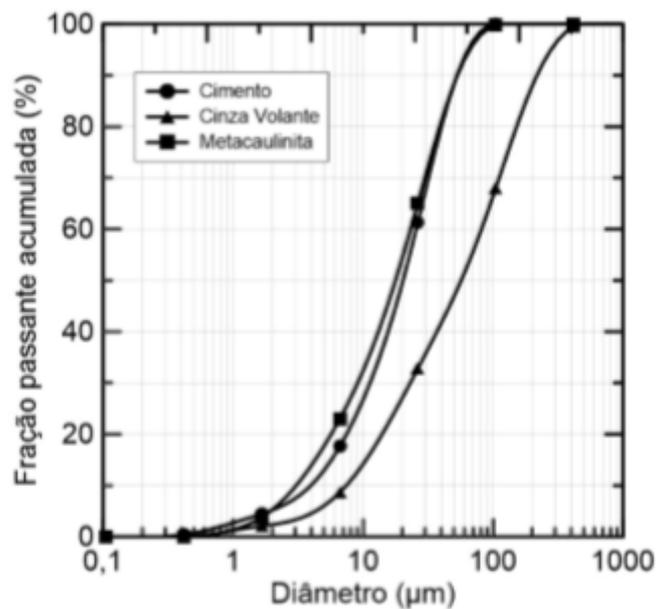


Figura 4. 1 – Dimensione dei grani dei materiali componenti la malta.

Dalla figura si può osservare che le curve delle dimensioni dei grani relativamente alla cenere volante e al metacaolino sono molto simili, ma la cenere volante presenta grani più grandi rispetto agli altri materiali. Le dimensioni delle particelle variano da 0,35 µm a 400 µm. La tabella mostra i diametri D10, D50 e D90 dei materiali cementizi, che sono definiti come le dimensioni delle particelle al di sotto delle quali sono rispettivamente il 10%, 50% e il 90% della massa del materiale.

Diámetro	Cemento (µm)	Cinza Volante (µm)	Metacaulinita (µm)
D10	7,2	7,4	3,1
D50	20,3	56,8	17,7
D90	52,7	217,3	53,0

Tabella 4. 1 – Diametro del materiale cementizio.

Un ulteriore materiale cementizio che è stato introdotto successivamente, come vedremo, per incrementare la lavorabilità della malta, è la calce. La calce sappiamo essere un materiale utilizzato da sempre nelle costruzioni, esso si ottiene cuocendo in forno ad una temperatura di circa 1000°C le rocce calcaree. Dopo la cottura la calce

viva viene sottoposta ad un processo di idratazione per il quale esse diventa calce idrata o spenta, diventando così utilizzabile nel settore edile.

4.1.1.1 Sabbia

Per quanto concerne la componente relativa agli inerti fini è stata utilizzata una sabbia naturale di fiume, proveniente dal comune di Maricà/RJ, con granulometria rispettivamente di diametro di 1,18 mm. Si è proceduto quindi al setacciamento della stessa prima di iniziare la procedura iterativa per valutare la miscela più idonea alla realizzazione del composito e le relative percentuali dei materiali costituenti.

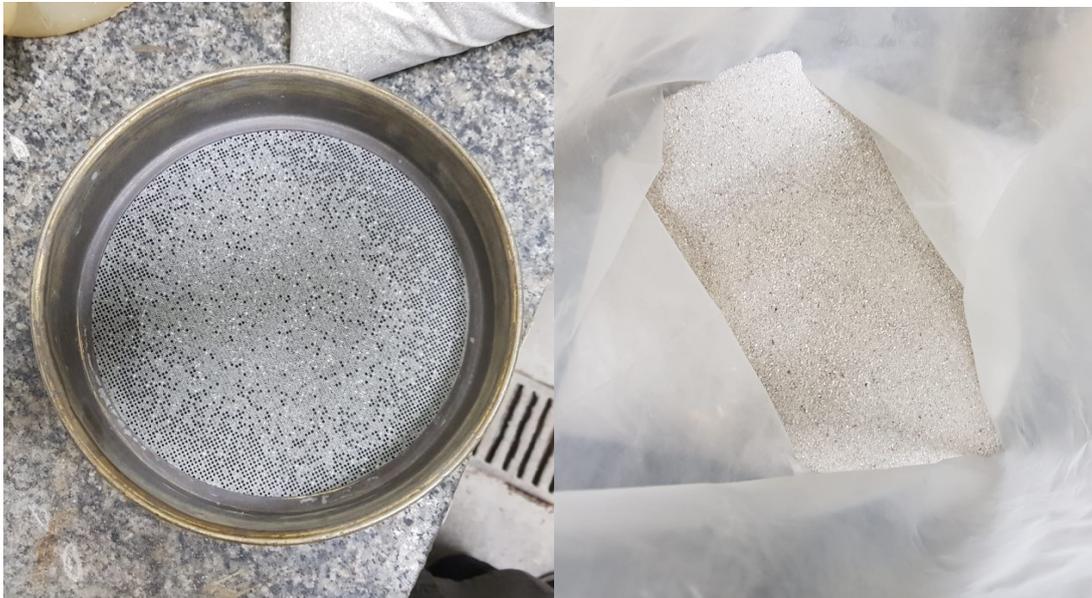


Figura 4. 2 – Setaccio della sabbia.

4.1.1.2 Additivo chimico

Alla mistura è stato inoltre aggiunto un additivo chimico, ovvero un superfluidificante *Glenium 51*, costituito da etere policarbossilico, prodotto da BASF. Esso è costituito da solidi per una percentuale di 28,5-31,5%, un PH di 5-7 e densità di circa 1,067-1,107 g/cm³ (fornita dal produttore). Il suo utilizzo ha avuto lo scopo di promuovere la coesione tra il rinforzo e la matrice e di rendere maggiormente fluido l'impasto.

4.1.1.3 Procedimento di realizzazione della malta

La preparazione dei campioni è stata eseguita in camera climatica ($21\pm 1^\circ\text{C}$) con il miscelatore da 20 litri presente in laboratorio, munito di tre velocità (125, 220, 450 rpm).

Si è proceduto con il metodo di miscelazione e stampaggio di OLIVEIRA (2015), che ha prodotto i compositi SHCC rinforzati con fibre PVA. Essendo sensibile a qualsiasi modifica della procedura di miscelazione, è importante che essa venga eseguita con criterio rispettando tutti i singoli passaggi. Il tempo totale di miscelazione è di 8,5 minuti ed è caratterizzato dalla seguente sequenza di passaggi:

- Tutti gli ingredienti solidi della matrice ovvero cemento, metacaolino, cenere volante, calce e sabbia sono stati omogeneizzati per 30 secondi ad una velocità 1 del miscelatore (125rpm), dopo bagnatura della ciotola e la lama di miscelazione;
- Tutta l'acqua è stata aggiunta alla miscela per 30 secondi a velocità 1 del miscelatore (125rpm);
- È stato aggiunto il 50% del totale superfluidificante in 60 secondi alla velocità 2 del miscelatore (220rpm);
- È stato aggiunto il resto del superfluidificante in 30 secondi alla velocità 1 del miscelatore (125 rpm);
- Tutti i materiali sono stati miscelati per 60 secondi alla velocità 2 del miscelatore (220rpm);
- Stop della procedura di miscelazione per un tempo di 60 secondi per permettere la pulizia della ciotola del miscelatore e della pala che movimentata la miscela;
- Mescolamento del composto per 60 secondi alla velocità 1 del miscelatore (125rpm);
- Stop di 60 secondi per la procedura di pulitura della ciotola del miscelatore e della relativa pala;
- Infine si è miscelato per un'ultima volta il composto per 120 secondi alla velocità 2 del miscelatore (220rpm), per permettere una migliore omogeneizzazione della miscela.

Dopo la procedura di miscelazione, il materiale risultante è stato inserito nei corpi di prova. Quest'ultimi sono poi stati fatti vibrare su un tavolo vibrante per 30 secondi per migliorare l'omogeneizzazione del composto all'interno dei corpi di prova stessi.

4.1.1.4 *Quantità del materiale*

Per quanto riguarda il dosaggio dell'impasto si è proceduto per tentativi, attraverso un processo iterativo che è stato caratterizzato dalla iniziale valutazione dell'impasto e quindi la sua più o meno buona omogeneità, successivamente si è proceduto con il test di *Spandimento tronco conico* (cono di Abrams) per valutare la deformazione dell'impasto sotto l'azione del proprio peso quando viene privato del recipiente che lo sostiene, e quindi la sua fluidità e compattezza e successivamente si è proceduto con la valutazione della presa verticale in una parete.

Prima di individuare la malta che meglio poteva adempiere al compito a cui è stata destinata, sono stati effettuati 17 tentativi diversi. Inizialmente si è proceduto con la valutazione di una prima malta caratterizzata da un buon contenuto di sabbia, costituita da cemento, metacaolino e cenere volante rispettivamente con e senza super-fluidificante, la seguente è risultata poco omogenea e segregata a causa del basso contenuto d'acqua. Allora si è deciso di variare il contenuto d'acqua e altresì diminuire la frazione di sabbia, si è ottenuto così un composto molto più omogeneo ma troppo fluido per la sua applicabilità verticale alla parete.

Infine si è deciso di addizionare calce per migliorare la lavorabilità del composto e diminuire ulteriormente il contenuto di sabbia, ottenendo così una malta con una buona lavorabilità, facilmente applicabile alla parete, che potesse asserire anche al compito di malta destinata alla realizzazione della muratura, essendo il laterizio del tipo pieno e non forato. Infine si è fatto sì che la resistenza della malta restasse entro un certo valore massimo, affinché non si perdesse la compatibilità con la fibra.

L'ultimo tentativo, che ha caratterizzato la fine del processo iterativo di progettazione della malta, è stato caratterizzato da una malta con rapporto 1:3:0,68.

Dove rispettivamente:

- 1 equivale alla frazione di materiale cementizio presente, che nel caso in questione è caratterizzato dal 35% di cemento, 35% di metacaolino, 15% di cenere volante e 15% di calce;

- 3 equivale alla frazione di sabbia presente, avente diametro di 1,18 mm;
- 0,68 rappresenta il rapporto tra acqua e materiale cementizio.

Al composto è stato aggiunto inoltre 0.75% di super-fluidificante per incrementare la coesione dell'impasto.



Figura 4. 3 – Miscela.



Figura 4. 4 – Spandimento della malta.

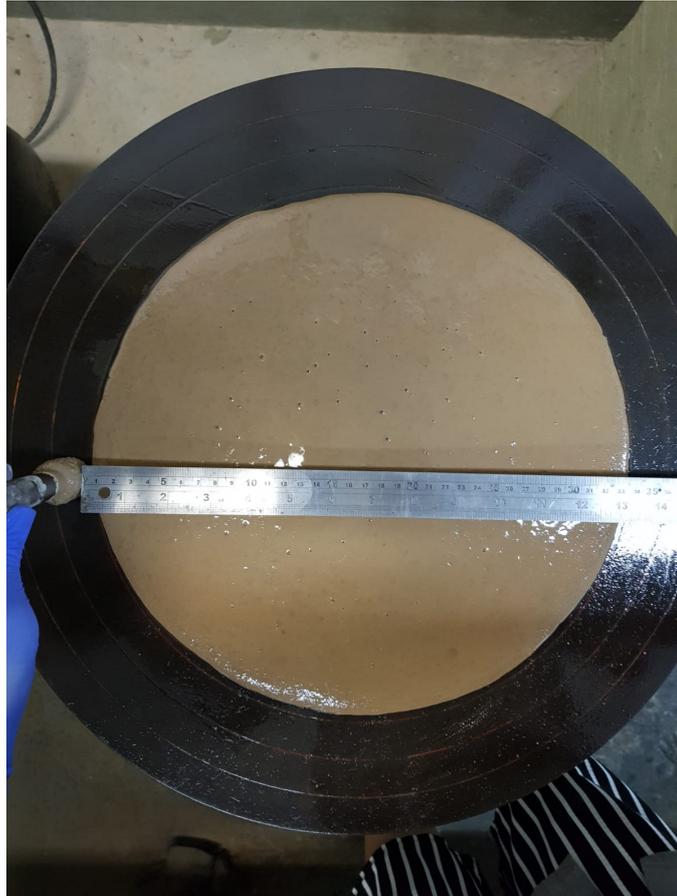


Figura 4. 5 – Diametro di spandimento.

L'impasto è risultato omogeneo e coeso, lo spandimento della malta ha fornito un diametro di 335 mm e all'applicazione sulla parete ha dimostrato una buona lavorabilità.

4.1.2 Test di compressione

4.1.2.1 Test di compressione 14 e 28 giorni

Per la determinazione della resistenza della malta in esame è stato necessario effettuare un test di compressione a 14 giorni di stagionatura e successivamente a 28 giorni di maturazione.

Sono stati quindi realizzati 14 provini cilindrici di diametro di 50 mm e altezza di 100 mm.



Figura 4. 6 – Miscela per il test.



Figura 4. 7 – Riempimento dei corpi di prova.

Dopo lo stampaggio, i campioni sono stati conservati per 48 ore dentro i corpi di prova, protetti dalle perdite di umidità, in una stanza a temperatura controllata di $21\pm 1^{\circ}\text{C}$ e protetti da una coperta. I campioni sono poi stati sformati ovvero sfilati dai relativi stampi dopo 2 giorni e sono stati collocati in una camera umida dove sono rimasti a riposare per 14 giorni 7 di loro e 28 giorni i restanti.

Per il test di compressione si è fatto riferimento alla norma *NBR 8522 (2008)* *NBR 5739 (2007)* lo stesso per il calcolo del modulo elastico.

Inizialmente i corpi di prova sono stati sottoposti a pulitura, grazie all'aiuto di un tornio, affinché le loro superfici risultassero regolarizzate e uniformi prima dell'applicazione del carico durante la prova di compressione, la regolarizzazione della superficie evita la concentrazione di tensioni sulle facce del campione.

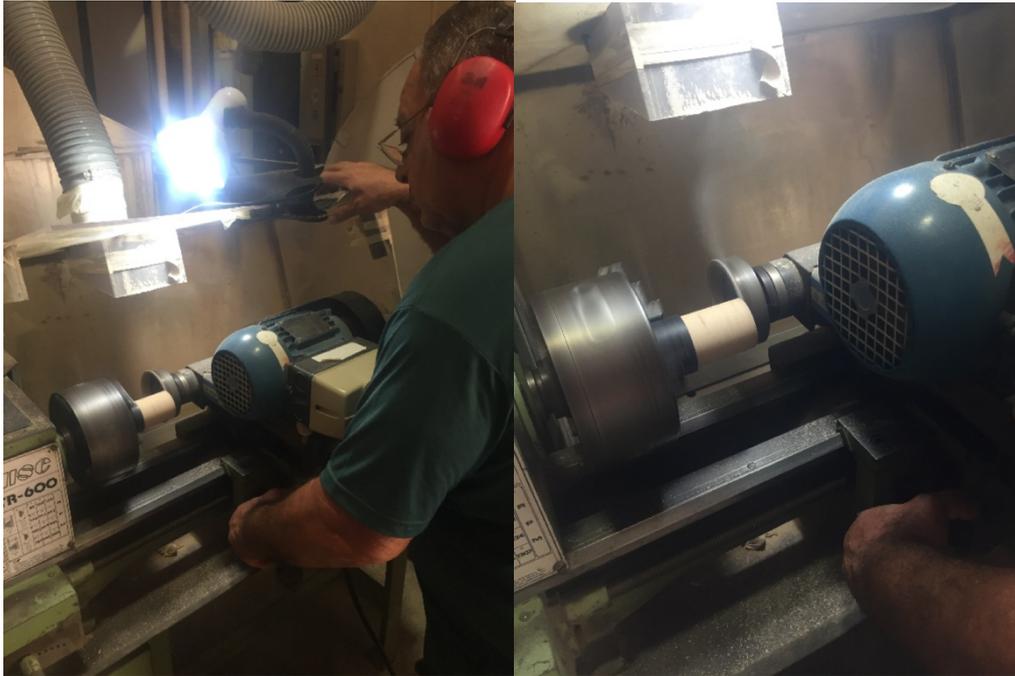


Figura 4. 8 – Torno per la pulizia dei corpi di prova.

Successivamente i provini sono stati inseriti all'interno della macchina, una Shimadzu UH-F, con un carico massimo di 1000 kN per dare inizio alla prova. La velocità assiale di prova è stata 0.3 mm/min. Gli spostamenti sono stati misurati da tre sensori LVDT accoppiati con anelli metallici posizionati nella regione centrale del campione con una corsa di 5.0 mm. Il valore di spostamento è stato ottenuto facendo la media dei valori registrati dai due LVDT.

I dati di carico e spostamento assiale sono stati ottenuti attraverso un sistema di acquisizione dati costituito da condizionatore ADS 2000 da 16 bit e un software AQDados versione 07:02:08 da società Lynx.

Il test di compressione con 14 giorni di maturazione dei corpi di prova è stato effettuato per 7 campioni cilindrici delle dimensioni di 50 mm di diametro e 100 mm di altezza.



Figura 4. 9 – Shimadzu UH-F.



Figura 4. 10 – Set up della prova di compressione della malta.



Figura 4. 11 – Provino sottoposto alla prova di compressione.

La prova ha avuto termine con la rottura dei provini.



Figura 4. 12 – Macchina di prova per il test di compressione.

4.1.2.2 Risultato del test di compressione

Si è ottenuta così la resistenza a compressione dall'equazione (1) e il modulo di elasticità è stato ottenuto secondo la norma relativa, mediante l'equazione (2).

$$\sigma = \frac{S}{A} \quad (1)$$

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (2)$$

Dove σ è la tensione di compressione, S è il carico applicato, A è l'area di sezione del provino, E è il modulo di elasticità, σ_2 è la tensione di compressione corrispondente al 40% del carico finale, σ_1 è la tensione corrispondente alla deformazione assiale di $5 \cdot 10^{-5}$, ε_2 è la deformazione assiale prodotta dalla tensione σ_2 e infine ε_1 è una deformazione assiale corrispondente a $5 \cdot 10^{-5}$.

La prova di compressione a 14 giorni, di stagionatura della malta esaminata, ha determinato una resistenza massima media relativa ai 7 campioni di circa 19.4 MPa.



Figura 4. 13 – 7 cilindri dopo il test di compressione a 14 giorni di maturazione.

Nei successivi 14 giorni è stato effettuato il test di compressione per 7 cilindri della medesima dimensione in questo caso con un tempo di stagionatura di 28 giorni. Si è eseguita la medesima procedura come descritto dalla normativa norma *NBR 8522 (2008) - NBR 5739 (2007)*. Di seguito si riportano i valori risultanti, le immagini relative al test e una comparazione dei due test a differenti giorni di maturazione.



Figura 4. 14 – 7 cilindri sottoposti al test di compressione a 28 giorni di maturazione.

Test di compressione	Forza	Sforzo	Deformazione	Modulo elastico
	[kN]	[Mpa]	[%]	[Gpa]
14 giorni	38,00	19,35	0,018	5,16
28 giorni	39,25	19,99	0,016	6,02

Tabella 4. 2 – Valori relativi alla prova di compressione per 14 e 28 giorni di maturazione.

Si riportano di seguito dei grafici relativi alla comparazione tra la resistenza e il modulo elastico della malta in esame nel caso di 14 giorni di stagionatura e 28 giorni rispettivamente.

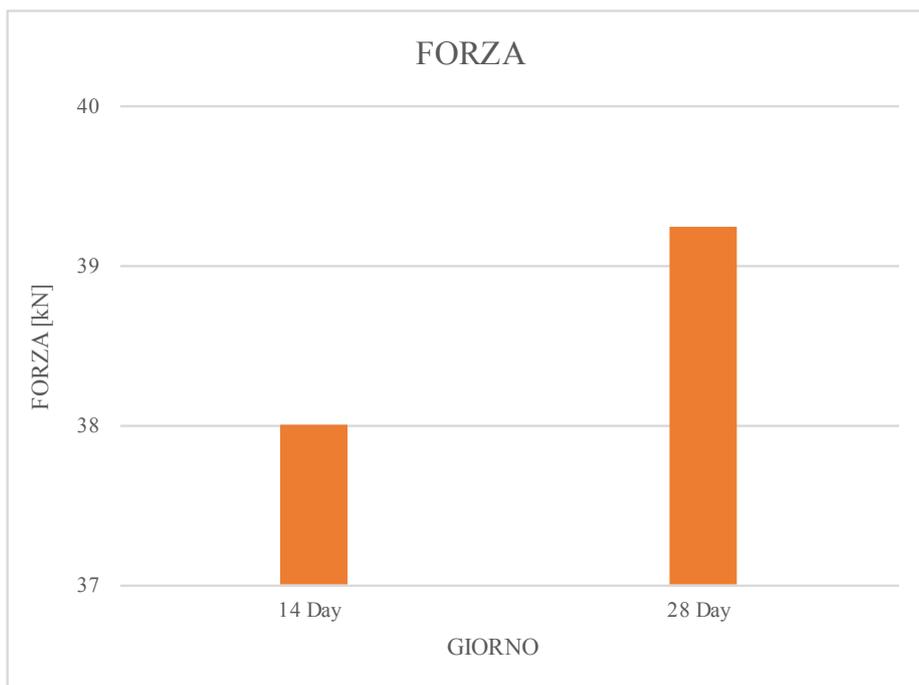


Figura 4. 15 – Grafico relativo alla forza massima a 14 e 28 giorni di maturazione.

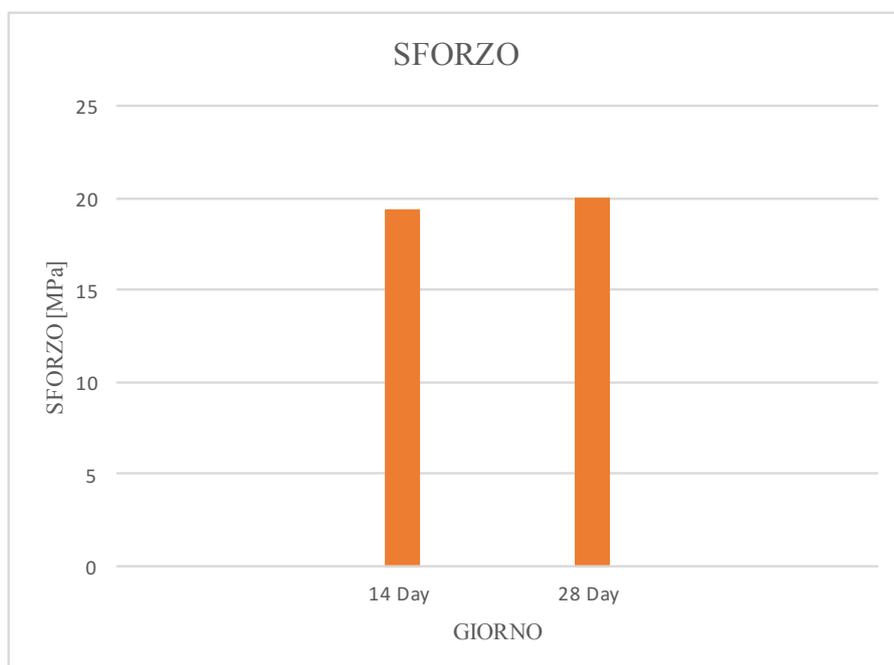


Figura 4. 16 – Grafico relativo allo sforzo massimo a 14 e 28 giorni di maturazione.

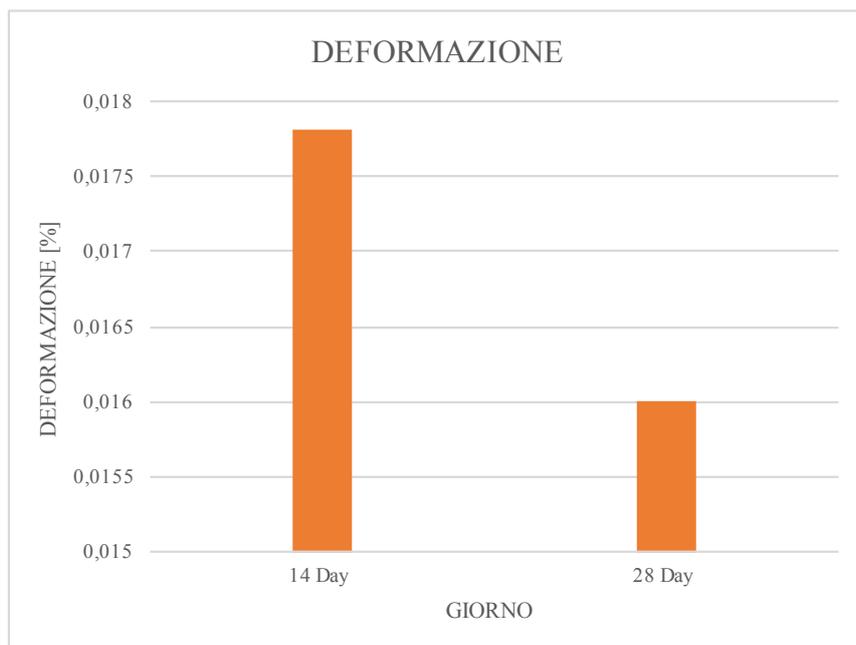


Figura 4. 17 – Grafico relativo alla deformazione a 14 e 28 giorni di maturazione.



Figura 4. 18 – Grafico relativo al modulo elastico a 14 e 28 giorni di maturazione.

4.1.3 Test di flessione

Per quanto riguarda il test di flessione, si è effettuato un test a 6 campioni di forma parallelepipedica di dimensioni di sezione di 4 cm x 4 cm e una lunghezza di 16 cm.

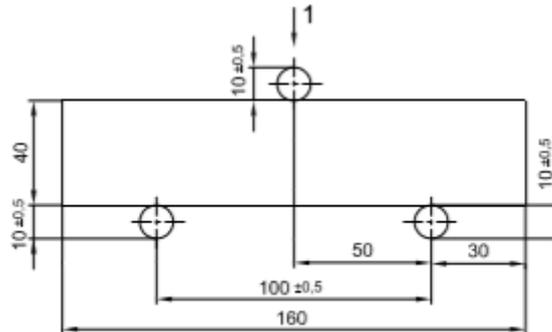


Figura 4. 19 – Dimensioni del corpo di prova per il test di flessione.

Il test di flessione è stato effettuato su tre punti seguendo le direttive della norma Italiana UNI EN 1015-11:2011. Si è utilizzata una macchina di prova universale Shimadzu AGX 100 kN. La cella di carico utilizzata nel test di flessione è stata di 50kN, la velocità di 0.3 mm/min e il posizionamento del provino è riportato nell'immagine precedente. Gli spostamenti sono stati misurati da un LVDT posizionato nel mezzo dello spazio. Le immagini seguenti mostrano la configurazione della prova di flessione.



Figura 4. 20 – Macchina di prova per la flessione.



Figura 4. 21 – Prova di flessione.

4.1.3.1 Risultati del test di flessione

Il calcolo della resistenza a flessione s , è stato effettuato seguendo la formula riportata nella normativa relativa.

$$s = 1,5 \cdot \frac{Sl}{bd^2}$$

Dove s rappresenta la resistenza a flessione in MPa, l è la lunghezza del provino, b e d sono le rispettive due dimensioni della sezione trasversale in millimetri e infine S è la forza massima in kN.



Figura 4. 22 – Corpo di prova sottoposto al test di flessione a 14 giorni di maturazione.



Figura 4. 23 – Corpo di prova sottoposto al test di flessione a 28 giorni di maturazione.

Di seguito si riportano i risultati della prova di flessione della malta.

Provino	Altezza	Lunghezza	Larghezza	Carico di rottura	Spostamento di rottura	Resistenza a flessione
	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[mm]	[Mpa]
1	40	160	40	1950,96	0,84	4,57
2	40	160	40	1951,92	0,66	4,57
3	40	160	40	1924,32	0,69	4,51
			Media	1942,40	0,73	4,55
			Deviazione standard	15,66	0,10	0,04

Tabella 4. 3 – Risultato del test di flessione della malta con maturazione di 28 giorni.

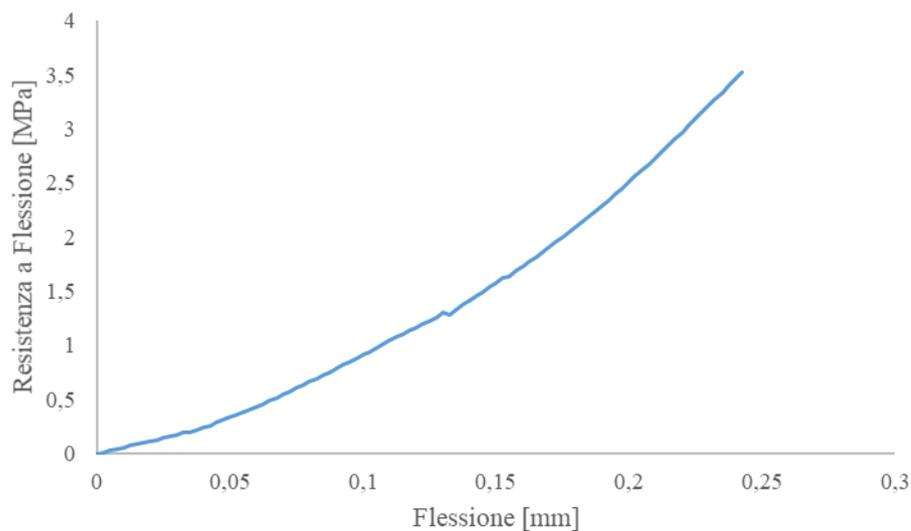


Figura 4. 24 – Diagramma relativo alla resistenza a flessione media in funzione della flessione dei provini di malta.

4.1.4 Caratterizzazione chimica della matrice

4.1.4.1 TG/DTG

Per la caratterizzazione chimica si è preparata una miscela costituita dalla componente di natura cementizia ovvero cemento, metacaolino, cenere volante e calce, in perfetta proporzione con acqua affinché si potessero realizzare tre piccole bustine di plastica nelle quali inserire almeno 5 grammi di miscela. Queste bustine sono state poi testate tramite TG/DTG ovvero *thermogravimetric analysis* (analisi termogravimetrica) e *thermogravimetric analysis derivate* (analisi termogravimetrica derivata) a 14, 30 e 60 giorni di maturazione.

L'analisi termogravimetrica è una tecnica sperimentale di caratterizzazione dei materiali rientrante nella più ampia famiglia dell'analisi termica. La tecnica consiste nella misurazione continua nel tempo della variazione di massa di un campione di materiale in funzione del tempo stesso (isoterma) o della temperatura, in condizioni di atmosfera controllata, inerte, riducente od ossidante. Il risultato di tale analisi, generalmente indicato con Termogramma o Curva di Decomposizione Termica, è un grafico nel quale viene riportata la variazione di peso nell'asse *y*, in valore assoluto o percentuale, in funzione del tempo o della temperatura che si trovano nell'asse *x*. Ulteriori informazioni per un'analisi maggiormente dettagliata e approfondita, si possono ricavare dalla *derivata* del suddetto segnale, rispetto alla grandezza di interesse tempo o temperatura rispettivamente.



Figura 4. 25 – Miscela di materiale cementizio.

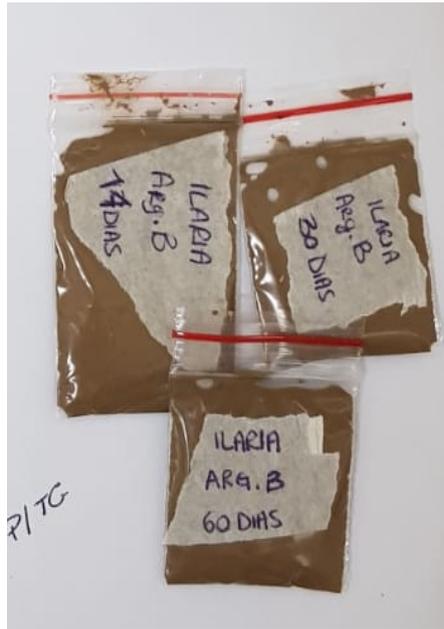


Figura 4. 26 – Suddivisione del materiale per età della miscela.

Si riportano di seguito i risultati dell'analisi termogravimetrica rispettivamente per 14, 30 e 60 giorni.

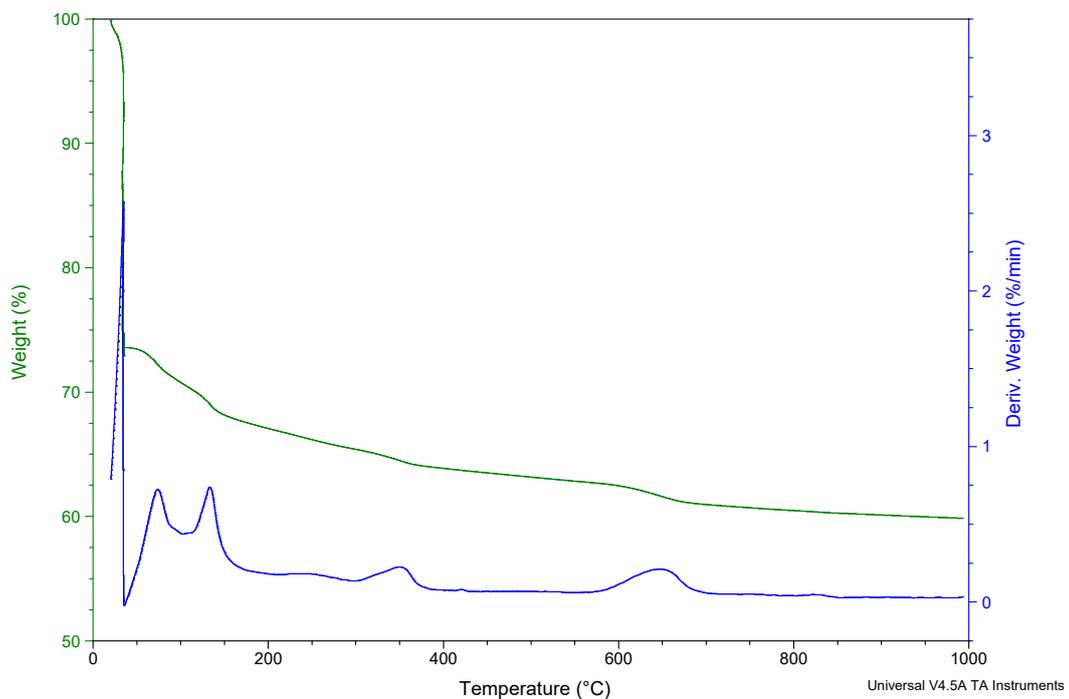


Figura 4. 27 – Analisi termogravimetrica della pasta cementizia all'età di 14 giorni.

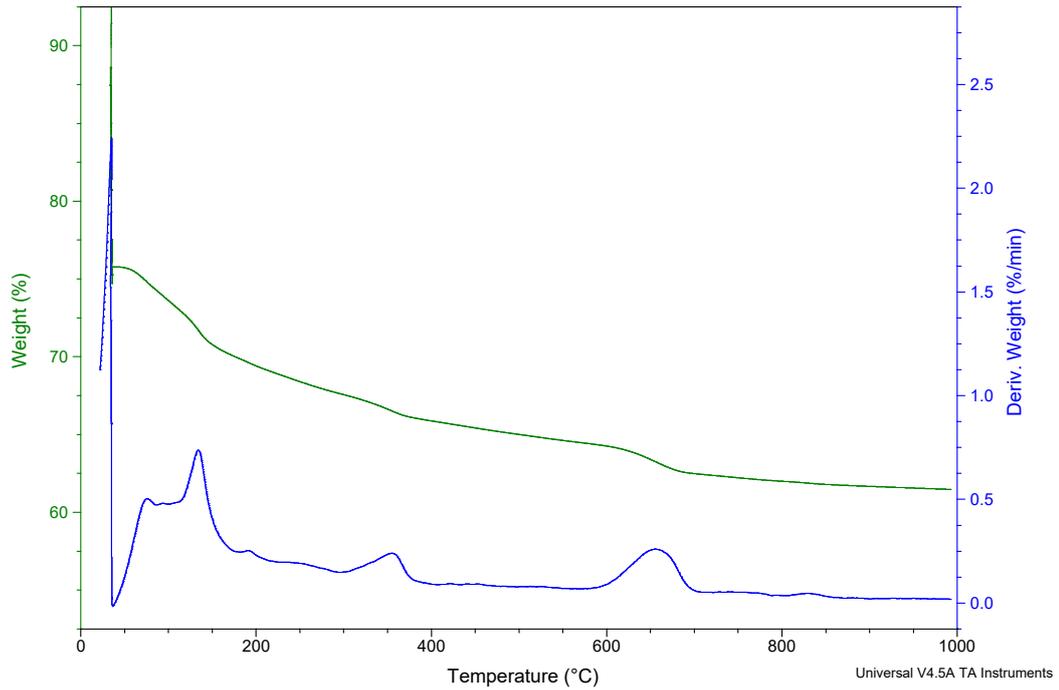


Figura 4. 28 – Analisi termogravimetrica della pasta cementizia all’età di 30 giorni.

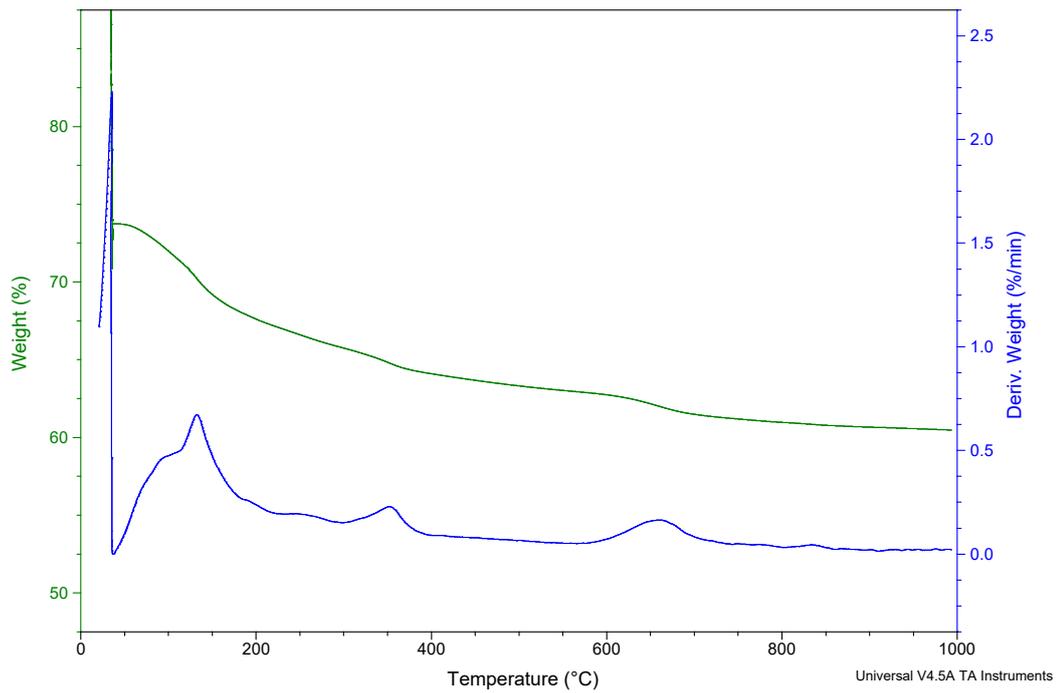


Figura 4. 29 – Analisi termogravimetrica della pasta cementizia all’età di 60 giorni.

Come è possibile constatare dai tre grafici relativi a tempi di maturazione differenti, si ha, con relative variazioni, una fase di disidratazione nel caso dei silicati idrati di calcio (C-S-H), tra 50 e 100 °C e la formazione di ettringite

($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$) tra 100 e 180 °C che può influenzare il grado di durabilità. Un altro prodotto che risulta dall'idratazione del silicato bicalcico e dal silicato tricalcico del cemento è la portlandite che si forma tra 300 e 400 °C. Infine si ha formazione di carbonato di calcio tra le temperature di 550 e 780 °C.

4.2 Fibra di Iuta

4.2.1 Descrizione della fibra

La iuta si ricava dalla corteccia macerata di piante di diverse specie del genere *Corchorus capsularis* e da *Corchorus olitorius*. La fibra è contenuta nella proporzione del 4-8% della massa della pianta verde.

Le piante, dopo la raccolta, vengono sottoposte alla macerazione; esse, liberate dai corpi estranei, sono lavate ed essiccate e inviate alle presse, dove vengono composte in balle di massa e volume uniformi e quindi agli iutifici per le successive lavorazioni. La fibra di iuta analizzata nel seguente elaborato proviene dalla regione Amazonica ed è caratterizzata da una densità di 0,53 g/m³.

4.2.1.1 Lavaggio e trattamento in soluzione alcalina della fibra di iuta

Prima della caratterizzazione, per rimuovere residui e impurità, le fibre sono state lavate e immerse in acqua calda (80°C) per tre ore, in accordo col procedimento utilizzato da FERREIRA (2016), seguita da almeno cinque ore di essiccazione a 40°C. La temperatura di 80°C non danneggia la fibra, poiché la decomposizione delle emicellulose avviene tra 200°C e 300°C e la degradazione della cellulosa e della lignina si verifica tra 400°C e 500°C⁴⁶.

Successivamente una parte delle fibre e del tessuto di iuta è stato sottoposto a trattamento alcalino, ovvero le fibre sono state immerse in soluzione alcalina satura di idrossido di calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) con acqua, 0.73% in volume, per 50 minuti e successive 24 ore di essiccazione in una camera a flusso d'aria forzata a 40°C⁴⁷.

⁴⁶ Araújo et al., 2008.

⁴⁷ Ferreira, 2016.



Figura 4. 30 – Trattamento della fibra di iuta in soluzione alcalina.

La fibra di iuta, dopo essere stata lavata e quindi aver perso le sue impurità, è stata sottoposta al trattamento alcalino. Dalla letteratura è possibile dedurre che il materiale depositato sulla superficie della fibra trattata in soluzione alcalina sono cristalli di idrossido di calcio di dimensioni diverse, derivanti dall'elevata affinità con l'idrossido di calcio che la fibra stessa possiede⁴⁸.

I periodi di immersione compresi tra 30 e 60 minuti, in basse concentrazioni di alcali (0,5-1%) non degradano la fibra naturale⁴⁹.

Si è osservato che il trattamento alcalino tende a promuovere la chiusura dei lumi, e la formazione di una crosta nello strato esterno della parete della fibra. Questo strato formatosi si contrappone facilmente agli altri strati della sezione trasversale. La fibra di iuta presenta una buona interazione con l'idrossido di calcio⁵⁰.

Dai risultati termogravimetrici è risultato che, dopo il trattamento alcalino, è stata osservata una rimozione parziale dei costituenti delle fibre, principalmente lignina ed emicellulosa. Per la fibra di iuta, inoltre, si è osservato una riduzione del picco di lignina e la presenza di un picco di carbonato, ciò è dovuto al fatto che sulla superficie della fibra è presente carbonato di calcio a causa della sua affinità con il

⁴⁸ Ferreira, 2016.

⁴⁹ Saha P, Manna S, Chowdhury SR, Sen R, Roy D, Adhikari B, 2010.

⁵⁰ Ferreira, 2016.

carbonato di calcio (CaCO_3)⁵¹. Secondo la letteratura, le fibre di iuta trattate in soluzioni alcaline presentano una maggiore resistenza a trazione. Questo potrebbe essere dovuto alla migliore interazione tra le strutture di cellulosa o al migliore allineamento di fibrille e cellule di fibre che promuove un allungamento regolare e una distribuzione di stress comune nella sezione trasversale⁵².

La ragione dell'incremento della resistenza a trazione e dell'allungamento è la rimozione di materiali non cellulonici e impurezze, che si trovano nella regione interfibrillare delle fibre stesse. Dopo il trattamento con alcali a bassa concentrazione, le fibrille diventano più capaci di riorganizzarsi lungo le direzioni di deformazione a trazione poiché la regione interfibrillare si presenta meno densa e meno rigida a causa della rimozione delle emicellulose⁵³.

La figura 4.3 mostra un esempio di degradazione della fibra naturale in presenza di soluzione alcalina.

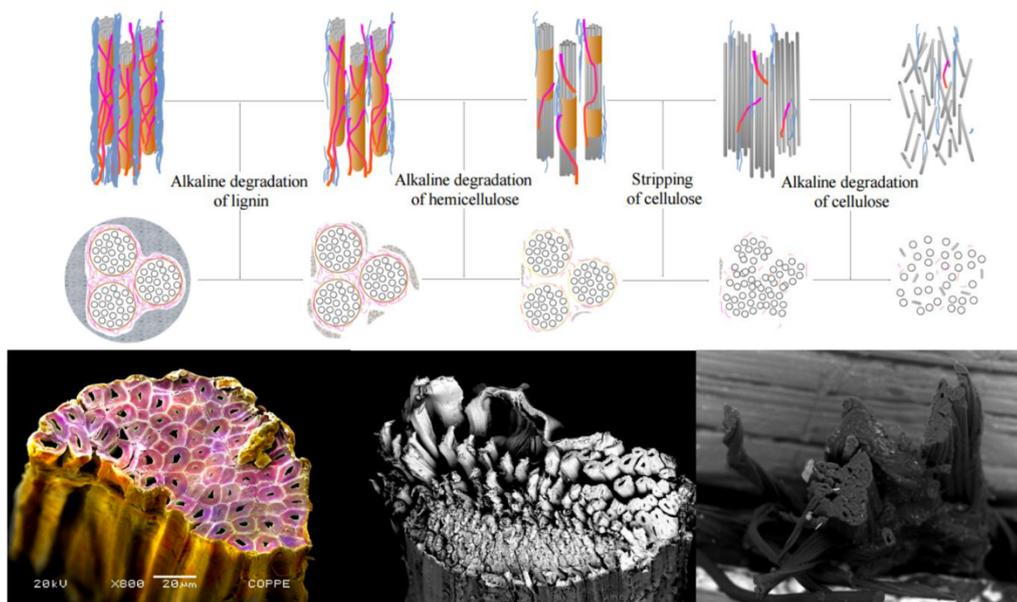


Figura 4. 31 – Illustrazione schematica della degradazione della fibra naturale in presenza di soluzione alcalina⁵⁴.

⁵¹ Ferreira, 2016.

⁵² Ferreira, 2016.

⁵³ Kundu SP, Chakraborty S, Roy A, Adhikari B, Majumber SB, 2012.

⁵⁴ C. M. O. Müller et al., 2009.

Secondo l'immagine, la degradazione della fibra in soluzione alcalina presenta una sequenza di degradazione della lignina, dell'emicellulosa ed infine della cellulosa⁵⁵. Essendo la cellulosa il polimero che conferisce principalmente resistenza meccanica, la rimozione degli altri elementi lignocellulosici può trasformare la fibra in un materiale più rigido. A seconda, infatti, di questa rimozione, diverse connessioni tra questi elementi possono essere interrotte tali da determinare una diminuzione delle proprietà meccaniche⁵⁶. In conclusione, si può affermare che le fibre naturali dopo i trattamenti alcalini mostrano una riduzione dei loro composti chimici come le emicellulose e la lignina, la cristallinità della cellulosa rimane invariata⁵⁷. Secondo le immagini SEM riportate da *Ferreira* (2016), il trattamento alcalino ha determinato un allineamento delle microfibre della iuta, giustificando così l'aumento delle proprietà meccaniche della fibra.

Un altro fattore importante nel caso del trattamento alcalino, è il comportamento della fibra a contatto con la matrice di base cementizia e la loro relativa adesione che risulta essere principalmente regolata da aspetti chimico-fisici presenti tra la matrice e la fibra stessa.

La fibra di iuta presenta una buona interazione chimica con la matrice a base cementizia, questa può essere riferita ad una quantità elevata di prodotti di idratazione presenti nella fibra stessa⁵⁸. *Fimbel e Siffert (1986)*, menzionarono un'interazione tra cellulosa e calcite (carbonato di calcio) con la cellulosa. La loro ricerca mostra che il carbonato di calcio può essere rapidamente assorbito dalla superficie della cellulosa. Nel caso dell'idrossido di calcio invece, *Torre et al. (1992)*, menzionarono che l'interazione della cellulosa con CaOH_2 era molto debole, ma il calcio poteva essere trattenuto mediante l'adsorbimento di questo polimero del glucosio.

Il problema del ritiro per le fibre è dovuto al fatto che apparentemente esse hanno problemi di presenza di acqua che porta loro a desfibrillarsi. L'acqua infatti, può penetrare nella rete di cellulosa e muoversi nei capillari e negli spazi tra le fibrille, riducendo così le forze che li tengono insieme e diminuendo la loro rigidità. L'acqua,

⁵⁵ Silva et al., 1999.

⁵⁶ Ferreira, 2016.

⁵⁷ Ferreira, 2016.

⁵⁸ Ferreira, 2016.

in questo modo, agisce come plastificante e consente alle molecole di cellulosa di muoversi relativamente⁵⁹. Secondo *Ray e Rout (2005)*, le molecole d'acqua attirano i gruppi idrofili di fibre naturali e reagiscono con i gruppi ossidrilici (-OH) delle molecole di cellulosa per formare legami a idrogeno.

Le fibre sottoposte a trattamento alcalino, mostrano quindi un legame di adesione migliore dovuto all'irrigidimento della struttura polimerica delle cellule presenti nelle fibre. Questo processo risulta essere come un imballaggio delle fibre cellulari dovuto alla formazione di legami idrogeno. Si ha infatti, come conseguenza diretta, la riduzione del lume, e quindi la riduzione della capacità di assorbire acqua e la variazione della dimensione dello stesso. La presenza di CH (composti carbonio-idrogeno) e CC (composti carbonio-carbonio) nella superficie della fibra, indica la formazione di un rivestimento che potrebbe reagire con i prodotti della matrice a base cementizia e promuovere una maggiore adesione meccanica della fibra alla matrice stessa⁶⁰. Il trattamento alcalino porta ad una maggiore cristallinità della fibra che può migliorare anche il comportamento della fibra quando estratta dalla matrice per l'interazione chimica tra il restante idrossido di calcio e il carbonato di calcio presenti sulla superficie della fibra. La soluzione alcalina infatti aumenta la rugosità della superficie esterna della fibra aumentandone la capacità di ancoraggio alla matrice cementizia, ciò è dovuto anche alla presenza di una maggiore quantità di cellulosa e prodotti di calcio sulla superficie stessa.

Il trattamento alcalino, per concludere, ha determinato una riduzione dei composti chimici della fibra, come emicellulose e lignina, provocando una variazione nel comportamento meccanico della fibra e un aumento della cristallinità della cellulosa, promuovendo una riduzione della capacità della fibra di assorbire acqua, che può favorire un incremento nell'adesione fibra-matrice. Si riscontra ulteriormente, un legame fibra-matrice più elevato, che migliora anche il meccanismo di attrito e quindi determinando un comportamento meccanico della fibra migliore in corrispondenza dell'interfaccia della stessa in connessione alla matrice a base cementizia⁶¹.

⁵⁹ Ferreira, 2016.

⁶⁰ Ferreira, 2016.

⁶¹ Ferreira, 2016.

4.2.2 Test di trazione diretta della singola corda di iuta

4.2.2.1 Setup della prova

Ai fini della caratterizzazione meccanica della fibra di iuta, si è proceduto con l'indagine relativa alla sua resistenza a trazione.

Le singole corde di fibra di iuta con una lunghezza di 50 mm, trattate e non trattate sono state sottoposte a un test di trazione diretta. Il corpo di prova è stato realizzato con un foglio di carta che permettesse di prendere in considerazione solo la lunghezza utile e le corde sono state incollate con una colla ad asciugatura rapida su entrambe le estremità.

Dopo essere asciugate, le parti terminali del provino sono state coperte con un nastro metallico in modo tale che l'artiglio del macchinario utilizzato, potesse comprimere la fibra senza rompersi. Il test è stato eseguito a 22 ± 1 °C, seguendo le direttive della norma ASTM-C1557 (2008).

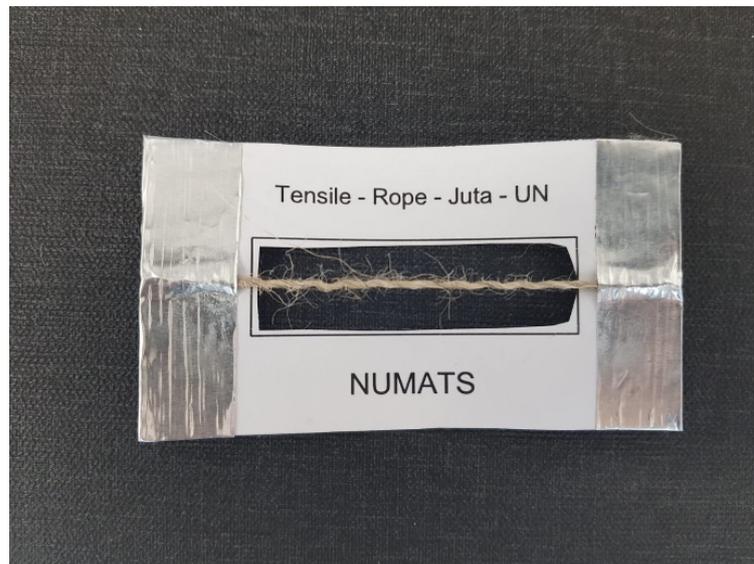


Figura 4. 32 – Corpo di prova del test di trazione della corda di iuta, non trattato.

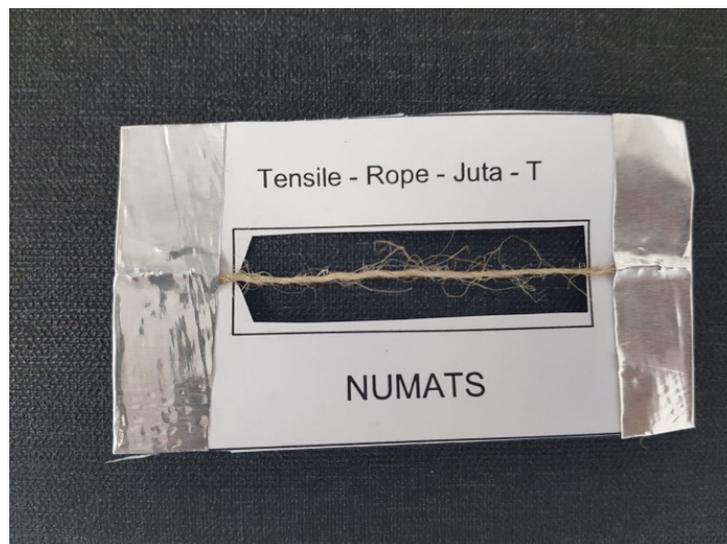


Figura 4. 33 – Corpo di prova del test di trazione della corda di iuta, trattato.

Il test di trazione diretta è stato effettuato con sistema MTS Tytron 250, supportato da un computer per l'acquisizione delle forze applicate e della distensione massima delle singole corde di iuta. La cella di carico utilizzata è di 500 N e la velocità di prova di 4mm/min.

Si è proceduto quindi nell'intrappolare il campione tramite le fauci del macchinario ponendolo nella corretta posizione, dopo di che, si è proceduto con il taglio dello stampo per lasciare libero scorrimento al macchinario. Uno dei due artigli della macchina ha la capacità di muoversi, l'altro si mantiene fermo e in questo modo ogni volta, viene calcolata la forza applicata e come si deforma la singola corda di iuta fino alla rottura.

Determinate le forze massime sopportate dalle corde di iuta sottoposte al test di trazione, si è proceduto con il calcolo della superficie di rottura, per determinarne lo sforzo massimo e le deformazioni, così da generare il diagramma sforzo-deformazione e dunque il modulo di ogni singolo campione.

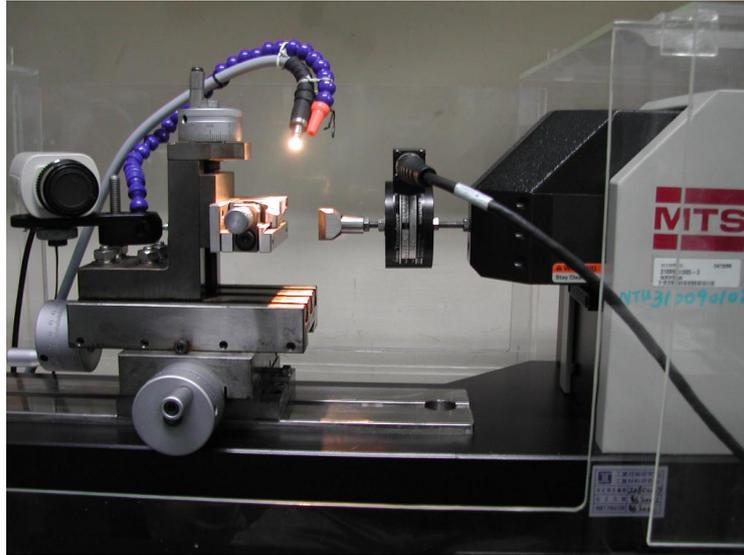


Figura 4. 34 – Macchina MTS Tytron 250.

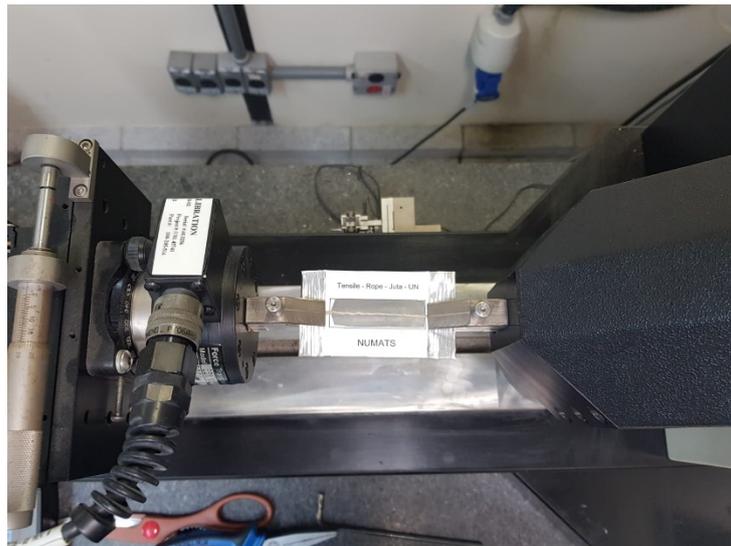


Figura 4. 35 – Corpo di prova del test di trazione della corda di iuta nella fase preliminare al test.

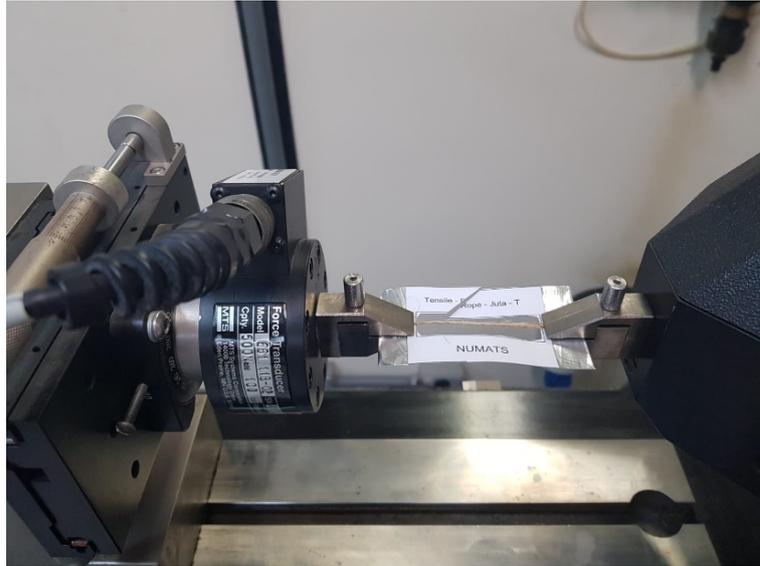


Figura 4.36 – Corpo di prova del test di trazione della corda di iuta durante il test.

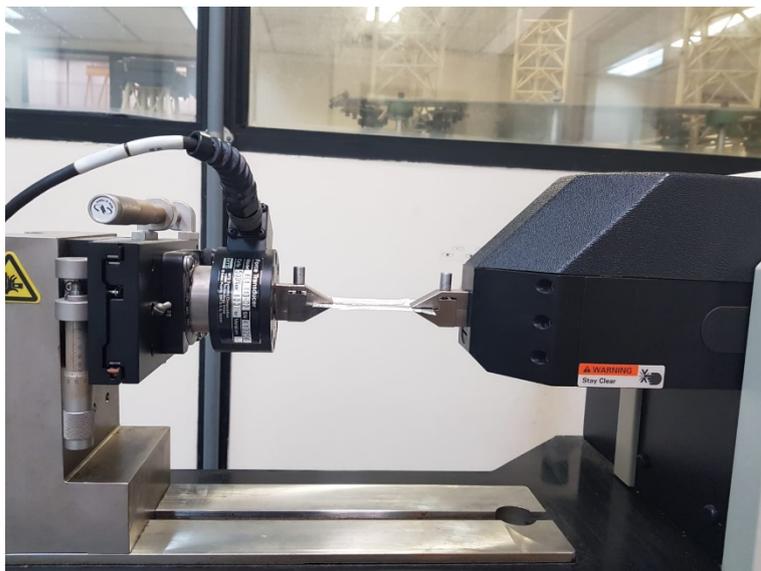


Figura 4.37 – Corpo di prova del test di trazione della corda di iuta durante il test.

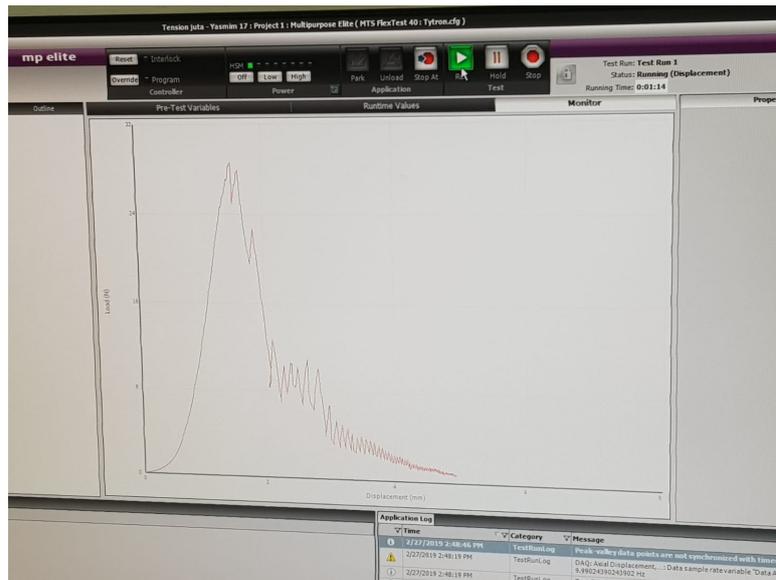


Figura 4.38 – Software utilizzato per la memorizzazione dei dati relativi al test di trazione.

4.2.2.2 SEM–Microscopio elettronico a scansione per la determinazione della sezione trasversale delle corde di iuta

Per valutare la resistenza a trazione di ciascuna fibra e dunque determinarne il modulo, è stato calcolata l'area di ciascuna corda di iuta e dunque la sua sezione trasversale, utilizzando un *Microscopio Elettronico a Scansione TM 3000* del laboratorio di tecniche analitiche del Labest/COPPE/UFRJ con velocità di tensione di 15 kV. Si è proceduto con il lavaggio delle corde di iuta immerse in acqua per almeno 24 ore, seguito da un uguale periodo di asciugatura. Poi si è continuato tagliando accuratamente le corde di iuta con una lama molto affilata affinché si ottenesse una superficie di rottura il più possibile trasversale e liscia ed infine si sono generati dei provini atti ad essere introdotti nel SEM.

Inizialmente si è pensato di utilizzare un software *ImageJ*, per determinare la specifica superficie di rottura, e quindi si sono generati degli anelli intorno ai quali sono stati attaccati trasversalmente alla camera i cordoncini di iuta.



Figura 4. 39 – Corpo di prova del test di trazione della corda di iuta trattata nella fase successiva alla prova.

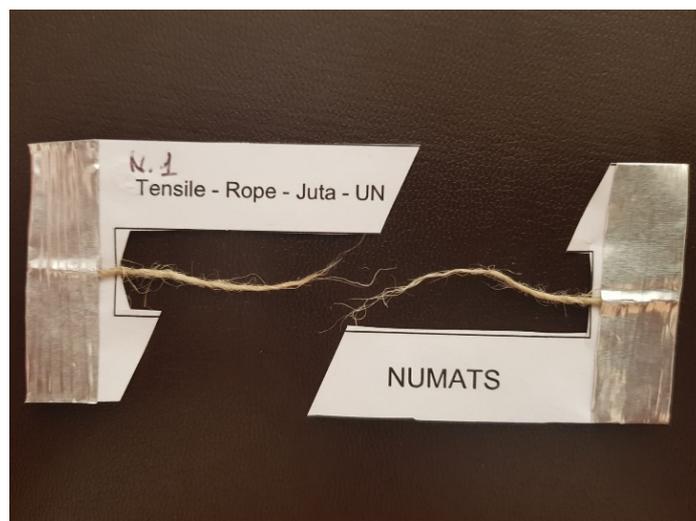


Figura 4. 40 – Corpo di prova del test di trazione della corda di iuta non trattata nella fase successiva alla prova.



Figura 4. 41 – Corpi di prova del test di trazione della corda di iuta durante il lavaggio in acqua.



Figura 4. 42 – Corpi di prova delle corde di iuta per la determinazione dell'area di sezione tramite il SEM.

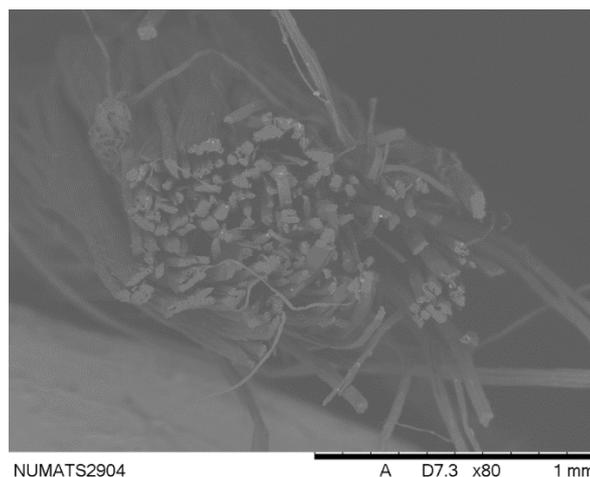


Figura 4. 43 – Immagine al microscopio elettronico a scansione si una corda di iuta.

Ma come è possibile constatare dall'ultima foto la procedura è risultata impossibile a causa della non perfetta compattezza delle singole fibre di iuta costituenti la corda. Dunque si è proceduto con la valutazione della superficie, in maniera approssimata, considerando il diametro delle singole corde e calcolandone l'area, come mostrato nelle figure successive. In particolare si sono ottenuti numerosi risultati e si è proceduto calcolando l'area approssimata di tutti i provini analizzati e di conseguenza lo sforzo massimo sopportato.



Figura 4. 44 – Corpo di prova delle corde di iuta realizzati per il SEM.

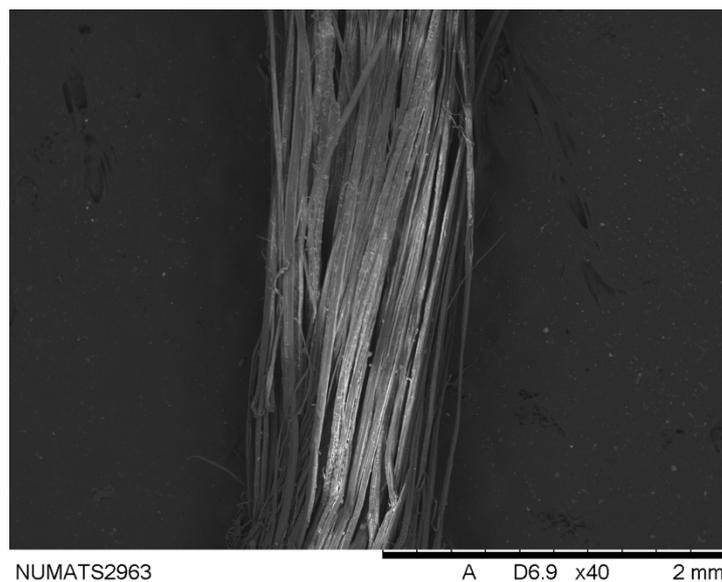


Figura 4. 45 – Immagine al microscopio elettronico a scansione di una corda di iuta per la determinazione del diametro.

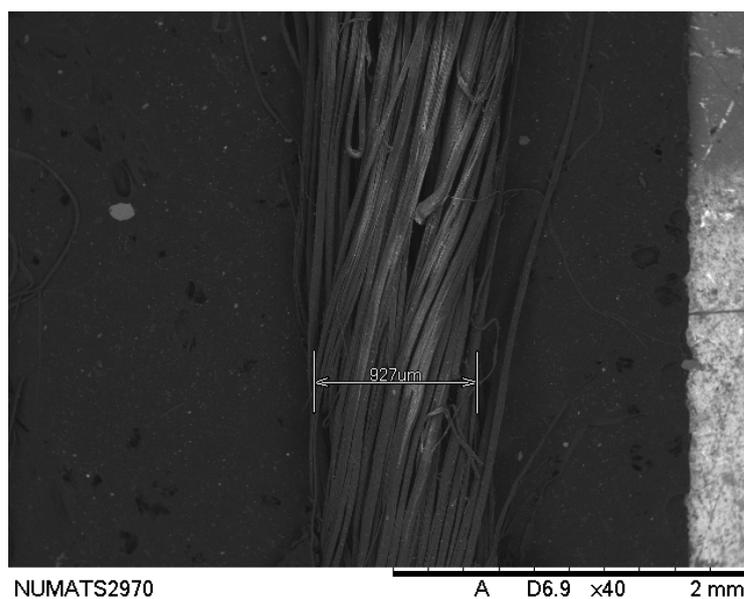


Figura 4. 46 – Immagine al microscopio elettronico a scansione del diametro di una corda di iuta.

Ciò ha permesso di calcolare la sezione trasversale delle corde e quindi lo sforzo massimo e quindi la resistenza a trazione. Le formule utilizzate sono state:

$$\sigma_{max} = \frac{S_{max}}{A} [MPa];$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} [\%];$$

$$E = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} [MPa];$$

Dove σ_{max} è la tensione di rottura della fibra, s_{max} è la forza massima applicata fino alla rottura della fibra, σ_1 è il 40 % della carica massima e ε_1 è la deformazione corrispondente allo sforzo σ_1 .

4.2.2.3 Risultato e diagramma sforzo-deformazione delle corde di iuta

Dal calcolo si è ottenuta un'area media delle corde di iuta di 0,74 mm² per le corde non trattate e di 0,64 mm² per quelle trattate. Si sono quindi definiti i diagrammi forza-spostamento e sforzo-deformazione e si è presa in considerazione come resistenza della corda la resistenza media tra le massime resistenze registrate per ogni corda, ovvero lo sforzo massimo al quale le corde possono essere sottoposte senza giungere a rottura, escludendo i valori troppo lontani dalla media.

Si riportano di seguito i grafici carica-spostamento di 6 provini sottoposti a trazione diretta nel caso di corda di iuta non trattata e trattata. Il valore di sforzo-deformazione si riporta in tabella come valore approssimato, essendo il calcolo dell'area, appunto, effettuato in maniera approssimata.

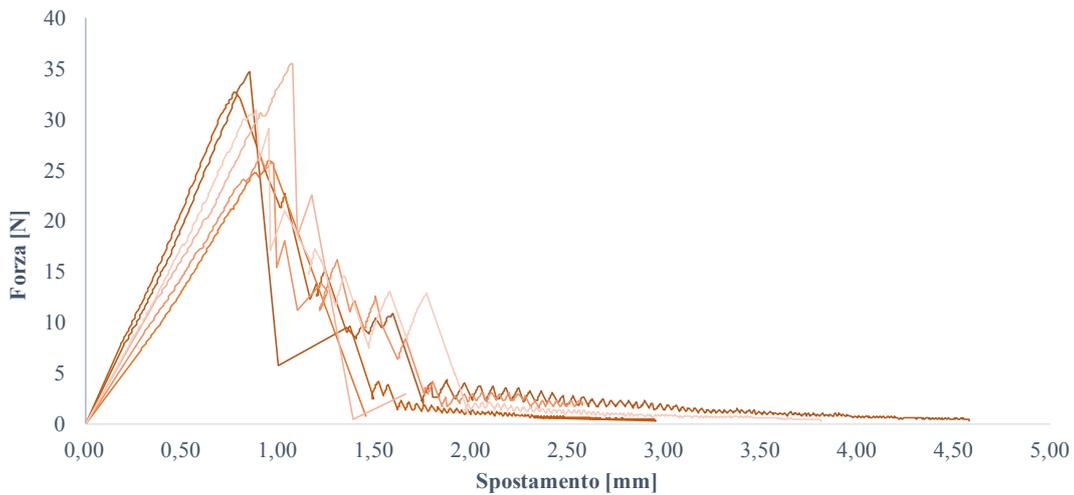


Figura 4. 47 – Diagramma Forza-Spostamento relativo a 6 provini di corda di iuta non trattata sottoposti a trazione diretta.

Si riporta di seguito il grafico del provino che più risulta essere vicino al valor medio relativo a tutte le corse.

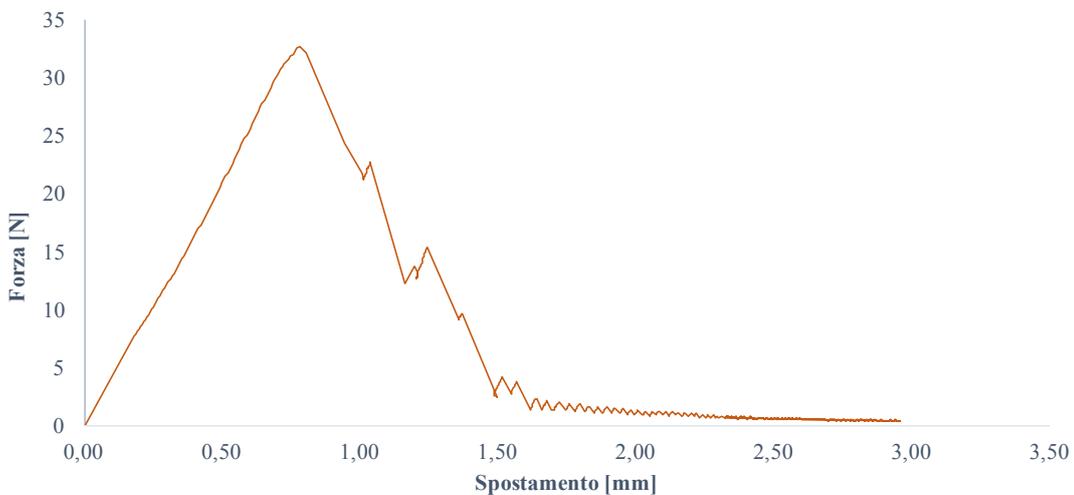


Figura 4. 48 – Diagramma Forza-Spostamento in trazione diretta, della corda di iuta non trattata più prossima al valor medio.

Si riporta di seguito l'andamento della corda di iuta trattata.

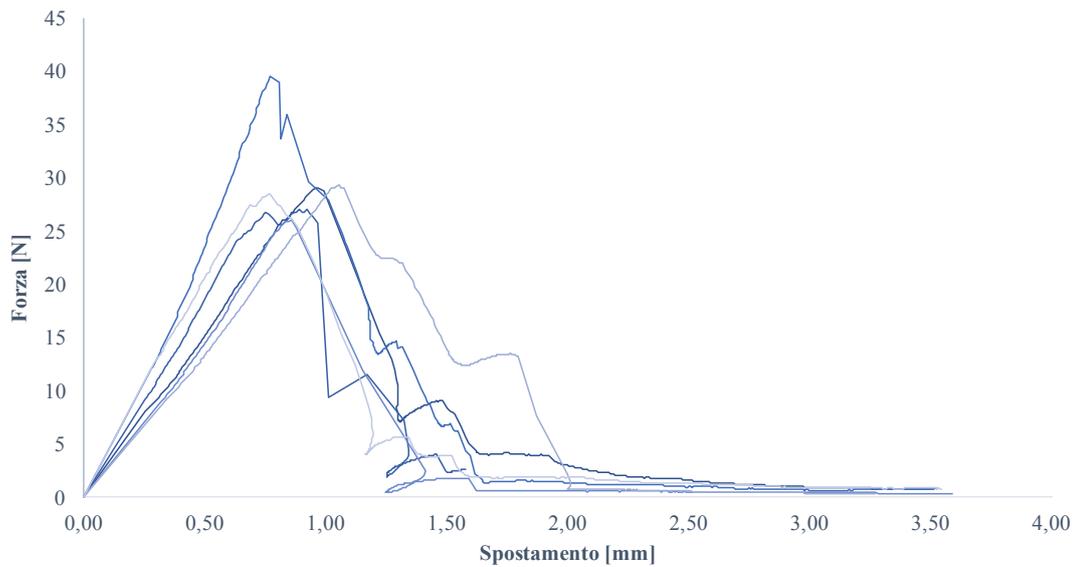


Figura 4. 49 - Diagramma Forza-Spostamento relativo a 6 provini di corda di iuta trattata sottoposti a trazione diretta.

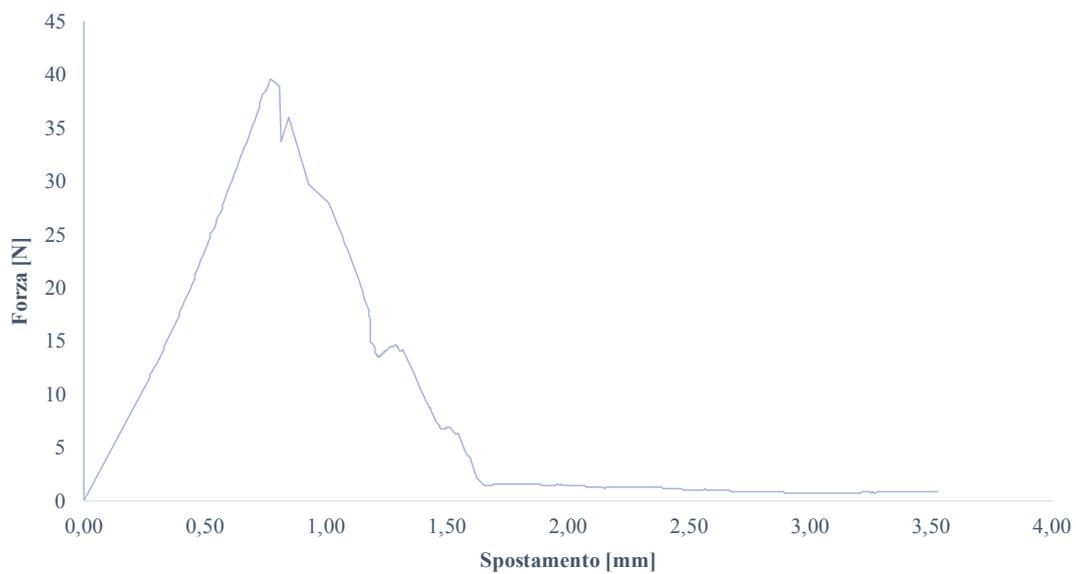


Figura 4. 50 - Diagramma Forza-Spostamento in trazione diretta, della corda di iuta trattata più prossima al valor medio.

Si riporta di seguito una tabella di confronto per i valori di resistenza, deformazione e modulo elastico.

Prova di trazione diretta della Corda di iuta	F_{Max_Med}	δ_{Max_Med}	σ_{Max_Med}	ϵ_{Max_Med}	A_{Med}	E_{Med}	E_{Med}
	[N]	[mm]	[MPa]	[%]	[mm ²]	[MPa]	[GPa]
NT	30,96	0,91	42,11	1,81	0,74	2320,49	2,32
DEV.ST	3,87	0,41	3,15	0,008	-	-	-
T	31,20	0,88	49,36	1,77	0,64	2793,65	2,79
DEV.ST	4,60	0,11	3,89	0,002	-	-	-

Tabella 4. 4 – Confronto tra Corde di iuta trattate e non trattate relativo alla trazione diretta.

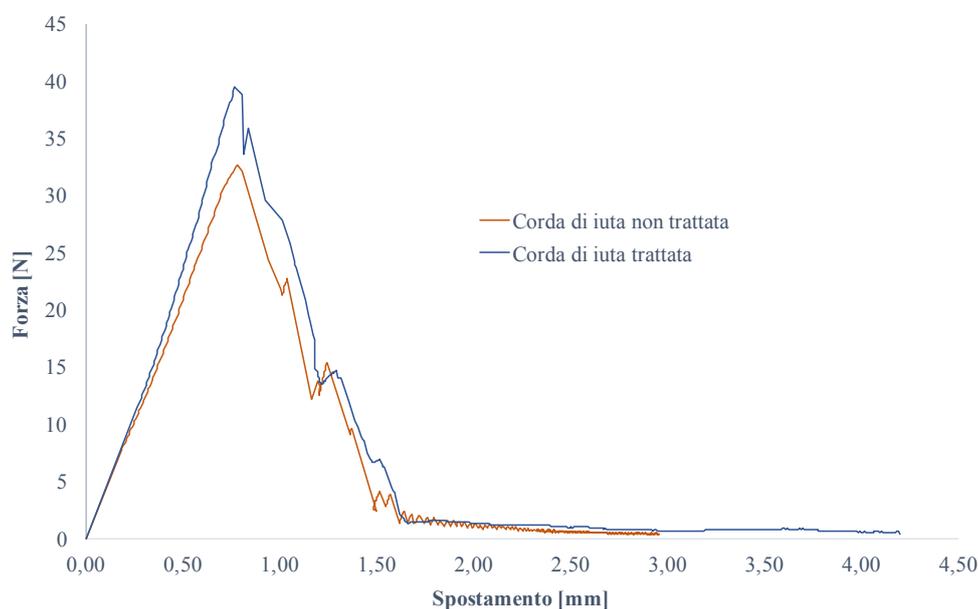


Figura 4. 51 – Diagramma Forza-Spostamento della corda di iuta trattata e non trattata.

Da come è possibile dedurre dai grafici riportati, nel caso delle corde di iuta non trattate, si è ottenuto un sforzo ultimo medio di circa 42 Mpa e una deformazione ultima media del 2% circa.

Nel caso invece della corda di iuta trattata, lo sforzo ammonta a 49 circa Mpa e la deformazione resta circa invariata del 2%.

È possibile dunque constatare che la corda di fibra trattata ha un valore della resistenza maggiore rispetto alla corda priva di trattamento, esso varia di circa 7 MPa, ovvero di circa il 14%.

Possiamo constatare che l'area di sezione, della corda sottoposta a trattamento, diminuisce, conferendo alla fibra una maggiore compattezza e regolarità. Il modulo è

aumentato del 20 %, ciò implica un certo aumento della rigidità della fibra che le conferisce una maggiore resistenza oltre che una configurazione più regolare.

4.2.3 Caratteristiche meccaniche del Tessuto di Iuta

4.2.3.1 Test di Trazione diretta

Il passo successivo è stato quello di effettuare il test di trazione diretta del tessuto di iuta, trattato e non trattato, prendendo in considerazione il fatto che il tessuto di iuta è composto da 4,5 corde per centimetro.

La trazione del tessuto è stata effettuata come da letteratura, ricavata dalle linee guida di qualificazione dei compositi FRCM del 2018.

La prova è stata effettuata con una macchina di trazione a controllo di spostamento. La larghezza del provino non ha superato quella degli afferraggi della macchina di trazione. In caso contrario, non sarebbe stata assicurata una distribuzione uniforme delle tensioni nel provino. La lunghezza minima del provino, al netto delle porzioni necessarie per gli afferraggi, è stata calcolata con un valore almeno pari a 5 volte la larghezza del provino stesso. I provini sono stati provvisti di talloni di afferraggio alle estremità per garantire omogenea distribuzione degli sforzi. I talloni metallici, della stessa lunghezza del campione, sono stati fissati con adesivi indicati per l'uso specifico. Lunghezza minima dei talloni è di 50 mm e spessore minimo 2 mm.

Il macchinario utilizzato per la trazione diretta in controllo di spostamento è una macchina *Shimadzu AGX*, con una cella di carico di 100 kN e una velocità di prova di 4 mm/min. I corpi di prova hanno dimensioni rispettivamente di 300 mm di lunghezza utile, con 100 mm ai due estremi necessari all'ancoraggio di 4 pacche metalliche necessarie per la connessione con la macchina, la larghezza del provino infine è di 60 mm. Centralmente è stato agganciato un sensore LVDT che ha la funzione di determinarne l'allungamento.

Le placche metalliche nei due estremi sono state incollate al tessuto tramite colla speciale Sikadur e lasciate asciugare per 24 ore.

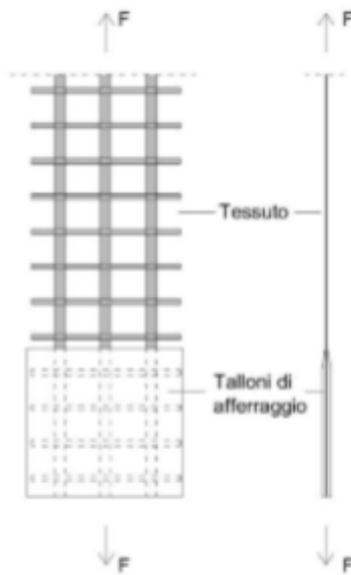


Figura 4. 52 – Preparazione dei corpi di prova per il test di trazione diretta del tessuto di iuta trattato e non trattato

Di seguito si riportano le immagini relative alla prova di trazione diretta e successivamente le immagini relative ai provini di tessuto in un tempo successivo alla prova.



Figura 4. 53 – Test di trazione del tessuto di iuta.



Figura 4. 54 – Test di trazione del tessuto di iuta.



Figura 4.55 – Corpo di prova del tessuto di iuta non trattato sottoposto a trazione diretta.



Figura 4.56 – Corpo di prova del tessuto di iuta trattato sottoposto a trazione diretta.

Per il calcolo della resistenza del tessuto e del suo relativo modulo, è stato necessario determinare una area di superficie sottoposta alla forza trazionale. Considerando che il tessuto ha rispettivamente una densità di 3,5 corde/cm in direzione trasversale e 4,5 corde/cm in direzione longitudinale, pertanto moltiplicando l'area media delle corde per il numero di corde si è ottenuto il valore dell'area di superficie media in mm^2 . In questo modo si è potuto risalire al valore di resistenza, di deformazione e di modulo elastico medio relativo al tessuto di iuta sottoposto a trazione diretta trattato e non trattato. Da normativa sui campioni devono essere determinati i valori delle seguenti grandezze:

- la tensione ultima σ_{uf} come valore caratteristico della rete a rottura per trazione;
- il modulo elastico E_f della rete come valore medio.

Nel caso della tensione ultima essa si è ricavata considerando il suo valore caratteristico ovvero sottraendo al valore medio la corrispondente deviazione standard moltiplicata per 2.

Il modulo elastico è stato calcolato come valore medio, ovvero dividendo la tensione ultima media per la deformazione ultima media.

Si riportano di seguito i grafici relativi alla forza-spostamento e quelli relativi allo sforzo-deformazione, tenendo presente però, che nel secondo caso la relazione è di tipo approssimativo essendo stata, l'area del tessuto di iuta, ricavata dall'area media delle singole corde in funzione del loro diametro stimato approssimativamente.

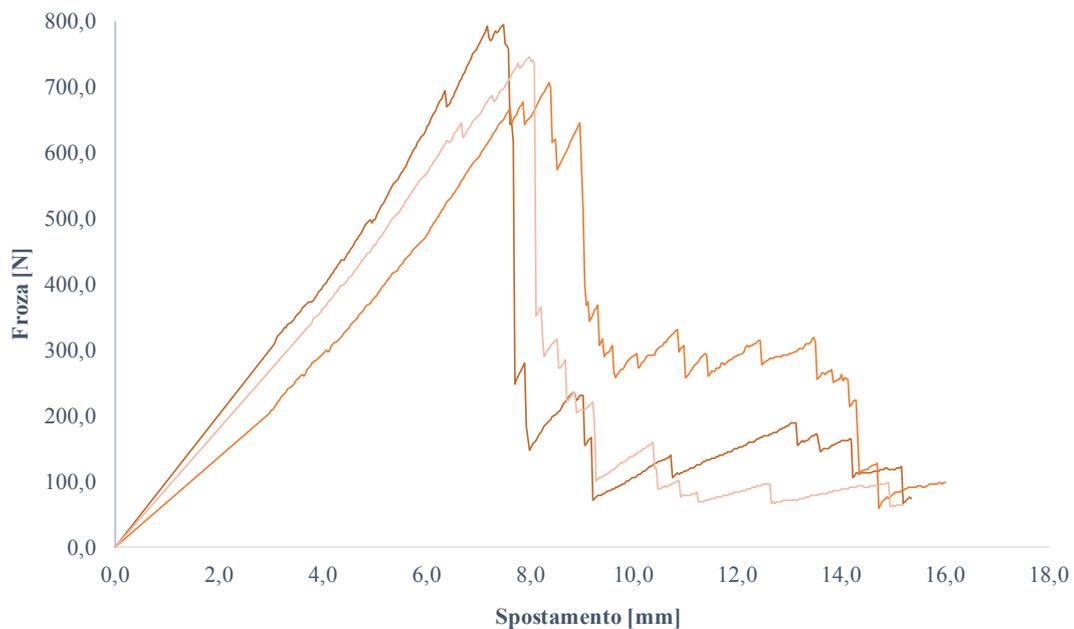


Figura 4. 57 – Diagramma forza-spostamento, relativo al tessuto di iuta non trattato, di tre corpi di prova sottoposti a trazione diretta.

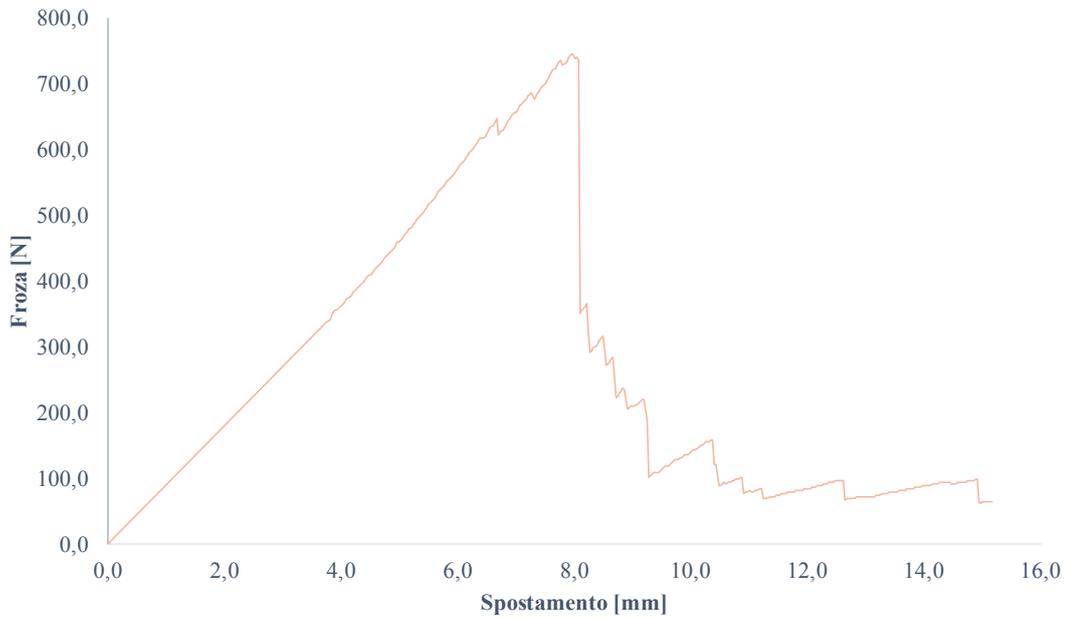


Figura 4. 58 – Diagramma forza-spostamento del tessuto di iuta non trattato, sottoposto a trazione diretta, che è più prossimo al valore medio.

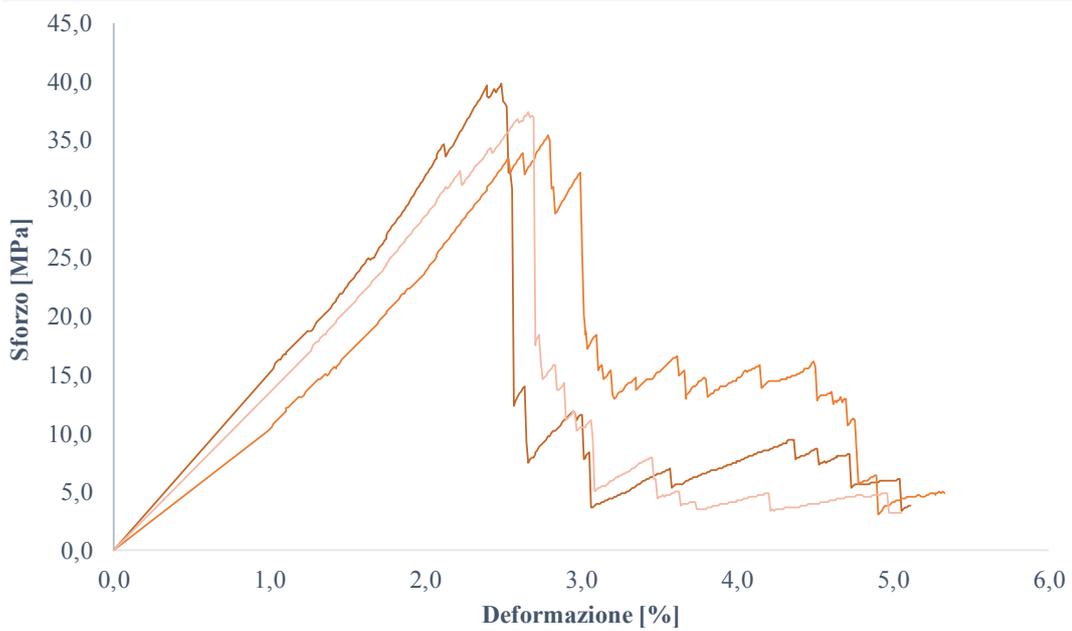


Figura 4. 59 – Diagramma sforzo-deformazione, relativo al tessuto di iuta non trattato, di tre corpi di prova sottoposti a trazione diretta.

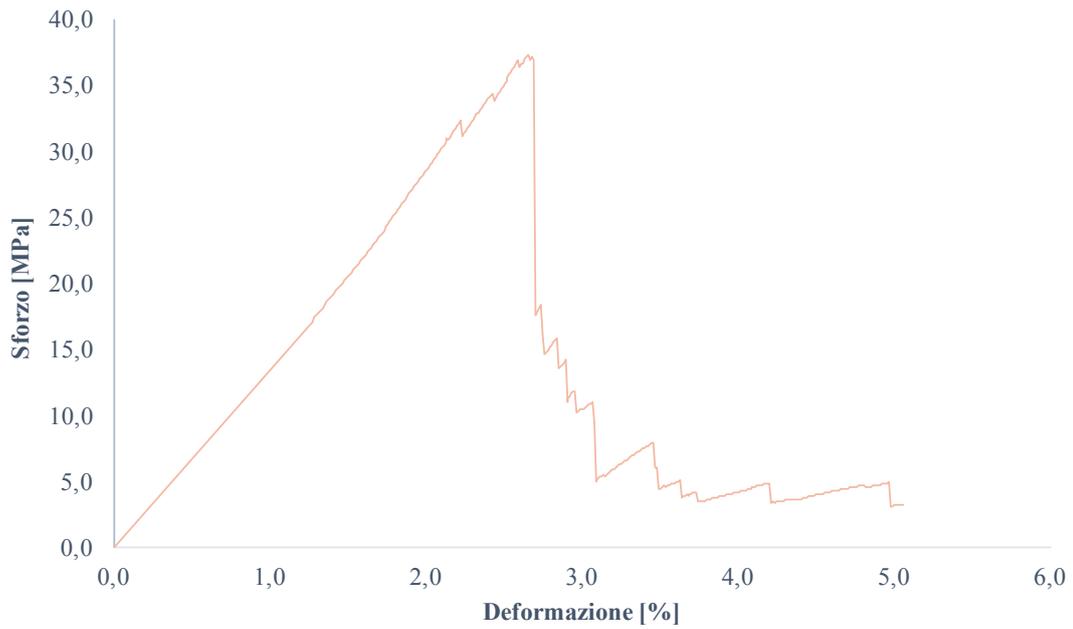


Figura 4. 60 - Diagramma sforzo-deformazione del tessuto di iuta non trattato, sottoposto a trazione diretta, che è più prossimo al valore medio.

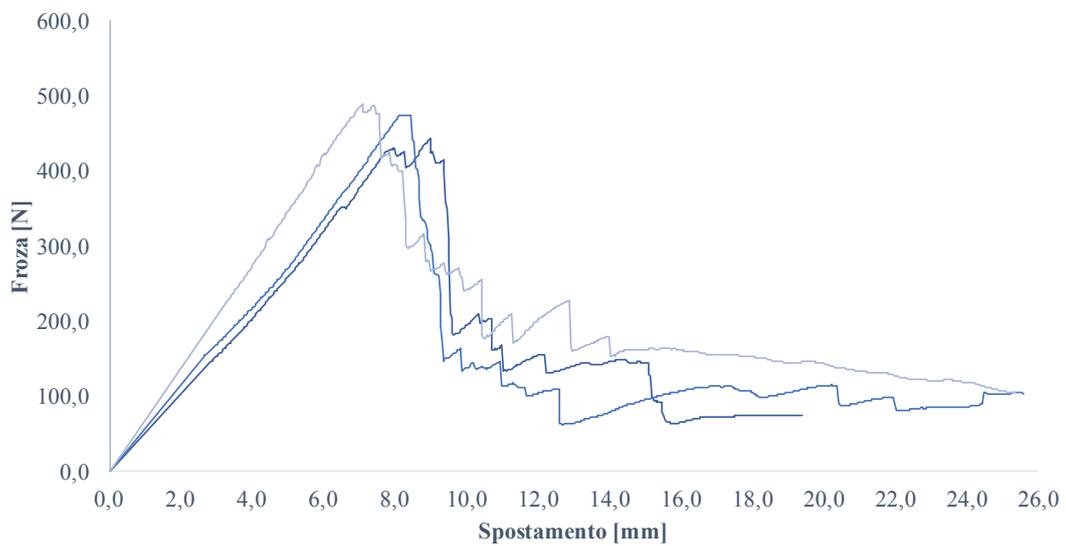


Figura 4. 61 – Diagramma Forza-Spostamento, relativo al tessuto di iuta trattato, di tre corpi di prova sottoposti a trazione diretta.

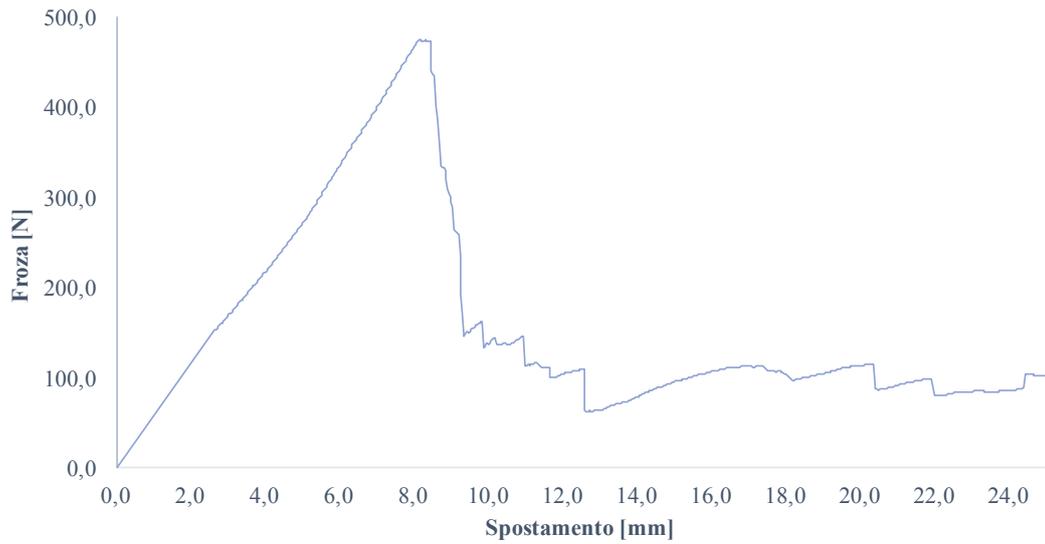


Figura 4. 62 – Diagramma forza-spostamento del tessuto di iuta trattato, sottoposto a trazione diretta, che è più prossimo al valore medio.

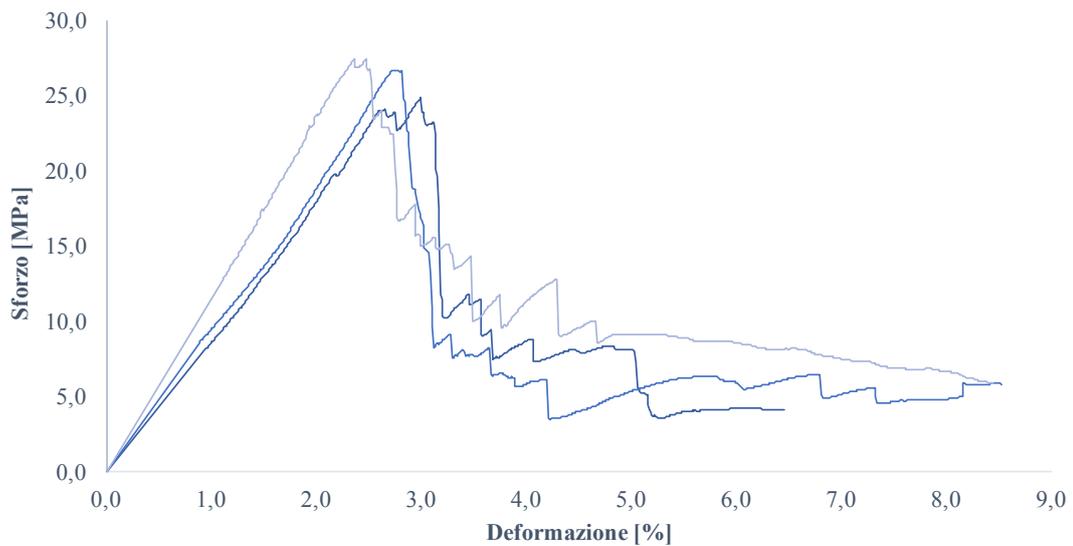


Figura 4. 63 - Diagramma sforzo-deformazione, relativo al tessuto di iuta trattato, di tre corpi di prova sottoposti a trazione diretta.

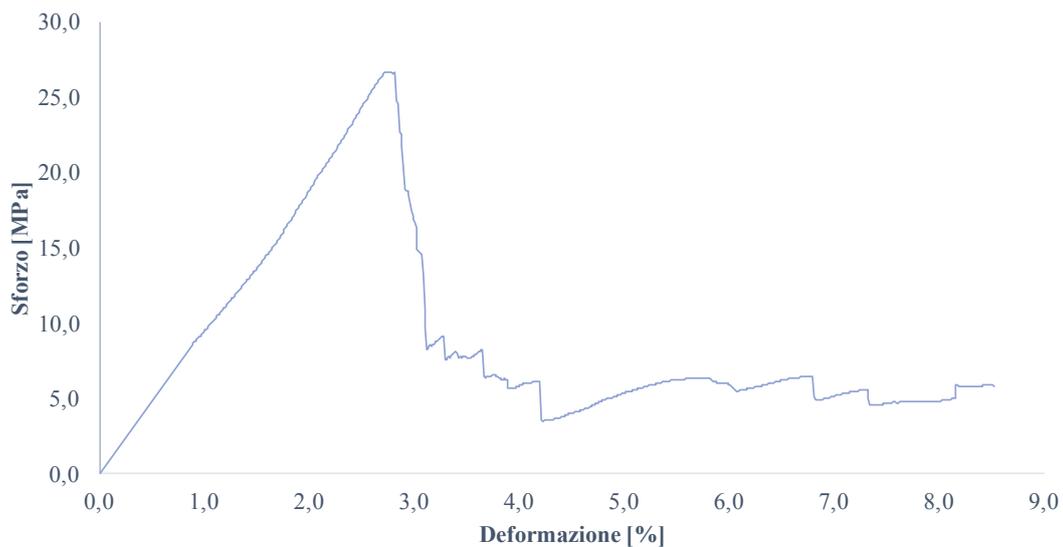


Figura 4. 64 – Diagramma Sforzo-Deformazione del tessuto di iuta trattato, sottoposto a trazione diretta, che è più prossimo al valore medio.

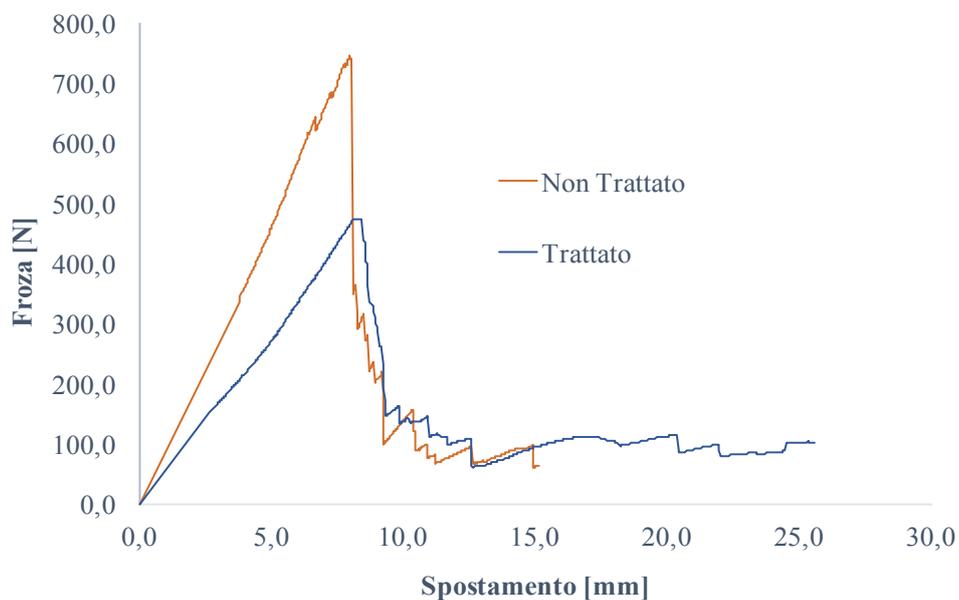


Figura 4. 65 – Diagramma forza-spostamento, comparazione tra tessuto trattato e non trattato.

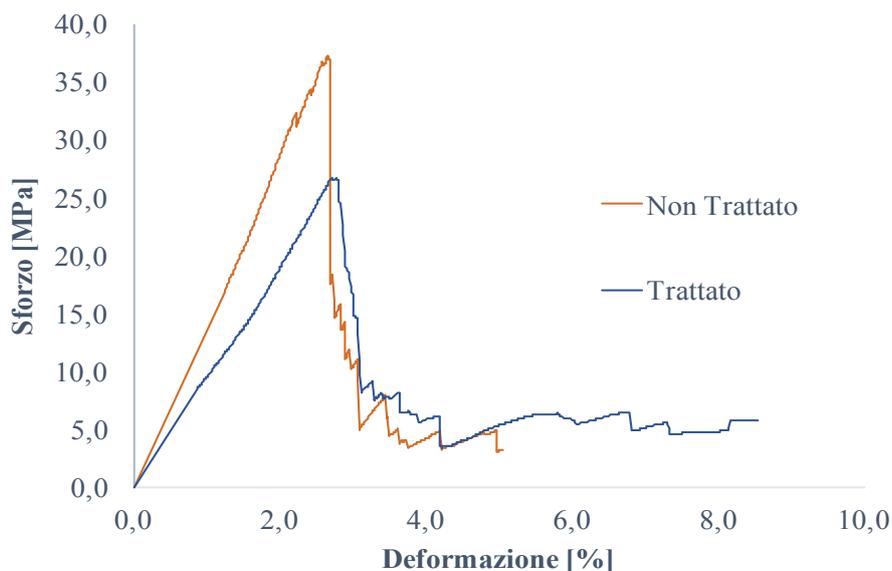


Figura 4. 66 - Diagramma Sforzo-Deformazione, comparazione tra tessuto trattato e non trattato.

Di seguito si riportano i valori medi tabellati e messi a confronto per il tessuto di iuta trattato e non trattato.

Prova di trazione diretta del Tessuto	F_{\max_Med} [N]	δ_{\max_Med} [mm]	σ_{\max_Med} [MPa]	ϵ_{\max_Med} [%]	A_{Med} [mm ²]	σ_{uf_NT} [Mpa]	E_{Med} [MPa]	E_{Med} [GPa]
Iuta_N_T	748,87	7,93	37,48	2,64	19,98	33,02	1417,74	1,42
DEV.ST	44,61	0,45	2,23	0,002	-	-	-	-
Iuta_T	468,47	8,22	26,29	2,74	17,82	23,69	959,45	0,96
DEV.ST	23,19	0,79	1,30	0,003	-	-	-	-

Tabella 4. 5 - Confronto tra Tessuto di iuta trattato e non trattato, sottoposto a trazione diretta.

Come ci si può facilmente rendere conto, il tessuto di iuta non trattato tollera una carica massima che è più grande rispetto a quella sopportata dal tessuto sottoposto a trattamento e allo stesso modo, la resistenza è maggiore per il tessuto non trattato per circa il 40 %.

Come già accennato in precedenza, dalla letteratura è noto che la fibra di iuta sottoposta a trattamento alcalino, acquisisce una maggiore rigidità. Questo, nel caso del singolo filamento indica un allineamento delle fibre di cellulosa ed una maggiore cristallinità, che comportano anche un miglioramento delle prestazioni meccaniche in termini di trazione diretta. Il trattamento, però, comporta anche la

perdita dei composti chimici della fibra stessa ed il suo infragilimento che, nel caso del tessuto, manifesta un comportamento inverso. Infatti il tessuto, essendo costituito da corde di fibra in direzione trasversale e longitudinale, nei punti di intersezione, è come se esso avesse dei punti di accumulo di tensione, con comportamento fragile, che provocano una minor resistenza dello stesso quando sottoposto a trazione diretta. Il tessuto trattato, a differenza di quello non trattato, presenta una maggiore regolarità e omogeneità nei risultati però, come facilmente visibile dal grafico 4.13 e 4.11, e quindi una maggiore controllabilità.

4.2.4 Interfaccia fibra-matrice

4.2.4.1 Test Pull Out

La caratterizzazione dell'interfaccia fibra-matrice è stata prodotta dal test di Pull Out. La prova è stata realizzata per la corda di iuta priva di trattamento alcalino e per la corda trattata con lunghezza di impregnazione della stessa di 15 mm. La lunghezza di 15 mm è data dal fatto che sono stati effettuati tentativi con lunghezza rispettivamente di 25 e 20 mm, i quali non hanno dato esito positivo e la corda ha raggiunto la rottura prima del suo sfilamento dalla malta. Per garantire una buona realizzazione del provino cilindrico di malta con internamente la corda di fibra, si sono utilizzati cilindri di PVC come corpo di prova, di diametro di 25 mm e lunghezza di 15mm.

Si sono realizzati i corpi di prova facendo attenzione che la corda di fibra passasse perfettamente al centro della base del cilindro, utilizzando del nastro adesivo affinché la fibra rimanesse ferma durante il riempimento dei cilindri con la malta fresca.

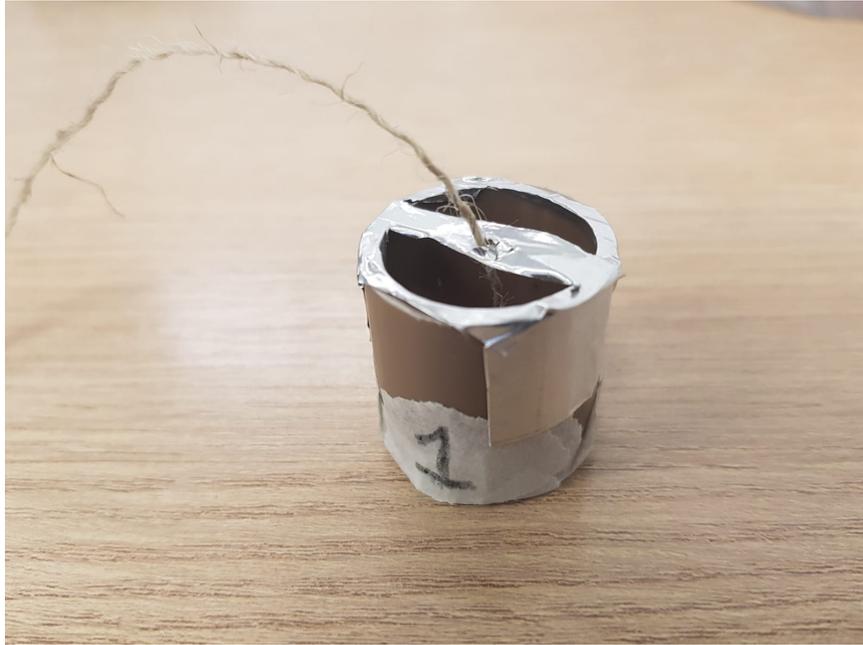


Figura 4. 67 – Preparazione del corpo di prova per il test Pull out.



Figura 4. 68 – Preparazione corpi di prova test Pull out.

Dopo la preparazione dei corpi di prova si è proceduto con la realizzazione della malta e quindi il riempimento dei cilindri con la stessa.



Figura 4. 69 – Inserimento della malta nei cilindri.



Figura 4. 70 – Inserimento della malta nei cilindri (alto).

Dopo 28 giorni di cura secca a 21 ± 1 °C, i corpi di prova sono stati sottoposti alla prova di pull-out, con lo scopo di analizzare il comportamento della fibra a contatto con la matrice e quindi la loro interazione.

La macchina utilizzata per la prova è la stessa macchina che è stata utilizzata per la trazione diretta della corda di iuta. Il dispositivo è di tipo Tytron 250, con una cella di carico di 50N e una velocità di prova di 1 mm/min. il tubo di PVC è stato posizionato dentro il cilindro di ferro e fissato con delle viti per evitare il movimento del provino durante il test. La fibra viene tirata via dal campione e si raccolgono i dati di forza massima e spostamento.

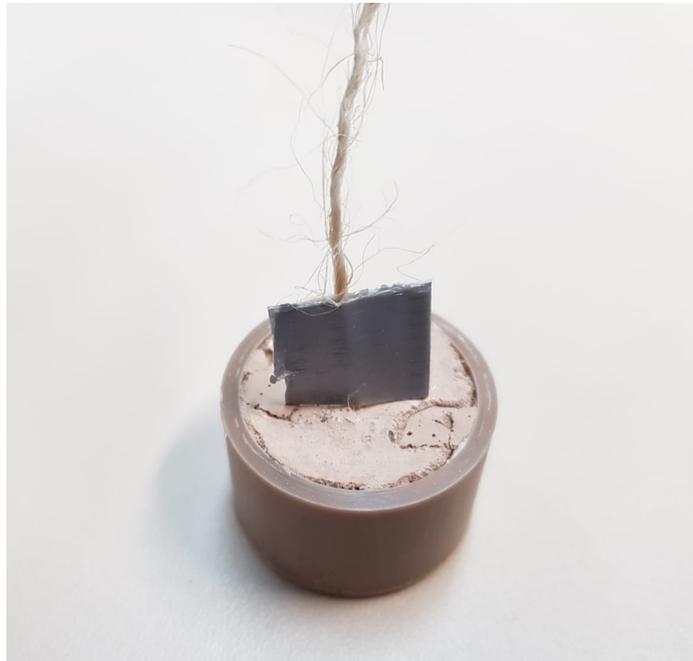


Figura 4. 71 – Provino prima di essere sottoposto alla prova.

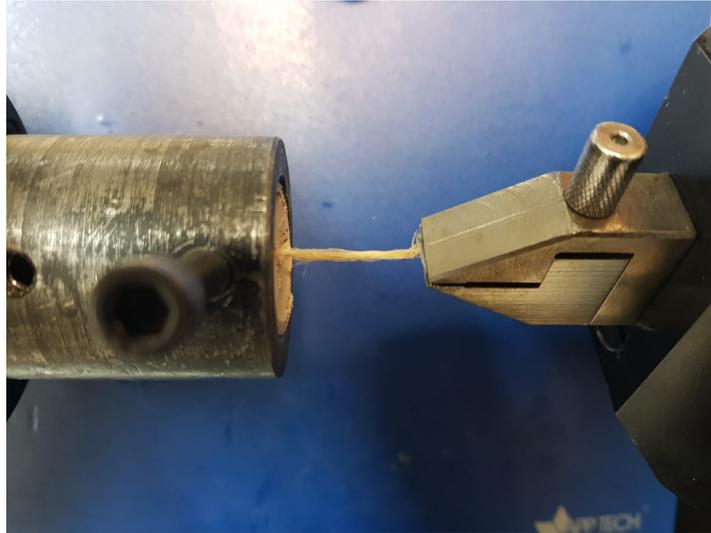


Figura 4. 72 – Prova di Pull out, Tytron 250.

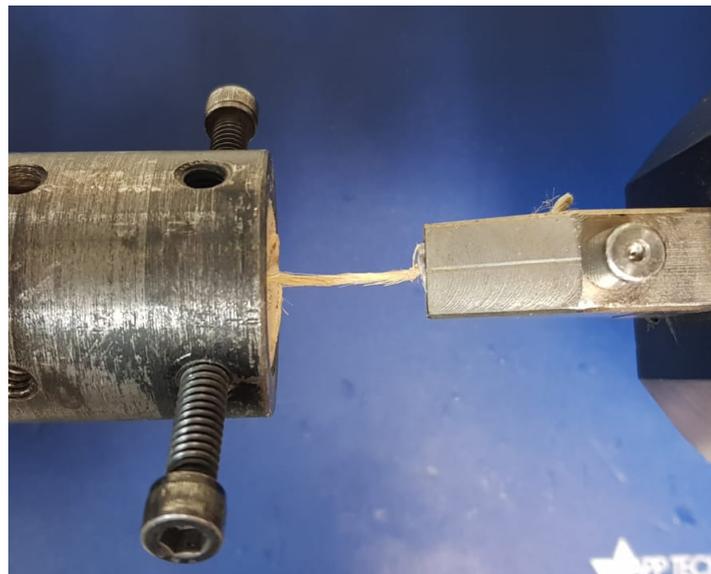


Figura 4. 73 – Prova di Pull out, Tytron 250 (alto).

I dati raccolti dalla prova sono stati analizzati in accordo con il modello LIN et. Al (1999), riadattato per le fibre vegetali, utilizzando l'area ricavata grazie al microscopio elettronico a scansione usato anche nel caso della trazione diretta della corda.

Essendo G_d i valori dell'energia chimica di legame e τ_{max} la tensione massima di legame, essi sono stati calcolati tramite le seguenti equazioni:

$$G_d = \frac{(P_a - P_b)^2}{2E_f A_f \text{Perimetro}}$$

$$\tau_{max} = \frac{P_{max}}{l_f \text{Perimetro}}$$

Dove P_a è il carico di legame, cioè il carico richiesto per avviare il processo di trazione della fibra dalla matrice, P_b è il carico fittizio dopo la caduta improvvisa di P_a , E_f è il modulo di elasticità della fibra, A_f è l'area della fibra ricavata dal SEM, P_{max} è la carica massima durante l'estrazione e l_f è la lunghezza dell'impregnamento della fibra.

4.2.4.2 Risultati

Di seguito si riportano i diagrammi forza-sfilamento relativi ai 10 provini con corda di iuta non trattata e dieci trattata, mettendone a confronto i valori ultimi tramite una tabella riassuntiva.

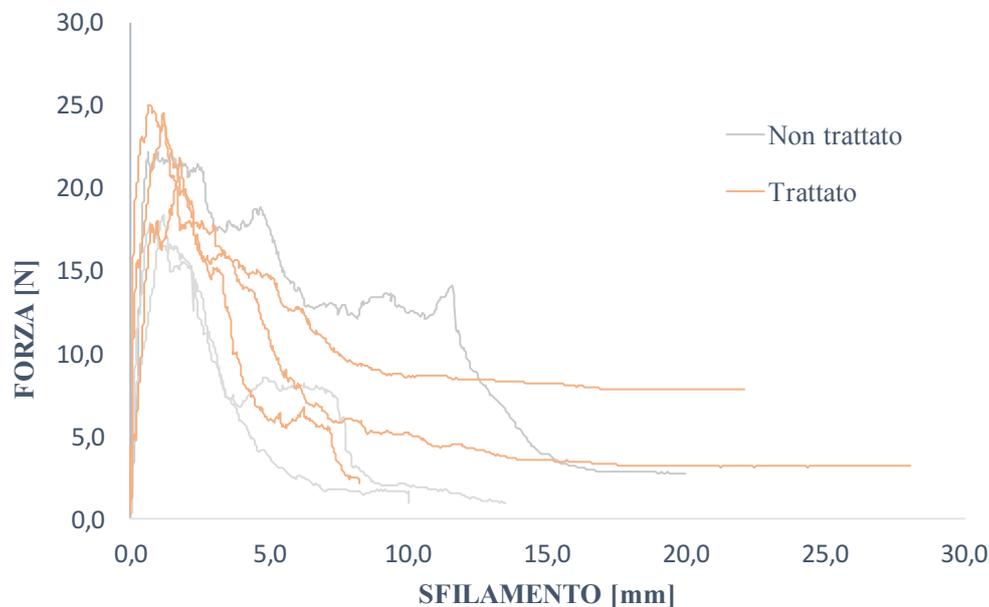


Figura 4. 74 – Diagramma Forza-Sfilamento relativo al test di Pull out per corda di iuta trattata e non trattata.

IUTA	l_f mm	Area mm ²	Perimetro mm	P_a N	P_b N	P_{max} N	G_d J/m ²	τ_{max} MPa
Non Trattato	15	0,655	2,855	19,183	18,333	19,542	0,178	0,459
Dev.St.	-	0,153	0,349	2,267	2,398	2,346	0,148	0,055
Trattato	15	0,734	3,020	22,140	18,330	23,097	0,700	0,534
Dev.St.	-	0,180	0,385	3,890	2,217	1,413	0,691	0,106

Tabella 4. 6 – Tabella riassuntiva dei valori caratteristici relativi al test di Pull out per la corda di iuta trattata e non trattata.

Come è possibile notare dal risultato, la resistenza allo sfilamento è maggiore nel caso della corda di iuta trattata all'interno della malta, piuttosto che nel caso della iuta non trattata. Questo indica, come già accennato in precedenza, che nel caso della fibra trattata con soluzione alcalina, si ha un legame di adesione migliore dovuto all'irrigidimento della struttura polimerica delle cellule presenti nelle fibre. Si ha come un imballaggio della fibra, la quale sulla superficie è caratterizzata dalla formazione di CH (composti carbonio-idrogeno) e CC (composti carbonio-carbonio) che potrebbero reagire con i prodotti della matrice a base cementizia e promuovere una maggiore adesione meccanica della fibra alla matrice stessa. Infine questi prodotti, generati dal trattamento, rendono la superficie della fibra più rugosa e migliorano l'attrito della stessa a contatto con la matrice a base cementizia⁶².

4.3 Caratterizzazione del composito Fibra-Matrice

Il composito costituito dalla matrice di malta e rinforzo in fibra naturale è stato caratterizzato tramite trazione diretta.

Inizialmente si è realizzato un sistema per la realizzazione delle placche di composito da testare. La malta, realizzata sempre con il medesimo procedimento, si è collocata su una tavola di legno, suddivisa in cinque parti da bastoncini dello stesso materiale affinché si potessero realizzare le placche rettangolari dallo stampo.

Sono state realizzate 20 placche in tutto, 5 placche con due strati di tessuto di iuta non trattata e 5 con la stessa ma in questo caso trattata, infine lo stesso è stato fatto con il lino, con e senza trattamento preliminare.

Le dimensioni delle placche e la procedura del test sono stati ricavati dalla ACI 549 e dalla "Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di

⁶² Ferreira, 2016.

accettazione di compositi fibro-rinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti”, del dicembre 2018, dal Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

I provini sono stati realizzati di forma rettangolare, con le medesime dimensioni del singolo tessuto di fibra caratterizzato in precedenza, ovvero una lunghezza di 500 mm e una larghezza di 60 mm. Lo spessore delle placche è risultato di 1 cm, rispettando quello che è lo spessore medio usualmente applicato alle pareti in laterizio reali. All'interno di ogni placca sono stati inseriti due strati di tessuto.



Figura 4. 75 – Realizzazione dei provini di composito tessuto e matrice per il test di trazione diretta.

I talloni di ancoraggio, con una larghezza pari a quella del corpo di prova, sono stati incollati alle estremità per una lunghezza di 100 mm, lasciando così una lunghezza libera di 300 mm, essi sono necessari alla connessione con la macchina. I seguenti afferraggi metallici nei due estremi, quindi, sono stati incollati alla placca tramite colla speciale Sikadur, e lasciati asciugare per 24 ore. Inizialmente, nella parte centrale del corpo di prova, è stato agganciato un sensore LVDT che avrebbe avuto la funzione di determinarne l'allungamento verticale durante la prova.

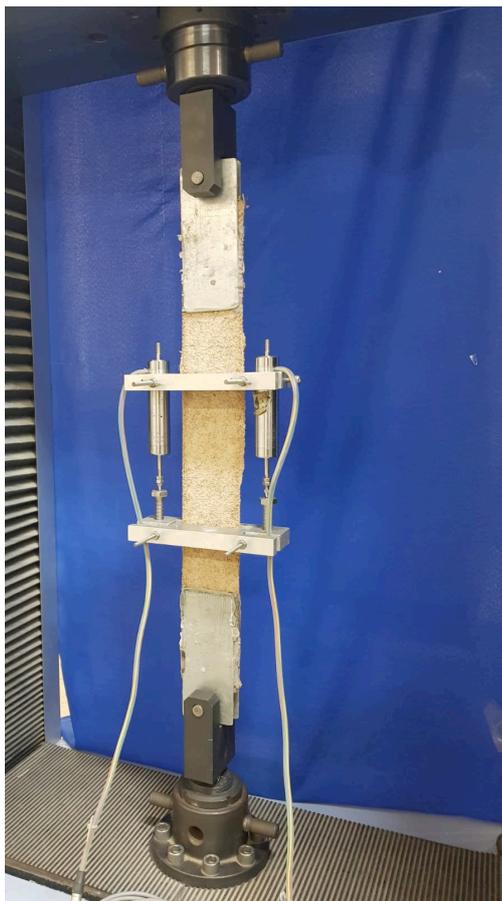


Figura 4. 76 – Set up della prova di trazione delle placche di composito.

Ma il peso degli LVDT rischiava di danneggiare la placca prima dell'inizio della prova essendo quest'ultima molto sottile, pertanto si è deciso di non collocare gli LVDT per non correre il rischio di invalidare la prova e si è optato per la registrazione dei soli spostamenti della macchina.

Il macchinario utilizzato per la trazione diretta in controllo di spostamento è lo stesso utilizzato per la trazione diretta del tessuto, una macchina *Shimadzu AGX*, con una cella di carico di 100 kN e una velocità di prova in questo caso di 0.3 mm/min.

La registrazione del valore di carico e dello spostamento della traversa mobile sono stati registrati tramite software, con registrazione in continuo.

Da normativa, sui campioni devono essere determinati i valori delle grandezze meccaniche di seguito richiamate:

- il modulo di rigidità a trazione E_l come valore medio;
- la tensione ultima σ_u come valore caratteristico e la deformazione ultima ε_u sempre come valore medio del sistema di rinforzo a rottura per trazione.

Anche in questo caso quando si parla di valore caratteristico ci si riferisce al valore della tensione ultima media al quale viene sottratta due volte la sua deviazione standard. Infine, per il modulo di rigidezza si è utilizzata la formula relativa al rapporto tra la tensione ultima media e la deformazione ultima media.

Di seguito si riportano le formule utilizzate:

$$\sigma_{u_Med} = \frac{F_{u_Med}}{A_f}$$

$$\varepsilon_{u_Med} = \frac{\delta_{u_Med}}{l_l}$$

$$E_l = \frac{\sigma_{u_Med}}{\varepsilon_{u_Med}}$$

$$\sigma_u = [\sigma_{u_Med} - (DEV.ST \cdot 2)]$$

Dove F_{u_Med} è il valore medio della carica ultima relativa alle placche di composito, A_f è l'area di sezione del composito, δ_{u_Med} è lo spostamento ultimo in corrispondenza del valore di carica ultima, l_l è la lunghezza libera del provino, σ_{u_Med} è la tensione ultima media e σ_u rappresenta il valore caratteristico della tensione ultima.

Anche in questo caso si riportano i risultati delle placche di composito, caratterizzate da due strati di tessuto di fibra di iuta, una volta non trattato e trattato, lo stesso si è fatto con il tessuto di lino non trattato e trattato rispettivamente.



Figura 4. 77 – Setup del test di trazione diretta della placca di composito rinforzato con fibra naturale.

Sono state testate 5 placche di composito al quale sono stati applicati come rinforzo due strati di tessuto. Di seguito si riportano i relativi risultati e la comparazione tra gli stessi. Per l'elaborazione dei risultati sono stati scartati i test che sono stati ritenuti troppo lontani dalla configurazione reale.

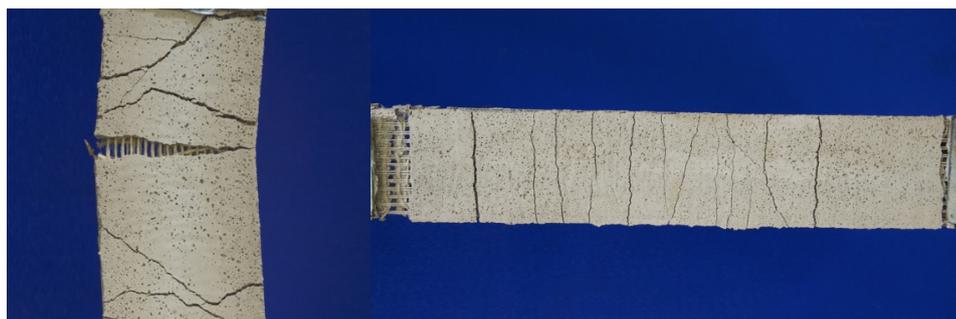


Figura 4. 78 – Tipologia di frattura nel sistema composito di rinforzo fibra-matrice.

4.3.1 RISULTATI

4.3.1.1 Composito rinforzato con tessuto di iuta non trattata

Si riportano di seguito i risultati relativi al test di trazione diretta di 5 placche di composito costituito da malta rinforzata con due strati di tessuto in fibra di iuta non trattata.

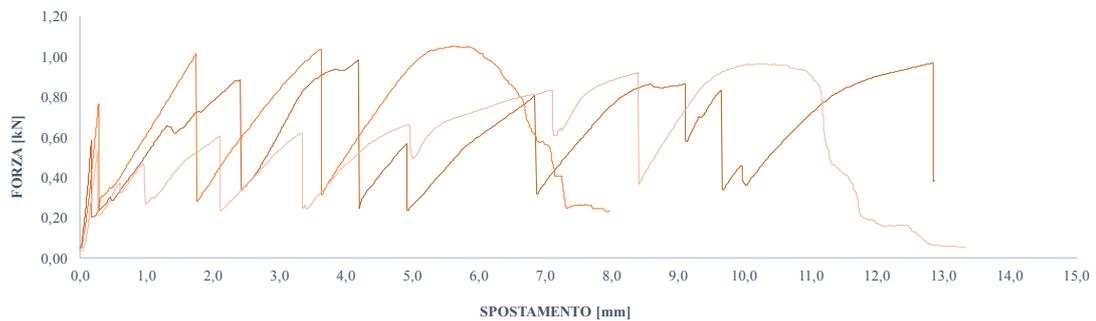


Figura 4. 79 – Diagramma forza-spostamento di tre provini di composito, rinforzato con due strati di tessuto di iuta non trattata, sottoposto a trazione diretta.

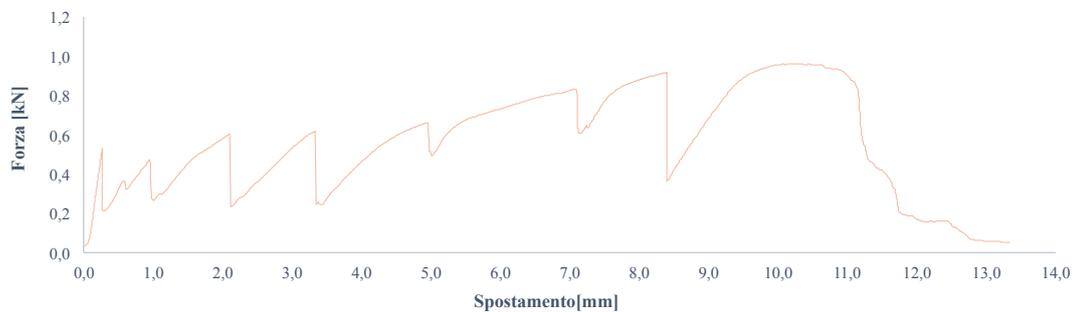


Figura 4. 80 – Diagramma forza-spostamento del provino relativo al composito, rinforzato con tessuto in fibra di iuta non trattata, che risulta avere un comportamento più vicino a quello medio.

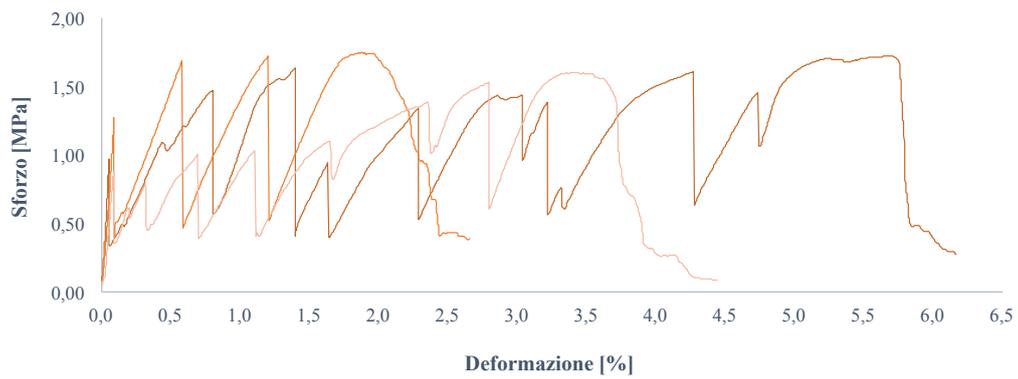


Figura 4. 81 – Diagramma sforzo-deformazione di tre provini di composito, rinforzato con due strati di tessuto di iuta non trattato, sottoposto a trazione diretta.



Figura 4. 82 – Diagramma sforzo-deformazione del provino relativo al composito, rinforzato con tessuto in fibra di iuta non trattata, che risulta avere un comportamento più vicino a quello medio.



Figura 4. 83 - Test di trazione diretta della placca di composito rinforzata con due strati di tessuto di iuta non trattata.

4.3.1.2 Composito rinforzato con tessuto di iuta trattato

Si riportano di seguito i risultati relativi al test di trazione diretta di 5 placche di composito costituito da malta rinforzata con due strati di tessuto in fibra di iuta trattata con soluzione alcalina.

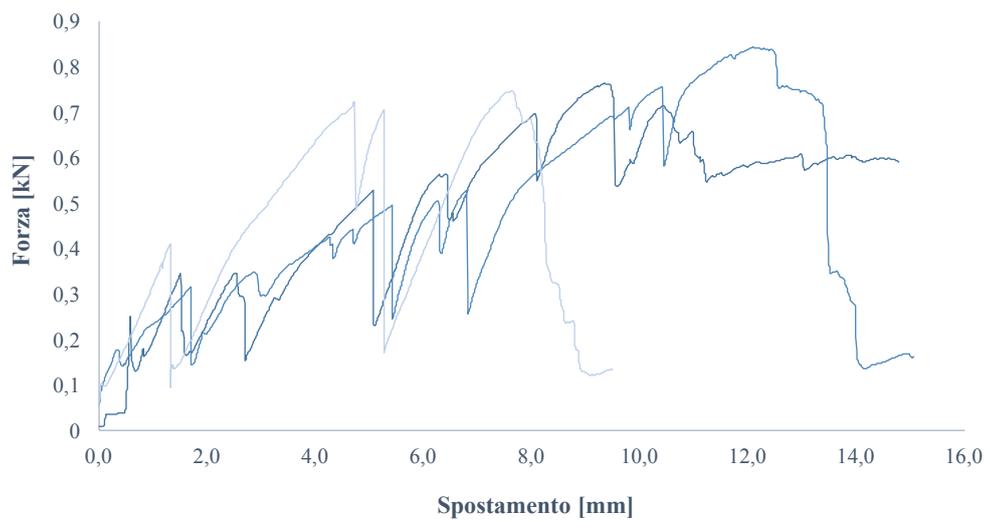


Figura 4. 84 – Diagramma forza-spostamento di tre provini di composito, rinforzato con due strati di tessuto di iuta trattato, sottoposto a trazione diretta.

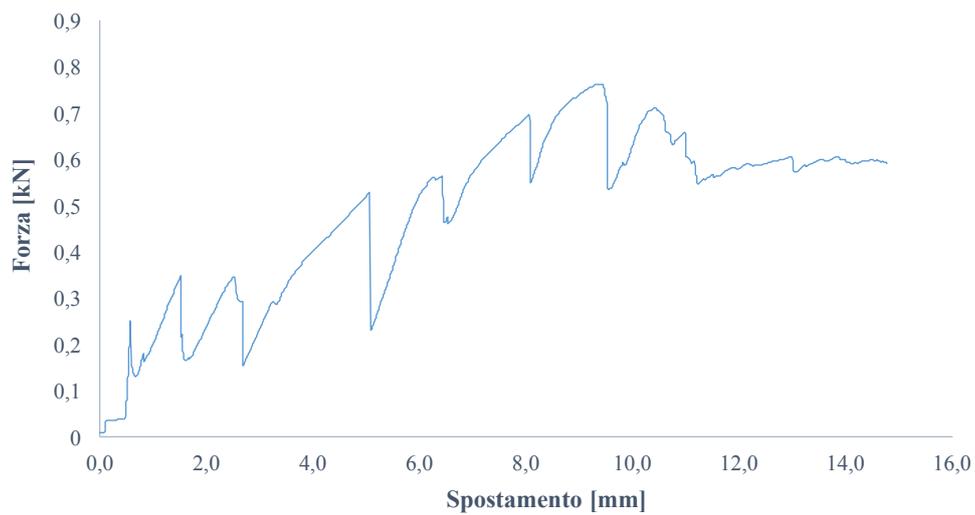


Figura 4. 85 – Diagramma forza-spostamento del provino relativo al composito, rinforzato con tessuto in fibra di iuta trattata, che risulta avere un comportamento più vicino a quello medio.

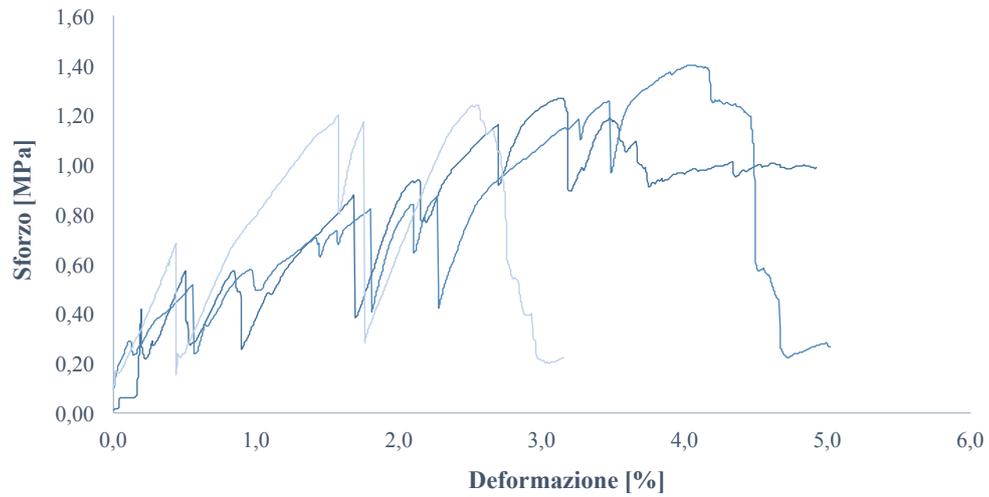


Figura 4. 86 – Diagramma sforzo-deformazione di tre provini di composito, rinforzato con due strati di tessuto di iuta trattato, sottoposto a trazione diretta.

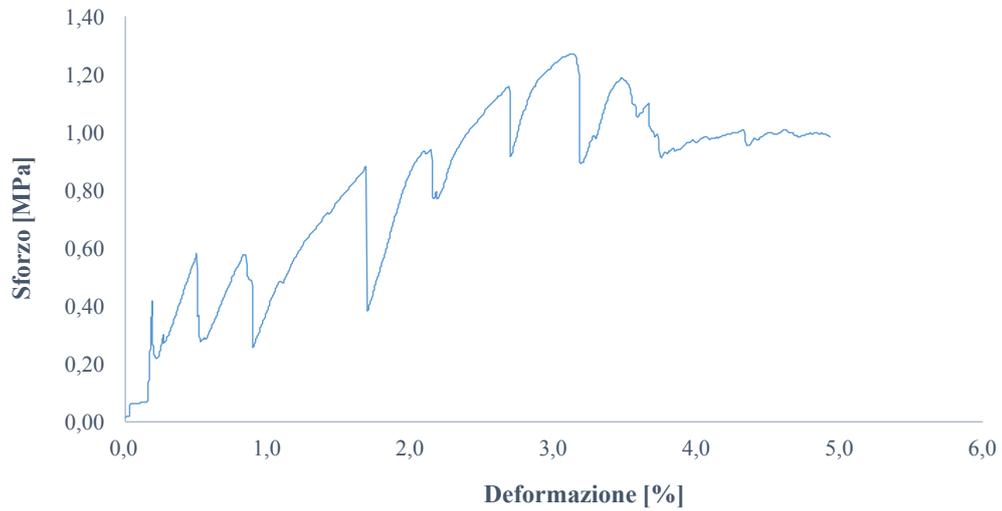


Figura 4. 87 – Diagramma sforzo-deformazione del provino relativo al composito, rinforzato con tessuto in fibra di iuta trattata, che risulta avere un comportamento più vicino a quello medio.

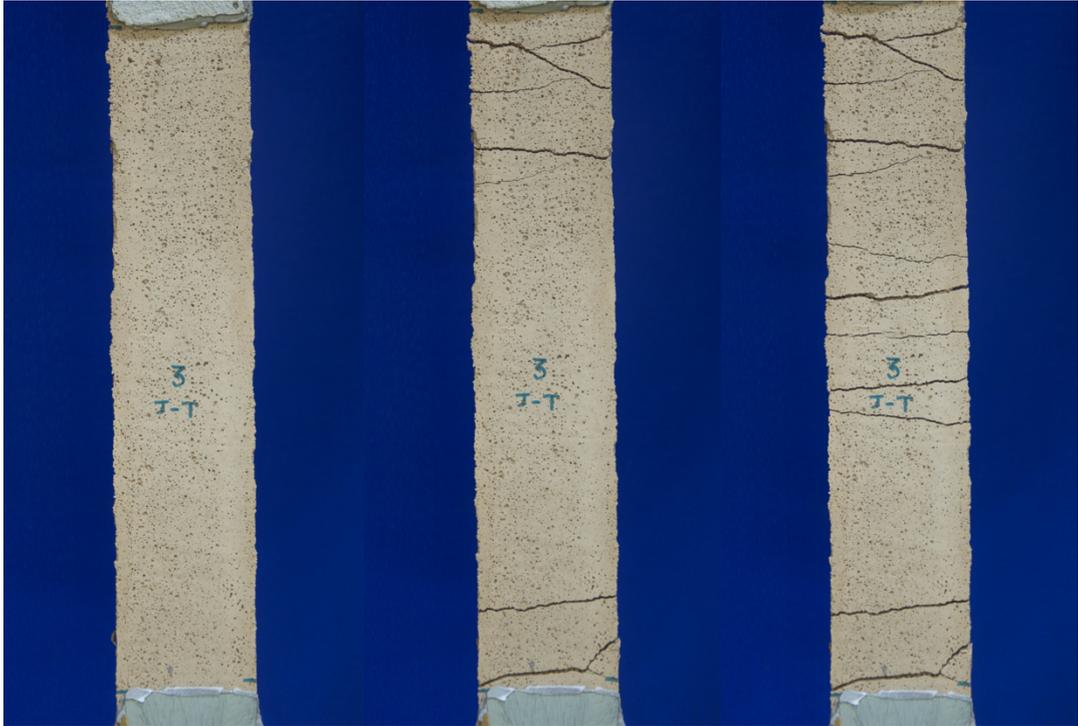


Figura 4. 88 – Test di trazione diretta della placca di composito rinforzata con due strati di tessuto di iuta trattata.

4.3.1.3 Confronto placca di composito rinforzato con iuta

Di seguito si riportano i grafici di confronto, in termini di forza-spostamento e sforzo-deformazione, nel caso di composito rinforzato con tessuto di iuta rispettivamente trattato e non trattato.

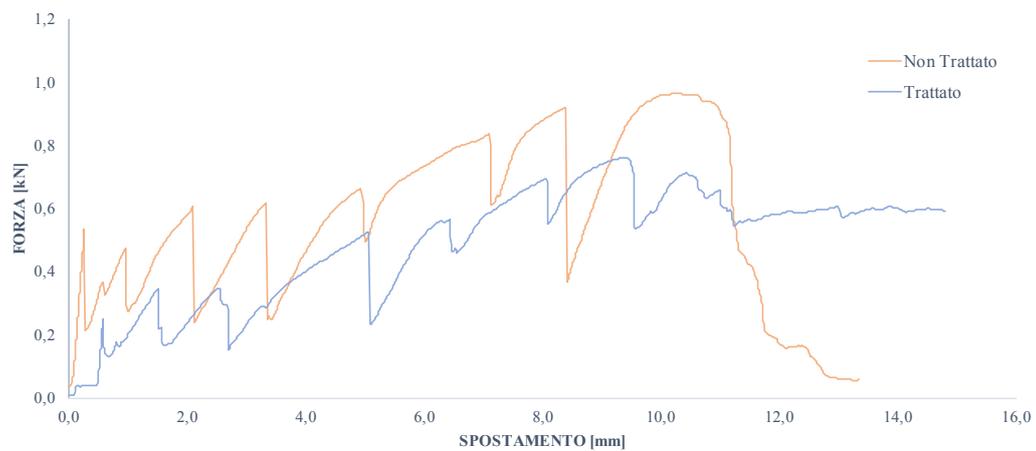


Figura 4. 89 – Comparazione tra il diagramma forza-spostamento nel caso di composito rinforzato con tessuto di iuta non trattato e trattato rispettivamente.

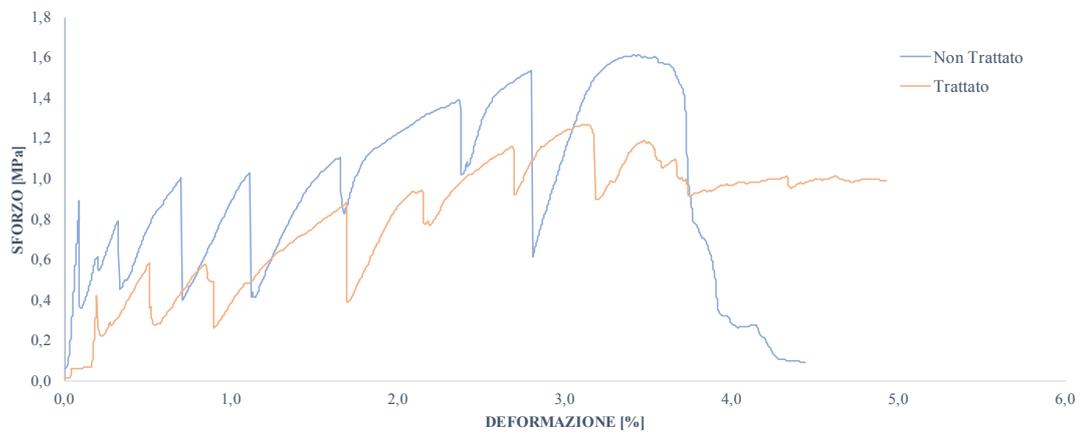


Figura 4. 90 – Comparazione tra il diagramma sforzo-deformazione nel caso di composito rinforzato con tessuto di iuta non trattato e trattato rispettivamente.

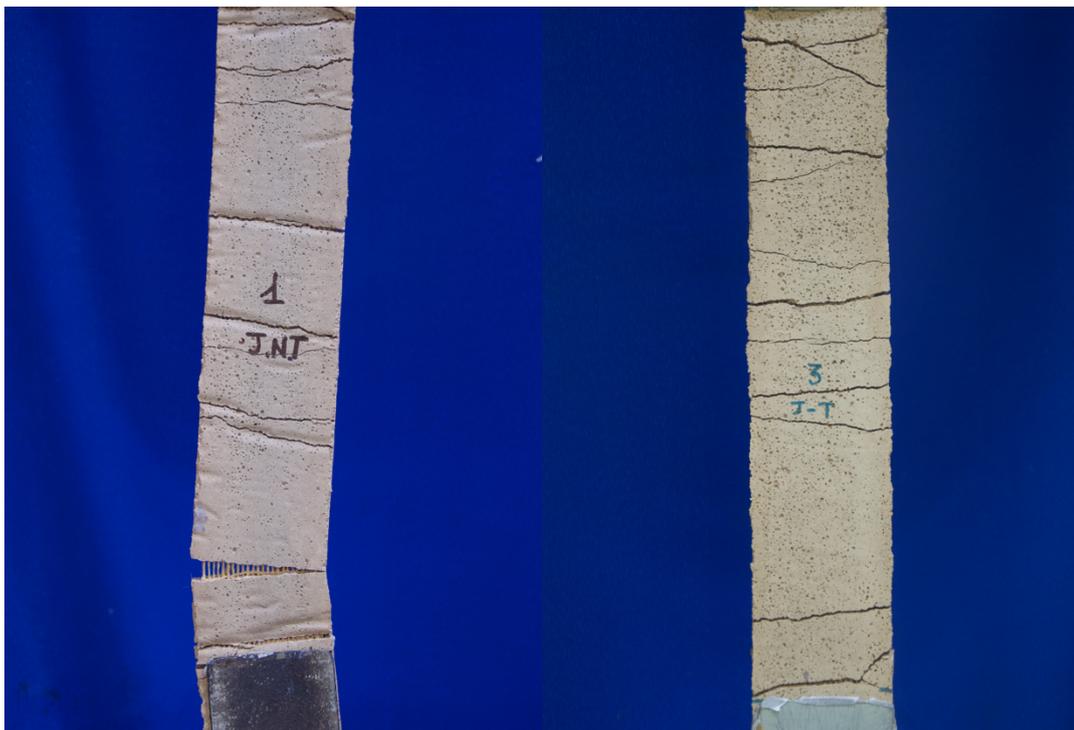


Figura 4. 91 – Confronto test di trazione diretta del composito rinforzato con tessuto in fibra di iuta trattato e non trattato.

Trazione diretta Composito	$F_{u \text{ Med}}$ [N]	$\delta_{u \text{ Med}}$ [mm]	$\sigma_{u \text{ Med}}$ [Mpa]	$\epsilon_{u \text{ Med}}$ [%]	$A_{u \text{ Med}}$ [mm ²]	$\sigma_{uf \text{ NT}}$ [Mpa]	$E_f \text{ Med}$ [Mpa]	$E_f \text{ Med}$ [Gpa]	N_{fess}
I_N_T	1017,93	13,28	1,70	4,43	600	1,54	38,33	0,04	9,00
DEV.ST	45,91	5,27	0,08	0,015	-	-	-	-	-
Trazione diretta Composito	$F_{u \text{ Med}}$ [N]	$\delta_{u \text{ Med}}$ [mm]	$\sigma_{u \text{ Med}}$ [Mpa]	$\epsilon_{u \text{ Med}}$ [%]	$A_{u \text{ Med}}$ [mm ²]	$\sigma_{uf \text{ NT}}$ [Mpa]	$E_f \text{ Med}$ [Mpa]	$E_f \text{ Med}$ [Gpa]	N_{fess}
I_T	783,53	13,11	1,31	4,37	600	1,13	29,88	0,03	10,00
DEV.ST	51,51	3,15	0,09	1,050	-	-	-	-	-

Tabella 4. 7 – Confronto dei valori caratteristici relativi al composito rinforzato con tessuto di iuta trattato e non trattato nel caso di trazione diretta della placca.

Come è facilmente riscontrabile, anche nel caso della trazione diretta della placca, il trattamento alcalino eseguito al tessuto di iuta non ha migliorato le caratteristiche meccaniche del composito, piuttosto la resistenza ultima è diminuita del 30%. Osservando il grafico, però, è possibile notare come, l'andamento del composito trattato, mostri un maggior numero di picchi a dimostrazione del fatto che l'interazione tra matrice e fibra è migliorata ed il composito si è fessurato in maggior misura prima di arrivare a rottura, ciò è ancora più facilmente visibile dalle immagini sovrastanti che mostrano come le placche rinforzate con tessuto trattato abbiano riportato un maggior numero di fessure.

4.3.1.4 Composito rinforzato con tessuto di lino non trattato

Nel caso della caratterizzazione a trazione della placca di composito, si è posto in esame oltre al tessuto di iuta anche il tessuto di lino.

Il lino impiegato in questo caso studio è un FID FLAX GRID 300 HS20, con una tensione caratteristica a trazione della fibra di 512 MPa, un modulo elastico di 21,4 GPa, una deformazione a rottura del 3,27 % ed una densità di 1,5 g/cm³, si allega in basso la relativa scheda tecnica.

Il tessuto è caratterizzato da 4,3 fili per centimetro, esso nel caso del composito presenta una larghezza di 6 cm per ogni placca.

Come già accennato sono stati utilizzati due strati di tessuto per ogni placca, determinandone uno spessore di 1 cm. Le dimensioni, come sopraccitato, sono di 6 x 50 x 1 cm, con una luce libera di 30 cm.

Nel caso del composito con lino non trattato sono stati testati 5 corpi di prova a trazione diretta. È stato effettuato uno studio statistico relativo al calcolo della deviazione standard, tramite il quale sono state scartate le prove che hanno presentato valori molto discordanti e lontani dalla media relativa, inoltre sono state prese in considerazione anche le immagini relative ai provini alla fine del test.

Di seguito si riportano i risultati relativi al test di trazione diretta delle placche di composito rinforzato con fibra di lino trattato con soluzione alcalina e non trattato rispettivamente. Si riportano grafici forza-spostamento e tensione-deformazione e la relativa tabella di confronto.

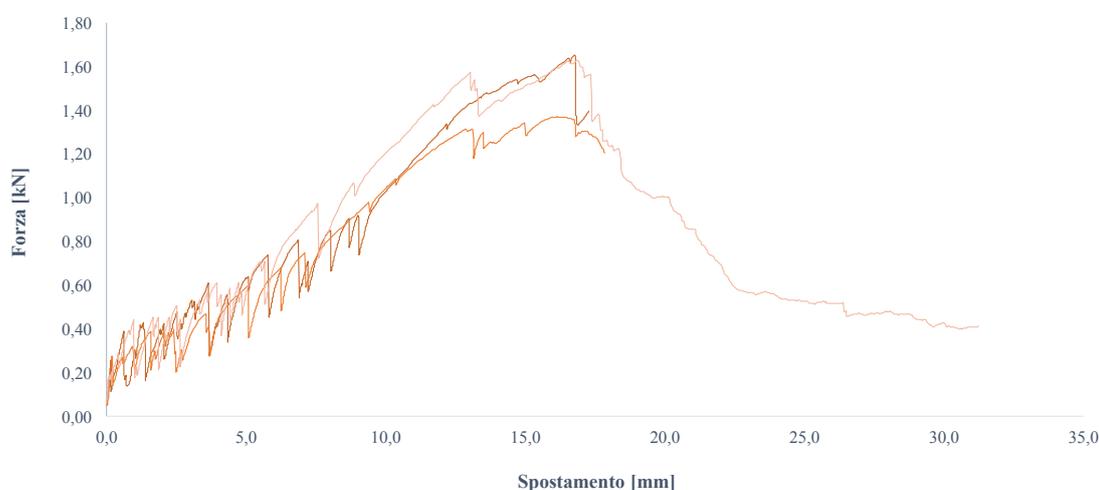


Figura 4. 92 – Diagramma forza-spostamento della placca di composito rinforzata con tessuto di lino non trattato.

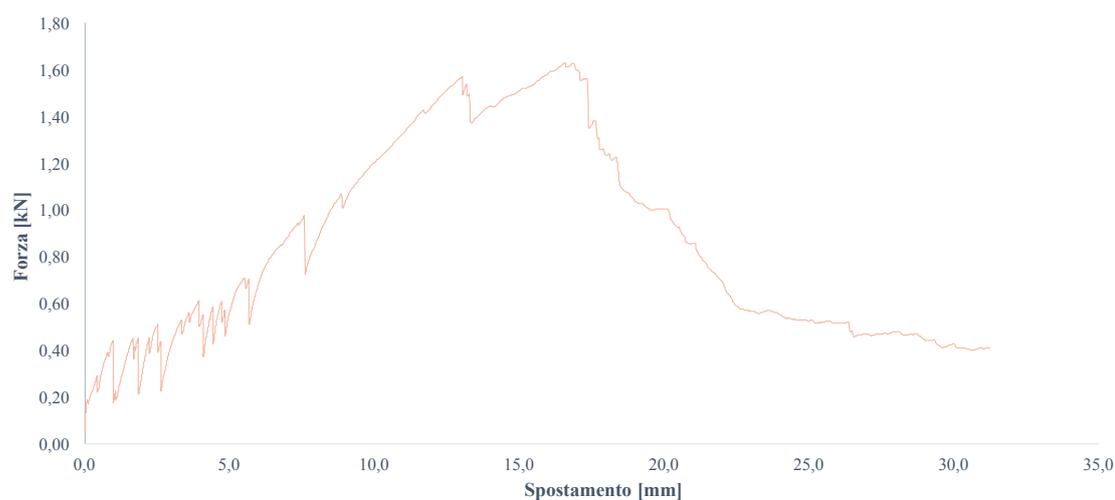


Figura 4. 93 – Diagramma forza-spostamento del provino relativo al composito, rinforzato con tessuto in fibra di lino non trattato, che risulta avere un comportamento più vicino a quello medio.

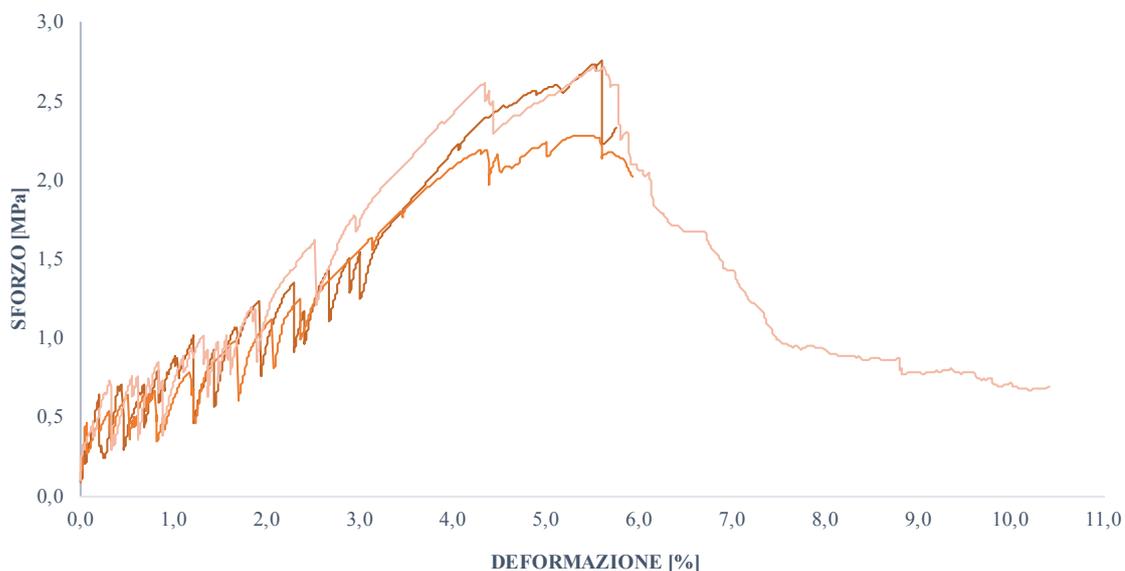


Figura 4. 94 – Diagramma sforzo-deformazione della placca di composito rinforzata con tessuto di lino non trattato.

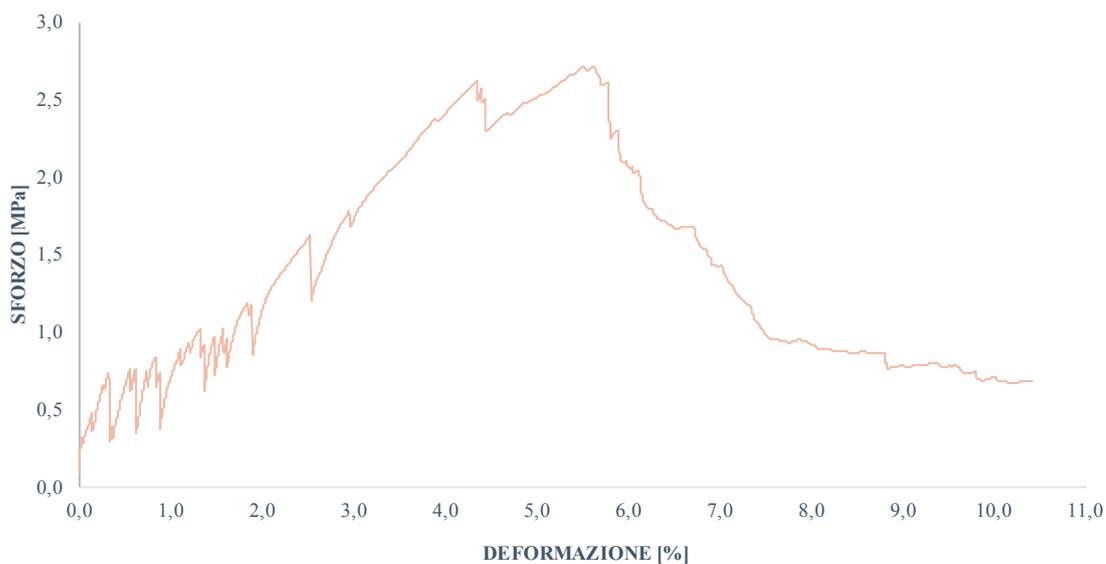


Figura 4. 95 – Diagramma sforzo-deformazione del provino relativo al composito, rinforzato con tessuto in fibra di lino non trattato, che risulta avere un comportamento più vicino a quello medio.



Figura 4. 96 – Test di trazione diretta del composito rinforzato con lino non trattato.

4.3.1.5 *Composito rinforzato con tessuto di lino trattato*

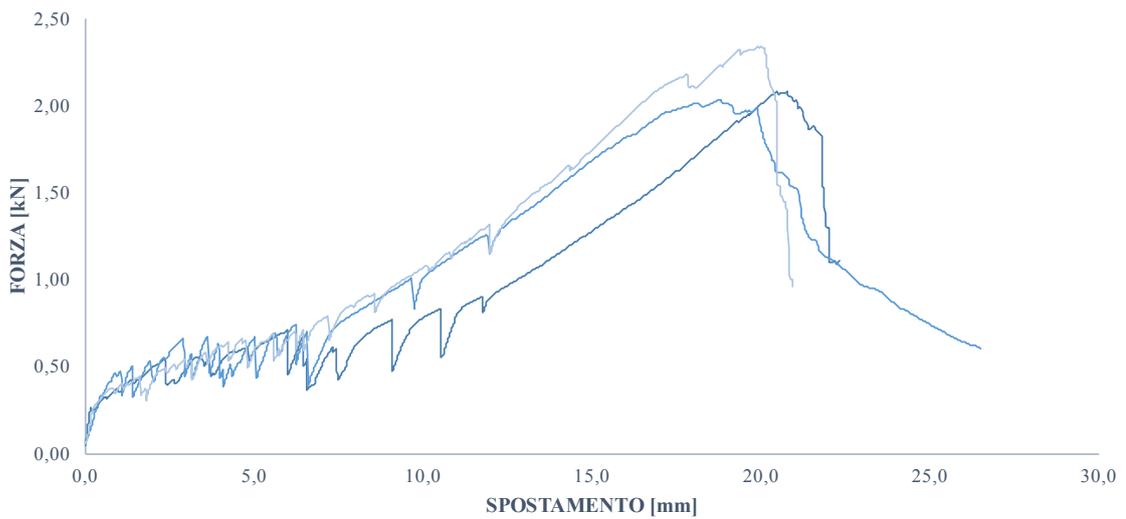


Figura 4. 97 – Diagramma forza-spostamento delle placche di composito rinforzate con due strati di tessuto di lino trattato con soluzione alcalina.

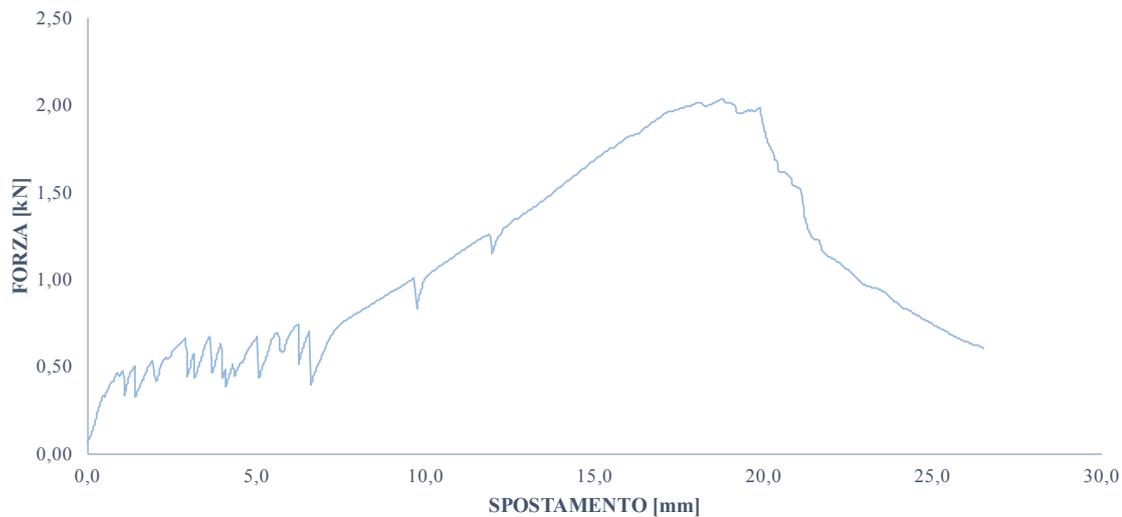


Figura 4. 98 – Diagramma forza-spostamento del provino di composito rinforzato con tessuto di lino trattato con soluzione alcalina, che ha un comportamento più vicino a quello medio.

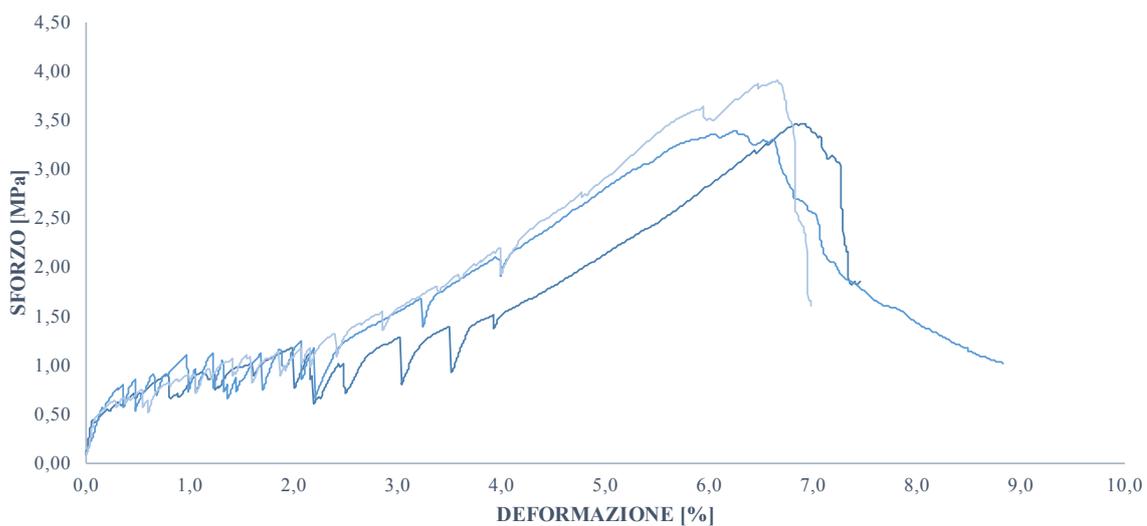


Figura 4. 99 – Diagramma sforzo-deformazione delle placche di composito rinforzate con due strati di tessuto di lino trattato con soluzione alcalina.

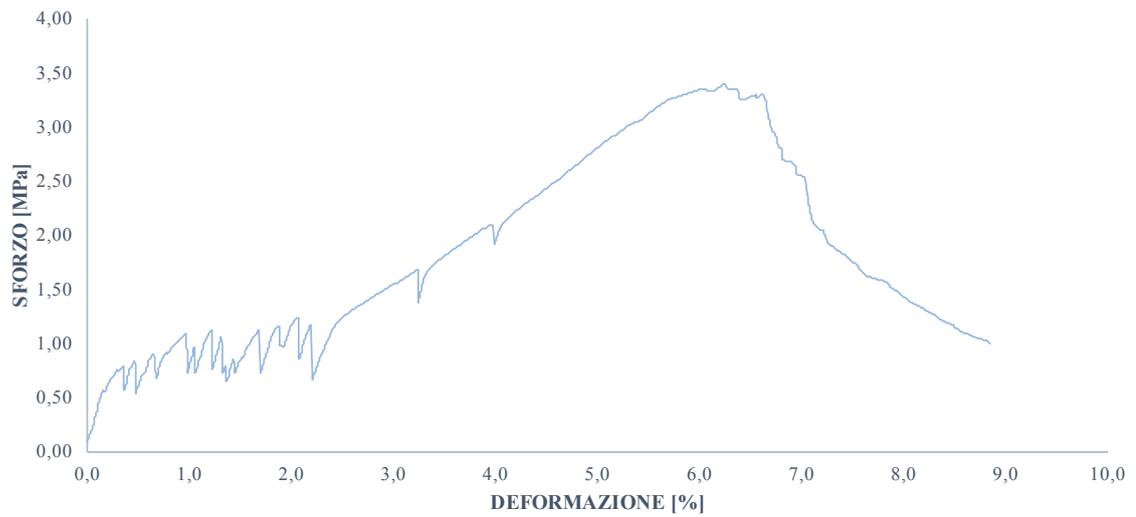


Figura 4. 100 – Diagramma sforzo-deformazione del provino di composito rinforzato con tessuto di lino trattato con soluzione alcalina, che ha un comportamento più vicino a quello medio.



Figura 4. 101 – Test di trazione diretta della placca di composito di matrice a base cementizia rinforzata con doppio strato di tessuto di fibra di lino trattato con soluzione alcalina.

4.3.1.6 Confronto placca di composito rinforzato con Lino

Di seguito si riportano i grafici di confronto, in termini di forza-spostamento e sforzo-deformazione, nel caso di composito rinforzato con tessuto di lino rispettivamente trattato e non trattato.

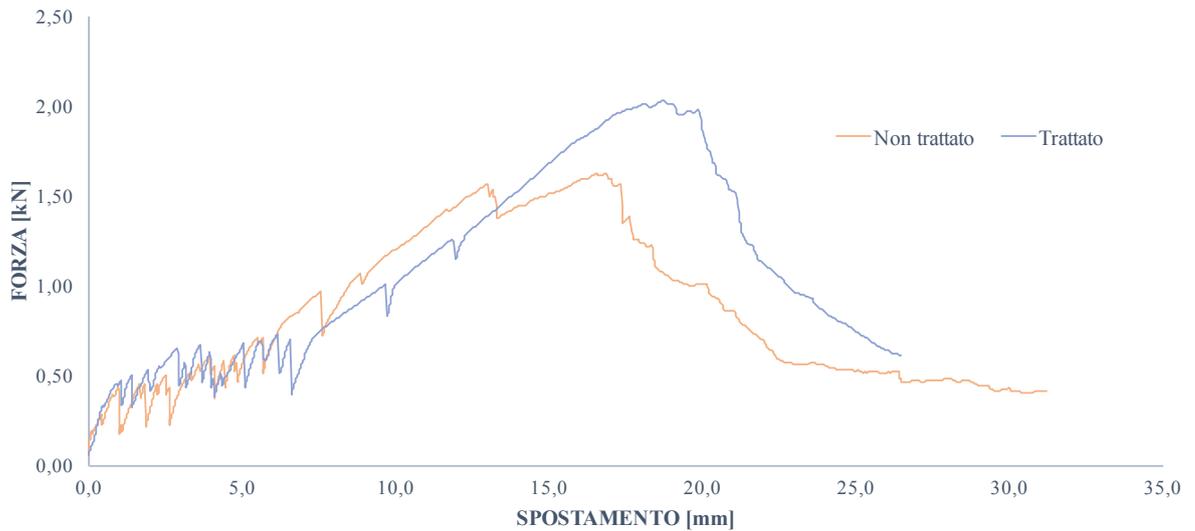


Figura 4. 102 – Diagramma forza-spostamento relativo test di trazione diretta della placca di composito rinforzata con due strati di tessuto di lino trattato e non trattato.

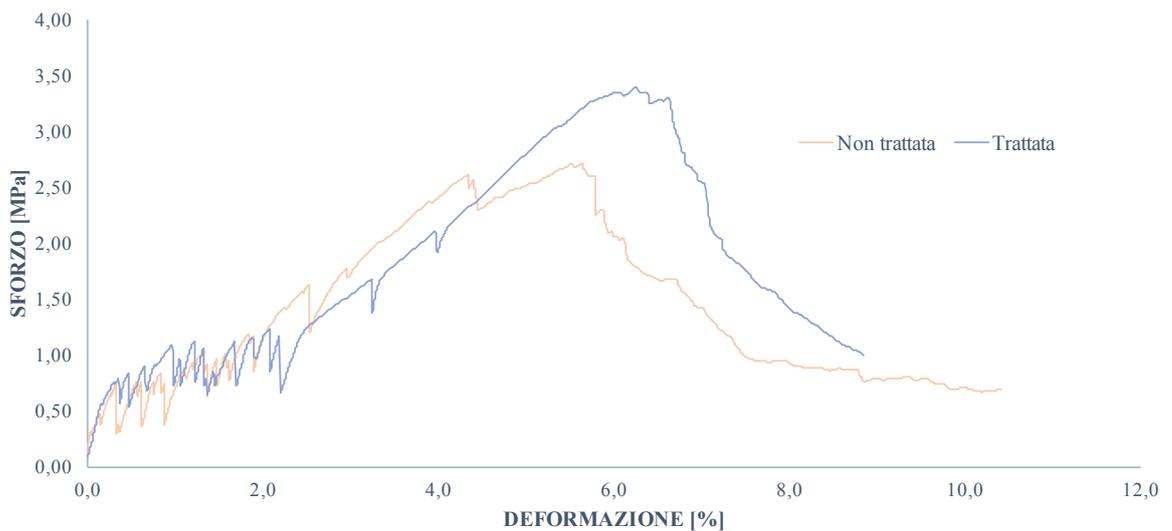


Figura 4. 103 – Diagramma sforzo-deformazione relativo test di trazione diretta della placca di composito rinforzata con due strati di tessuto in fibra di lino trattato e non trattato.

Prova	F_{u_Med}	δ_{u_Med}	σ_{u_Med}	ϵ_{u_Med}	A_{Med}	σ_{uf_NT}	E_{f_Med}	E_{f_Med}	N_{fess}
Trazione diretta	[kN]	[mm]	[Mpa]	[%]	[mm ²]	[Mpa]	[Mpa]	[Gpa]	
L_N_T	1,55	22,12	2,58	7,37	600	2,06	35,06	0,04	14
DEV.ST	0,16	7,91	0,26	0,026	-	-	-	-	-
Prova di	F_{u_Med}	δ_{u_Med}	σ_{u_Med}	ϵ_{u_Med}	A_{Med}	σ_{uf_NT}	E_{f_Med}	E_{f_Med}	N_{fess}
trazione diretta	[kN]	[mm]	[Mpa]	[%]	[mm ²]	[Mpa]	[Mpa]	[Gpa]	
L_T	2,16	23,28	3,59	7,76	600	3,03	46,30	0,05	24
DEV.ST	0,17	2,89	0,28	0,010	-	-	-	-	-

Tabella 4. 8 – Risultati relativi al test di trazione diretta del composito rinforzato con lino rispettivamente trattato e non trattato.



Figura 4. 104 – Immagine relativa al confronto tra i corpi di prova del composito rinforzato con fibra di lino non trattata e trattata dopo essere stati sottoposti a test di trazione diretta.

Come è evidente nel caso del lino il tessuto sottoposto a trattamento alcalino risponde meglio alla sollecitazione trazionale all'interno del composito, mostrando una migliore resistenza e una maggiore deformabilità prima di arrivare a rottura. Ciò è facilmente visibile anche dalla figura 4.50.

Potrebbe darsi che, la differenza riscontrata nel comportamento relativo al composito rinforzato con fibra di iuta e di lino rispettivamente, sia dovuto al fatto che il lino, avendo un numero inferiore di sostanze residue e impurità sulla superficie, ha subito solo un incremento di resistenza dovuto allo sviluppo di cristallinità con allineamento

delle fibre tipico del trattamento alcalino, che invece nel caso della iuta ha determinato anche un notevole indebolimento della fibra. In entrambi i casi però, il composito rinforzato con fibra trattata ha riportato un maggior numero di fessure antecedenti alla rottura finale.

4.3.1.7 Risultato finale

Di seguito si riporta il confronto tra le quattro tipologie di composito sottoposto a trazione diretta per la valutazione dei risultati.

Prova Trazione diretta	F_{u_Med}	δ_{u_Med}	σ_{u_Med}	ϵ_{u_Med}	A_{Med}	σ_{uf_NT}	E_{f_Med}	E_{f_Med}	N_{fess}
	[kN]	[mm]	[Mpa]	[%]	[mm ²]	[Mpa]	[Mpa]	[Gpa]	
I_N_T	1,02	13,28	1,70	4,43	600	1,54	38,33	0,04	9
DEV.ST	0,05	5,27	0,08	0,015	-	-	-	-	-
I_T	0,78	13,11	1,31	4,37	600	1,13	29,88	0,03	10
DEV.ST	0,05	3,15	0,09	1,050	-	-	-	-	-
L_N_T	1,55	22,12	2,58	7,37	600	2,06	35,06	0,04	14
DEV.ST	0,16	7,91	0,26	0,026	-	-	-	-	-
L_T	2,16	23,28	3,59	7,76	600	3,03	46,30	0,05	24
DEV.ST	0,17	2,89	0,28	0,010	-	-	-	-	-

Tabella 4. 9 – Tabella riassuntiva dei risultati relativi al test di trazione diretta nel caso di composito rinforzato con un doppio strato di tessuto in fibra di iuta, fibra di lino rispettivamente trattate e non trattate.

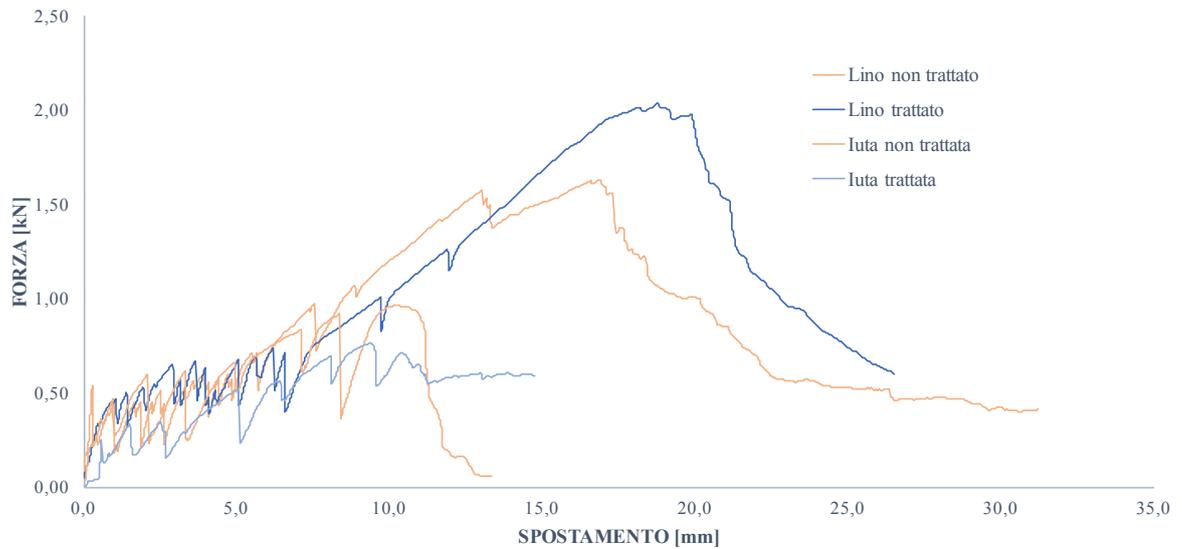


Tabella 4. 10 – Diagramma forza-spostamento delle placche di composto rinforzato, poste a confronto.

Dalla tabella sovrastante e dal grafico relativo è possibile dedurre che il sistema, costituito da matrice a base cementizia e tessuto in fibra di lino sottoposto a trattamento alcalino, ha il valore di resistenza più alto ed è caratterizzato dal maggior numero di fessure prima di raggiungere la rottura finale. Il composito in lino, inoltre, risulta avere una resistenza di valore quasi doppio rispetto allo stesso in fibra di iuta. Un parametro importante di cui si deve tener conto è la densità delle fibre la quale però non è molto differente, infatti il lino ha una densità di $1,50 \text{ g/cm}^3$ e la iuta di $1,45 \text{ g/cm}^3$.

4.4 Compressione diagonale

In questo capitolo si vuole descrivere la prova di compressione diagonale, che è stata effettuata a 6 pareti, il caso di parete priva di composito fibro-rinforzato, il caso di parete rinforzata con composito in fibra di iuta non trattata e il caso di parete rinforzata con composito in fibra di lino trattato. Avendo osservato nelle prove precedenti come il composito in fibra di iuta abbia delle caratteristiche minori in termini di tenacità e numero di fessure presenti a trazione rispetto allo stesso in fibra di lino e, rispettivamente, per entrambe le tipologie, che il tessuto trattato ha presentato una migliore compatibilità con la matrice, si è scelto di effettuare la prova di compressione diagonale ai casi estremi, ovvero quello che ha presentato il risultato

meno soddisfacente e quello che al contrario ha mostrato un esito apprezzabile dal punto di vista energetico. Inoltre, la prova di trazione per le placche di composito ha mostrato un miglior risultato nel caso della iuta non trattata e del lino trattato, che proprio per questo sono stati scelti per essere sottoposti alla prova di compressione diagonale.

La prova di compressione diagonale consente la determinazione della resistenza a taglio di piccoli muri che siano rappresentativi di una porzione di muratura. La prova è regolamentata dalla norma americana ASTM E519-02. Per le ASTM il pannello deve essere approssimativamente quadrato con dimensione standard di 120x120 cm, o metà scala modellare con 60x60 cm. Durante la prova vengono misurati gli allungamenti lungo le diagonali del pannello, ma nel caso in esame non è stato possibile aggiungere dei sensori LVDT, quindi si è scelto di calcolare gli spostamenti in funzione della carica registrata dalla macchina e della velocità di prova che nel caso in esame è stata di 0,6 mm/min.

La macchina adoperata per la prova di compressione diagonale è la stessa che è stata utilizzata per la caratterizzazione del comportamento a compressione dei cilindri di malta. La cella di carico massima è stata impostata a 200 kN.

Lungo la diagonale del pannello murario, in alto e alla base sono stati impiegati due ancoraggi metallici, con lo scopo di trasferire la forza dalla macchina al corpo di prova. Le dimensioni di quest'ultimi sono state definite dalla normativa.

Durante la prova, una piastra della macchina risulta fissa mentre l'altra può allineare liberamente i campioni prima che inizi la prova. Dopo aver verificato che la posizione della parete risulti perfettamente allineata con la diagonale, è possibile iniziare la prova.

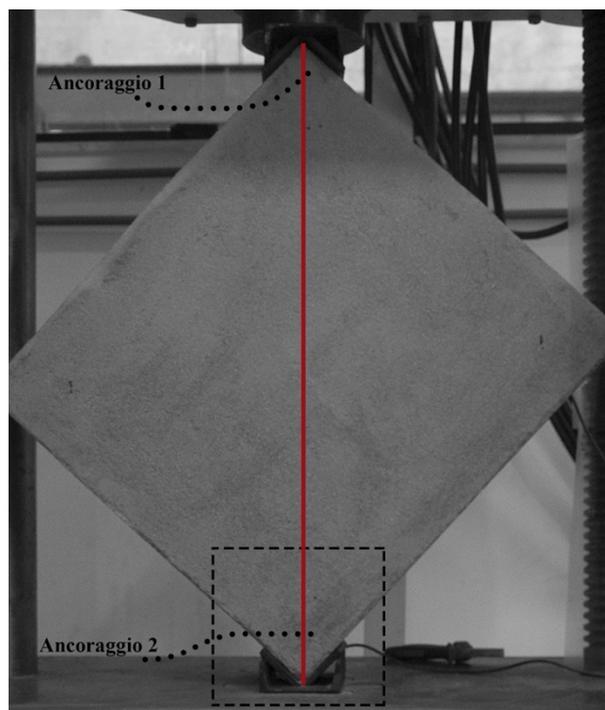


Figura 4. 105 – Perfetto allineamento del pannello murario nella macchina di prova prima di dare inizio alla prova di compressione diagonale.

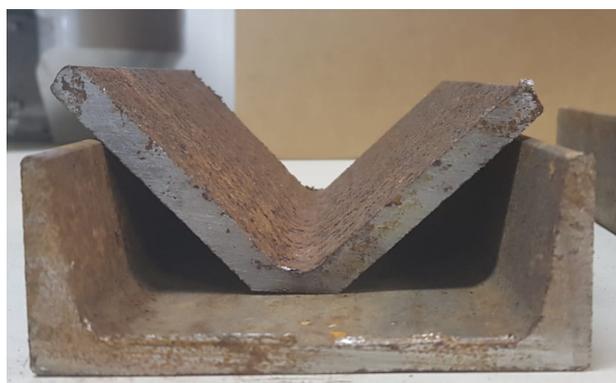


Figura 4. 106 – Ancoraggio metallico applicato in alto e alla base della muratura durante la prova di compressione diagonale per il trasferimento del carico dalla macchina al corpo di prova.

4.4.1 Realizzazione della muratura

La muratura è stata realizzata con mattoni pieni in laterizio con dimensioni rispettivamente di 19x9x5 cm. Per motivi legati alla dimensione della macchina per il test di compressione diagonale, sono state realizzate pareti con dimensioni di 60x60 cm, ovvero con metà scala modellare.



Figura 4. 107 – Muratura in laterizio pieno 60 cm x 60 cm.

La malta utilizzata nella realizzazione della muratura è la stessa progettata nella prima fase di studio. Quest'ultima ha presentato una buona lavorabilità sia per l'applicazione verticale che come giunzione dei mattoni.

Per l'applicazione del rinforzo in fibra naturale alla muratura, sono stati effettuati una serie di passaggi che hanno garantito la corretta applicazione e adesione del tessuto al pannello murario:

1. Bagnare il laterizio così da migliorare la presa in verticale della malta;
2. La malta deve essere sempre mantenuta in movimento affinché mantenga la sua fluidità;
3. Applicare un sottile strato di malta con la cazzuola e stendere lo stesso al fine di omogeneizzare con un frattazzo;
4. Bagnare il tessuto in acqua e applicarlo allo strato di malta appena omogeneizzato sulla parete, stendendolo in modo da estenderlo su tutta la parete senza creare pieghe;
5. Assicurare l'adesione del tessuto battendo con la mano sullo stesso favorendo così l'attraversamento della malta lungo le aperture del tessuto stesso;
6. Applicare una seconda colata di malta evitando questa volta l'uso del frattazzo che potrebbe favorire il distacco del primo layer di tessuto;
7. Applicare il secondo tessuto in fibra come fatto per il precedente;

8. Applicare lo strato di malta finale, tramite cazzuola e frattazzo effettuando movimenti dall'alto verso il basso, favorendo così la massima aderenza del composto alla parete.



Figura 4. 108 – Applicazione del composto di rinforzo alla parete 1 lato A.



Figura 4. 109 – Applicazione del composto di rinforzo alla parete 2.



Figura 4. 110 – Applicazione del composto di rinforzo alla parete 1 lato B.

4.4.2 Pannello murario privo di rinforzo

La prima prova di compressione diagonale del pannello murario è stata effettuata su una parete priva di rinforzo in fibra, necessaria per la valutazione della tenacità legata all'uso del composto di rinforzo.



Figura 4. 111 – Test di compressione diagonale della parete priva di rinforzo.

Nel caso della parete priva di rinforzo il test di compressione diagonale ha mostrato un comportamento fragile, infatti, il momento successivo al raggiungimento della carica massima, è stato caratterizzato dalla frattura del pannello e quindi la fine della prova.



Figura 4. 112 – Rottura fragile della parete priva di rinforzo in fibra.

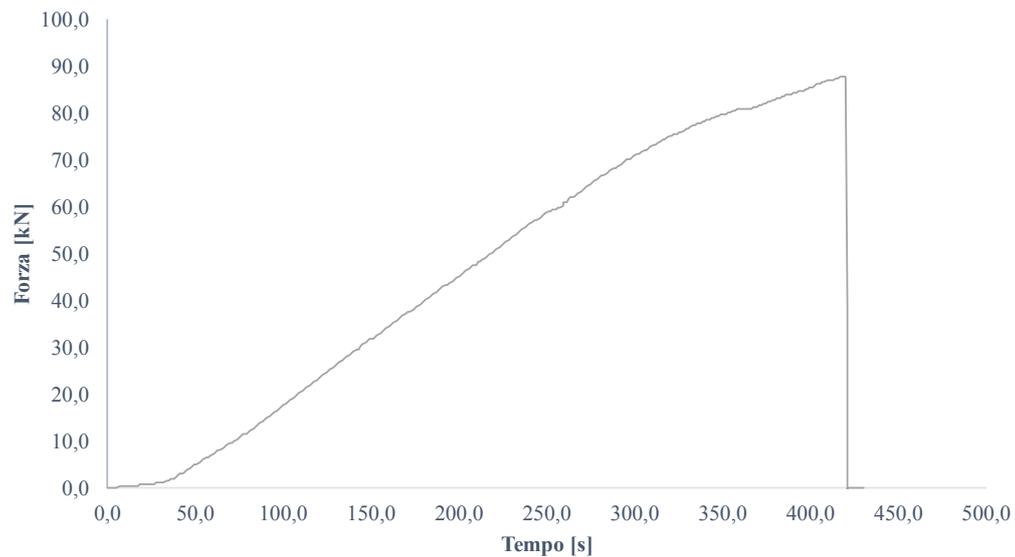


Figura 4. 113 – Diagramma Forza-Tempo del primo pannello murario sottoposto a compressione diagonale, privo di rinforzo in fibra.

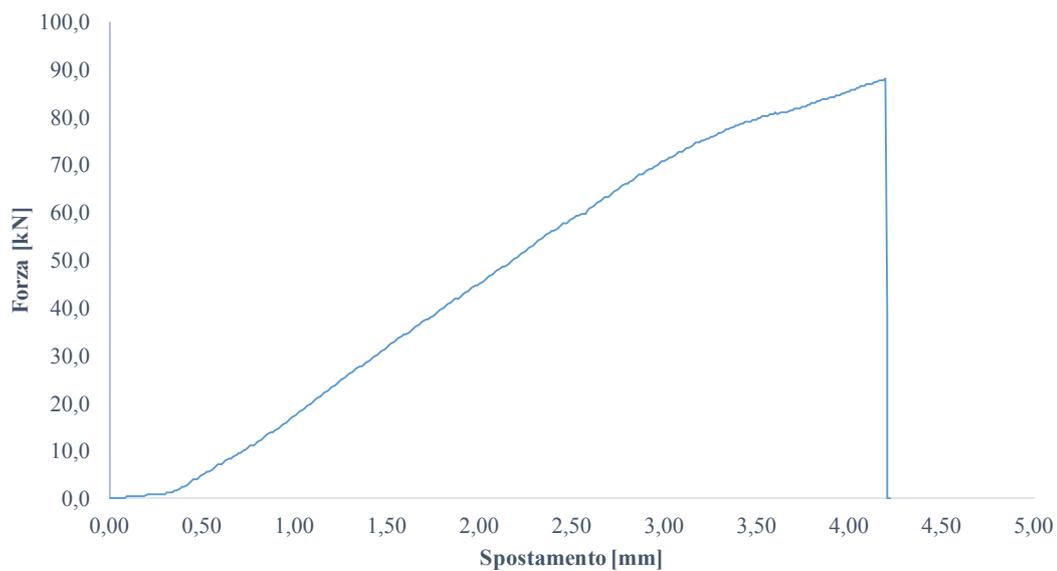


Figura 4. 114 – Diagramma Forza-Spostamento del primo pannello murario sottoposto a compressione diagonale, privo di rinforzo in fibra.

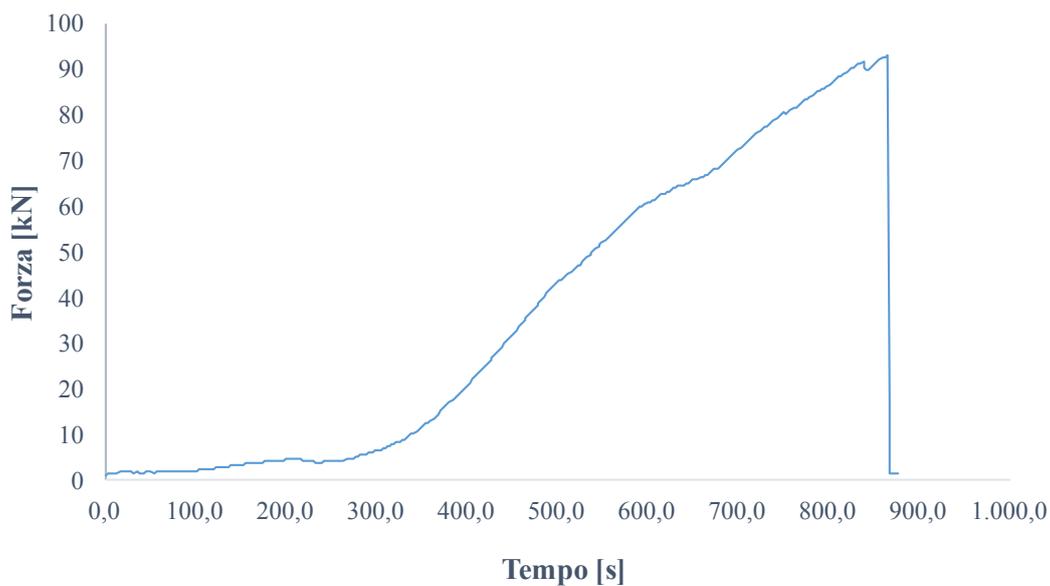


Figura 4. 115 – Diagramma Forza-Tempo del secondo pannello murario sottoposto a compressione diagonale, privo di rinforzo in fibra.

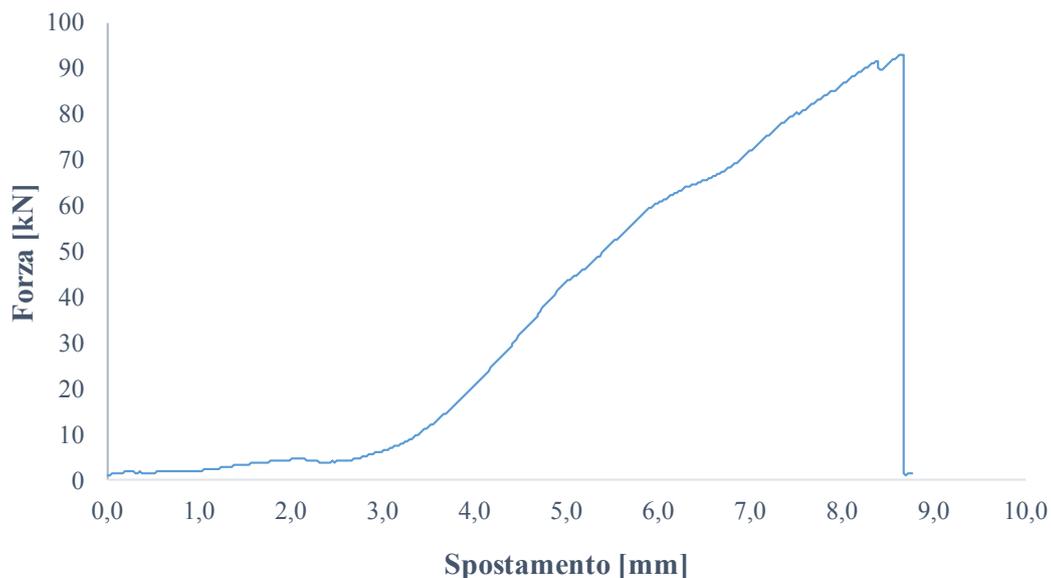


Figura 4. 116 – Diagramma Forza-Spostamento del secondo pannello murario sottoposto a compressione diagonale, privo di rinforzo in fibra.

4.4.3 Pannello murario fibro-rinforzato

Di seguito si riportano i risultati relativi ai pannelli murari, rinforzati con fibra di iuta non trattata e rinforzati con fibra di lino trattato, i quali sono stati sottoposti alla prova di compressione diagonale. La scelta di effettuare la prova sui due nasce dal fatto che nel confronto relativo alle placche di composito, essi hanno ottenuto il miglior ed il peggior risultato, nel caso della iuta trattata e non, e nel caso del lino trattato e non, in termini di tenacità e capacità di fessurare prima del collasso. La prova di compressione diagonale fornisce il diagramma forza-spostamento mostrato in figura 4.118. Dalla curva $P-\delta$ è possibile ottenere importanti informazioni. Il rinforzo in fibra lavora nella fase successiva alla frattura, quindi dall'approccio proposto da Fantilli et al. è possibile quantificare l'effetto che il composito fibro-rinforzato conferisce alle murature. Partendo dalle curve $P-\delta$ rappresentate in figura è stato possibile introdurre un nuovo diagramma relativo alla fase successiva alla frattura tramite una normalizzazione. Il valore della forza normalizzata ($y = P/P_{max}$) è stato riportato lungo le ordinate, diversamente in ascisse si è riportata la differenza tra lo spostamento dopo la frattura e lo spostamento generico ($x = \delta - \delta_p$).

Tutti i diagrammi relativi alla fase successiva al picco sono stati limitati al valore in ascissa di 4 mm. La duttilità del sistema composito, inoltre, può essere quantificata calcolando l'area A_F delimitata dalle curve della fase successiva al picco (vedi figura 4.120). Per facilitare l'analisi dei risultati, è stata introdotta un'ulteriore semplificazione, la curva della fase successiva al picco in figura 4.120, infatti, può essere approssimata tramite una relazione bilineare come mostrato in figura 4.121. Il dato più importante nella fase prima del picco è la forza massima P_{max} , e il relativo spostamento δ_p . Il carico residuo della fase successiva al picco può essere quantificato tramite l'area A_F , le coordinate $[x_1, y_1]$ e $[4\text{mm}, y_2]$. Dunque, il valore dell'area A_F , che rappresenta la capacità della fibra di intervenire nella fase successiva al picco conferendo tenacità al sistema, può essere determinata dalla seguente formula:

$$A_F = \frac{1 + y_1}{2} \cdot x_1 + \frac{y_1 + y_2}{2} \cdot (4 - x_1)$$

dove, y_1 = percentuale del carico residuo appena prima la rottura; y_2 = percentuale di carico residuo in presenza di grandi fratture; e x_1 = ascissa (in mm) corrispondente all'ordinata y_1 .

Migliore è la fibra in termini di prestazioni, più alto è il valore di y_1 , mentre maggiore è la tenacità del composito, più elevati sono i valori di A_F e y_2 .

4.4.3.1 Pannello fibro-rinforzato in fibra di iuta

Di seguito si riportano le immagini, i diagrammi e le tabelle relative ai dati prodotti dalla prova di compressione diagonale relativa a due pannelli murari rinforzati con fibra di iuta non trattata.



Figura 4. 117 – Immagini relative alla prova di compressione diagonale della prima parete in muratura rinforzata con tessuto di iuta non trattato.

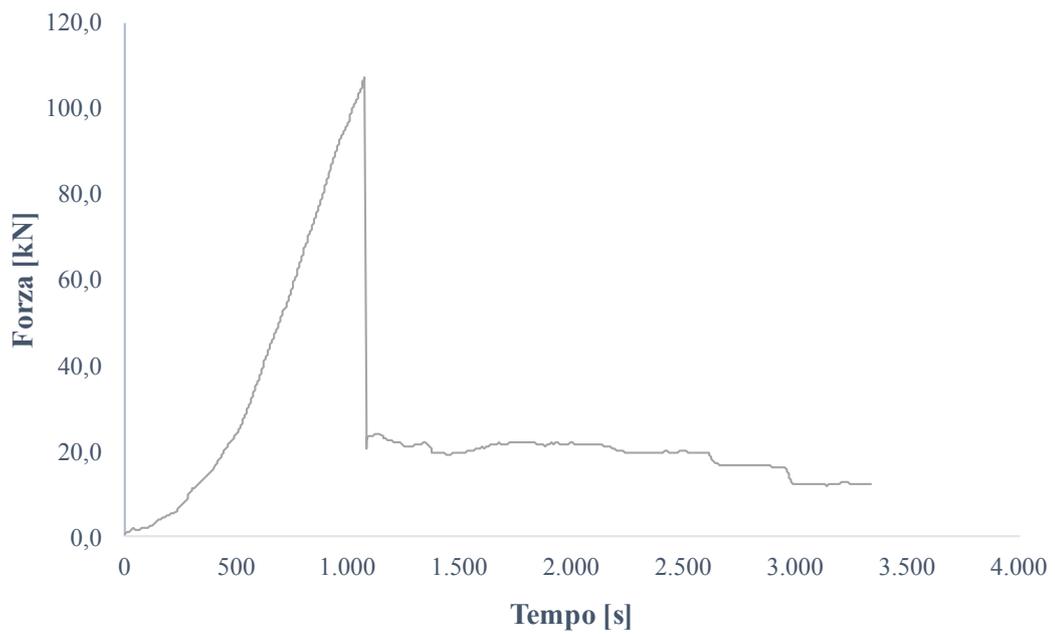


Figura 4. 118 – Risultato in termini di forza-tempo della prova di compressione diagonale della prima parete in muratura rinforzata con tessuto di iuta non trattato.

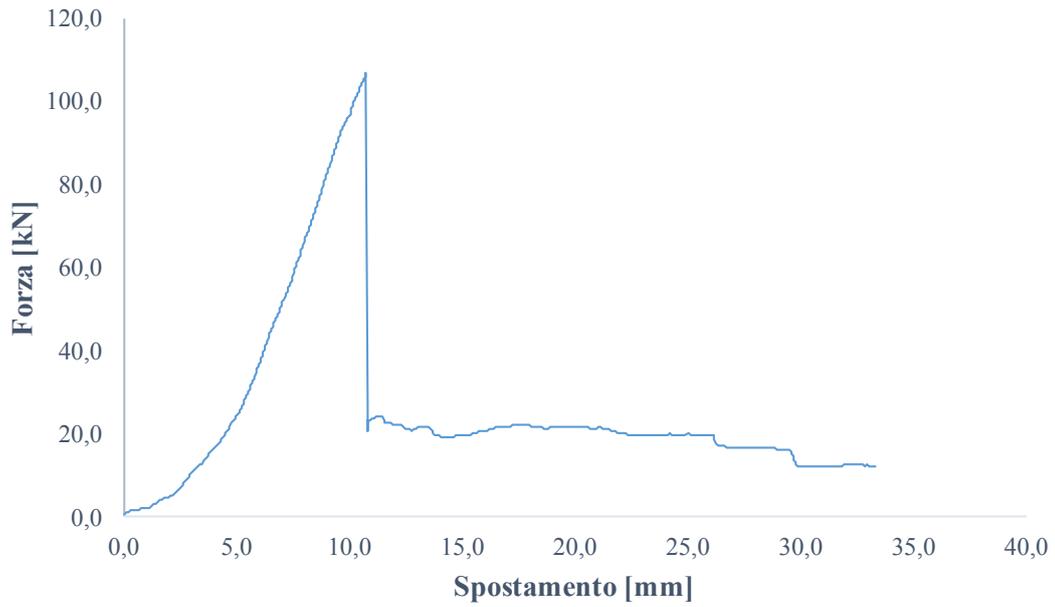


Figura 4. 119 – Risultato in termini di forza-spostamento della prova di compressione diagonale della prima parete in muratura rinforzata con tessuto di iuta non trattato.

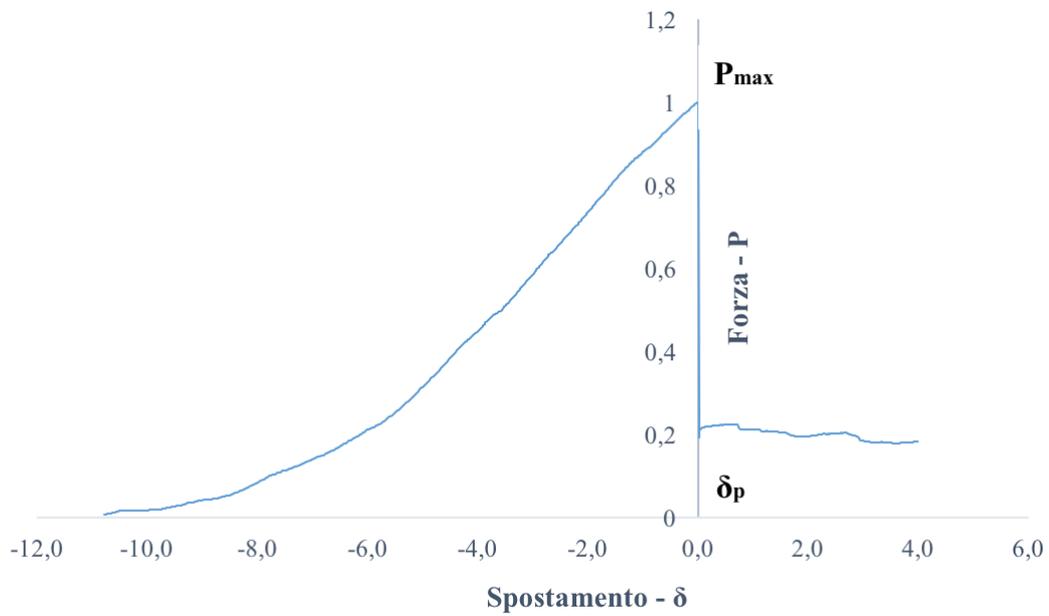


Figura 4. 120 – Diagramma P - δ della prima parete rinforzata con tessuto di iuta non trattato, sottoposta a compressione diagonale.

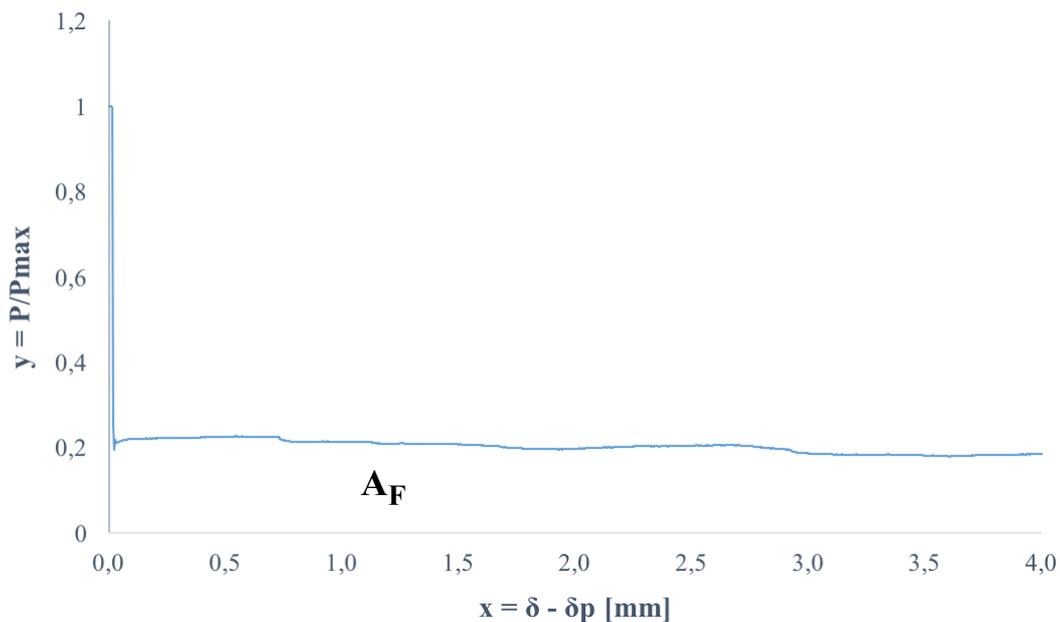


Figura 4. 121 – Comportamento dopo il picco della prima parete rinforzata con fibra di iuta non trattata, sottoposta a compressione diagonale.

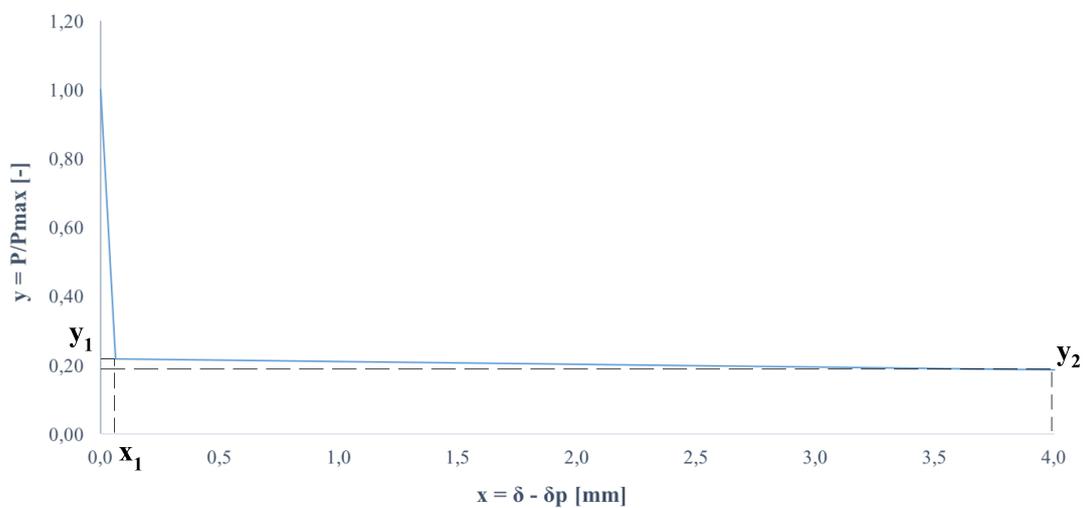


Figura 4. 122 – Relazione bilineare utilizzata per quantificare l'incremento di tenacità dovuto alla presenza del tessuto in fibra per la prima parete rinforzata con fibra di iuta non trattata, sottoposta a compressione diagonale.

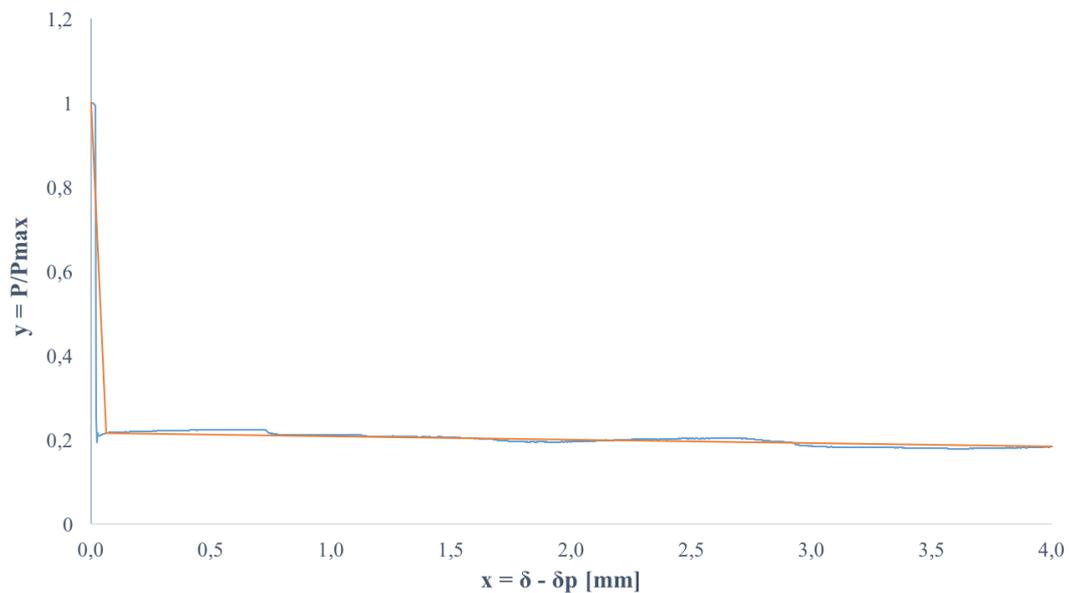


Figura 4. 123 – Sovrapposizione dei grafici relativi alla linearizzazione del comportamento della prima parete dopo il picco, rinforzata con iuta non trattata, sottoposta alla prova di compressione diagonale.



Figura 4. 124 – Immagini relative alla prova di compressione diagonale della seconda parete in muratura rinforzata con tessuto di iuta non trattato.

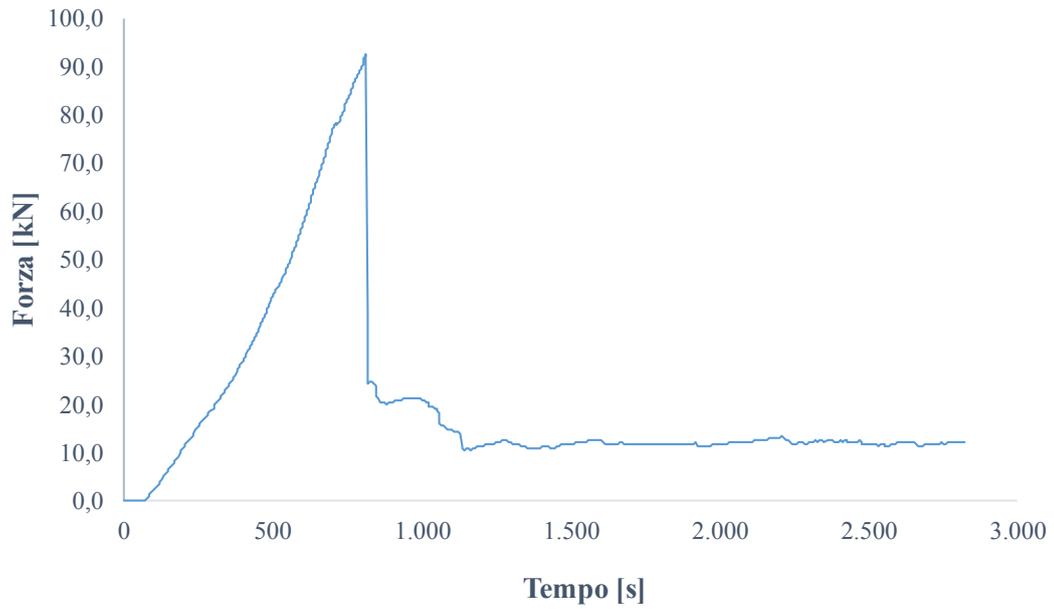


Figura 4. 125 – Risultato in termini di forza-tempo della prova di compressione diagonale della seconda parete in muratura rinforzata con tessuto di iuta non trattato.

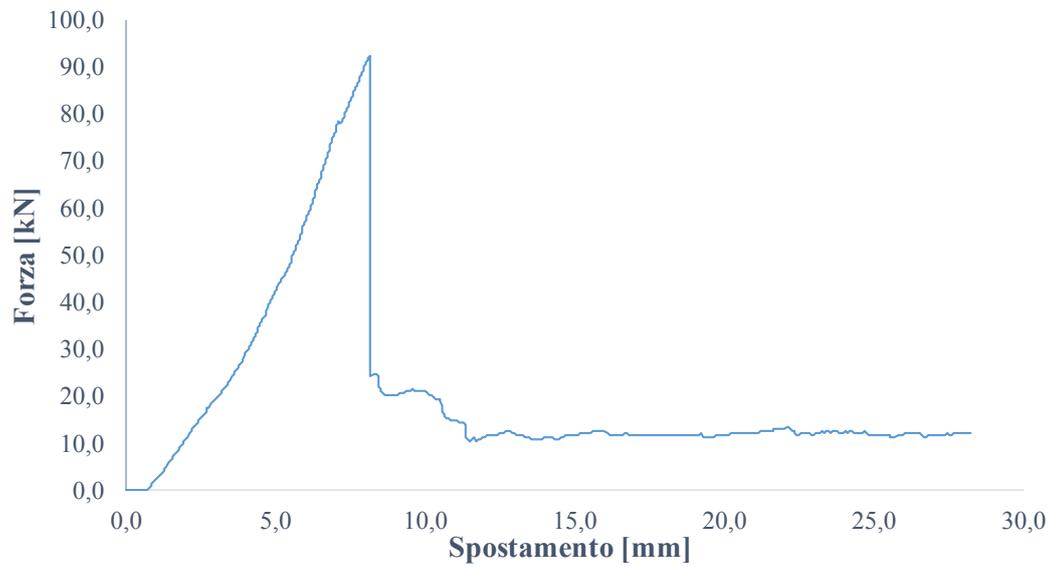


Figura 4. 126 – Risultato in termini di forza-spostamento della prova di compressione diagonale della seconda parete in muratura rinforzata con tessuto di iuta non trattato.

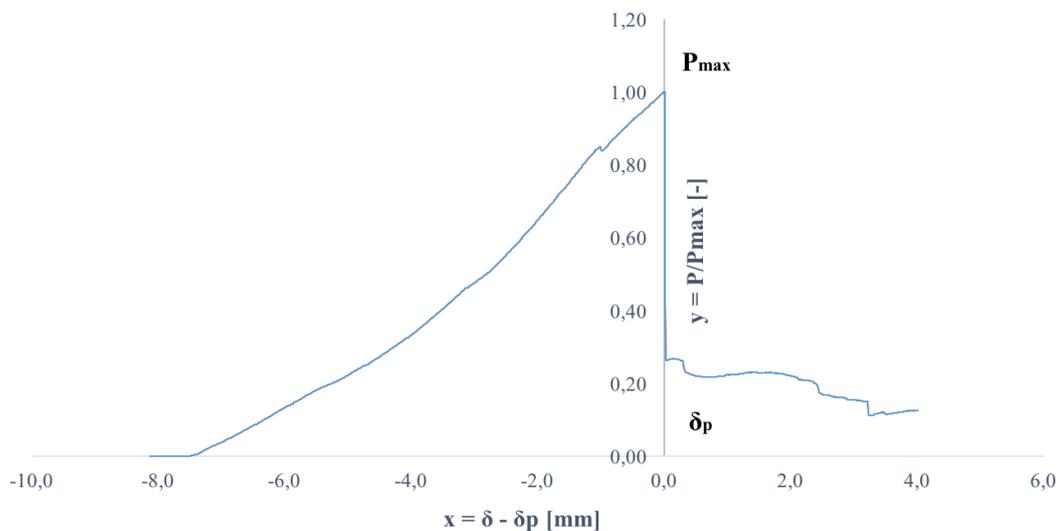


Figura 4. 127 – Diagramma P - δ della seconda parete rinforzata con tessuto di iuta non trattato, sottoposta a compressione diagonale.

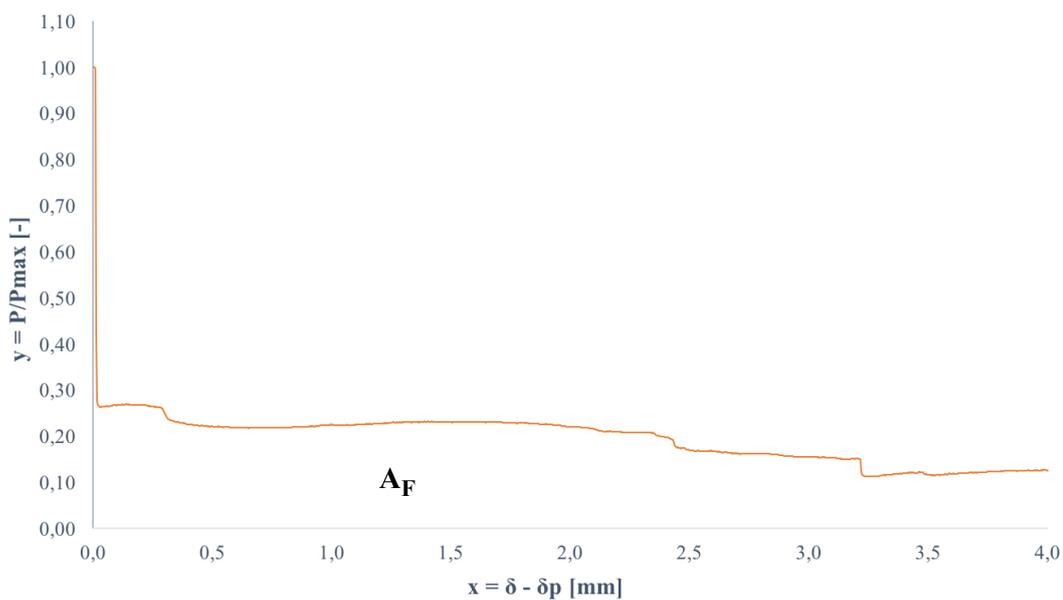


Figura 4. 128 – Comportamento dopo il picco della seconda parete rinforzata con fibra di iuta non trattata, sottoposta a compressione diagonale.

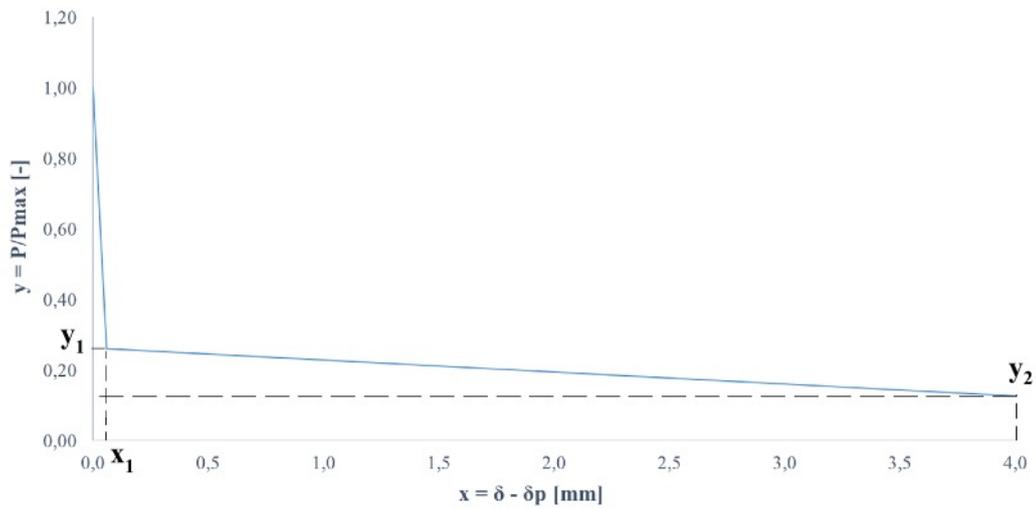


Figura 4. 129 – Relazione bilineare utilizzata per quantificare l’incremento di tenacità dovuto alla presenza del tessuto in fibra per la seconda parete rinforzata con fibra di iuta non trattata, sottoposta a compressione diagonale.

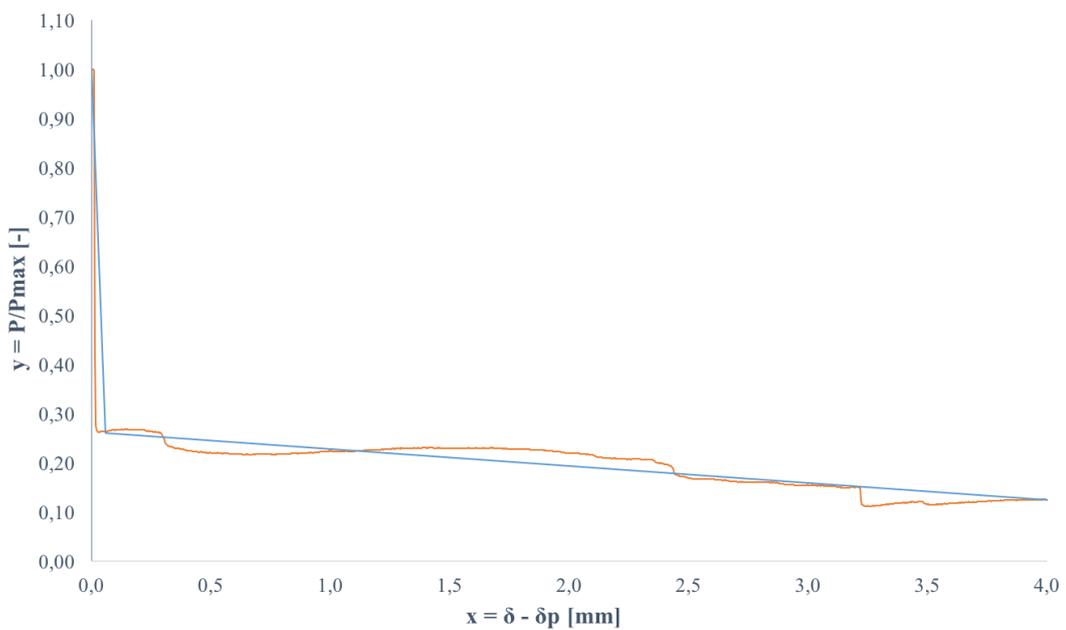


Figura 4. 130 – Sovrapposizione dei grafici relativi alla linearizzazione del comportamento della seconda parete dopo il picco, rinforzata con iuta non trattata, sottoposta alla prova di compressione diagonale.

Campione	F_{max} kN	s_p mm	γ_1 -	γ_2 -	A_F mm
Iuta_1	107,19	10,78	0,22	0,18	0,828
Iuta_2	92,55	8,13	0,26	0,13	0,795

Tabella 4. 11 – Principali risultati relativi alla prova di compressione diagonale di due pannelli murari rinforzati con il composito in fibra di iuta.

4.4.3.2 Pannello fibro-rinforzato in fibra di lino

Di seguito si riportano le immagini, i diagrammi e le tabelle relative ai dati prodotti dalla prova di compressione diagonale relativa a due pannelli murari rinforzati con fibra di lino trattata.



Figura 4. 131 – Immagini relative alla prova di compressione diagonale della prima parete in muratura rinforzata con tessuto di lino trattato.

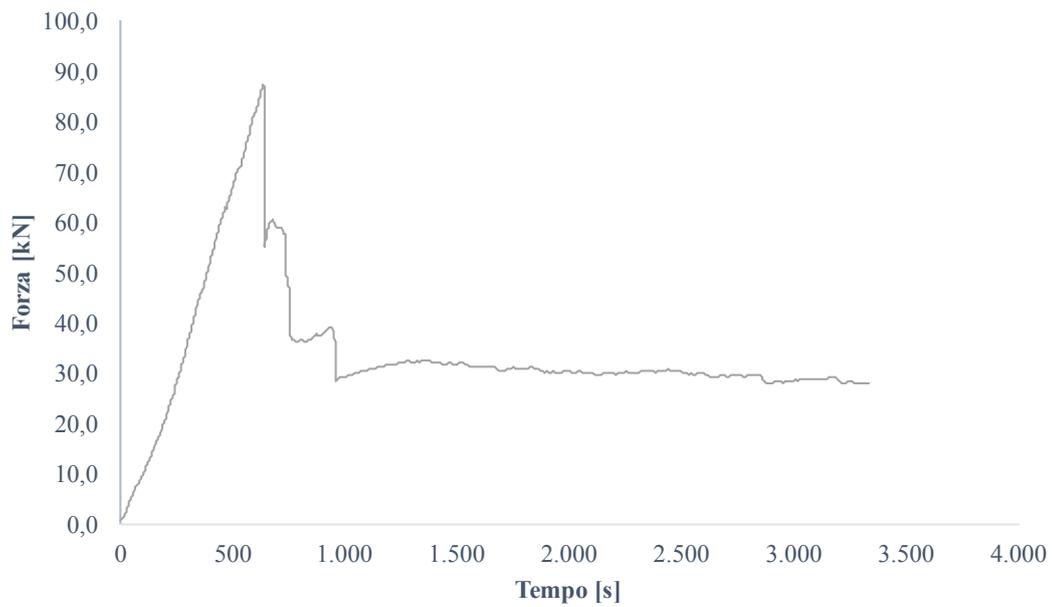


Figura 4. 132 – Risultato in termini di forza-tempo della prova di compressione diagonale della prima parete in muratura rinforzata con tessuto di lino trattato.

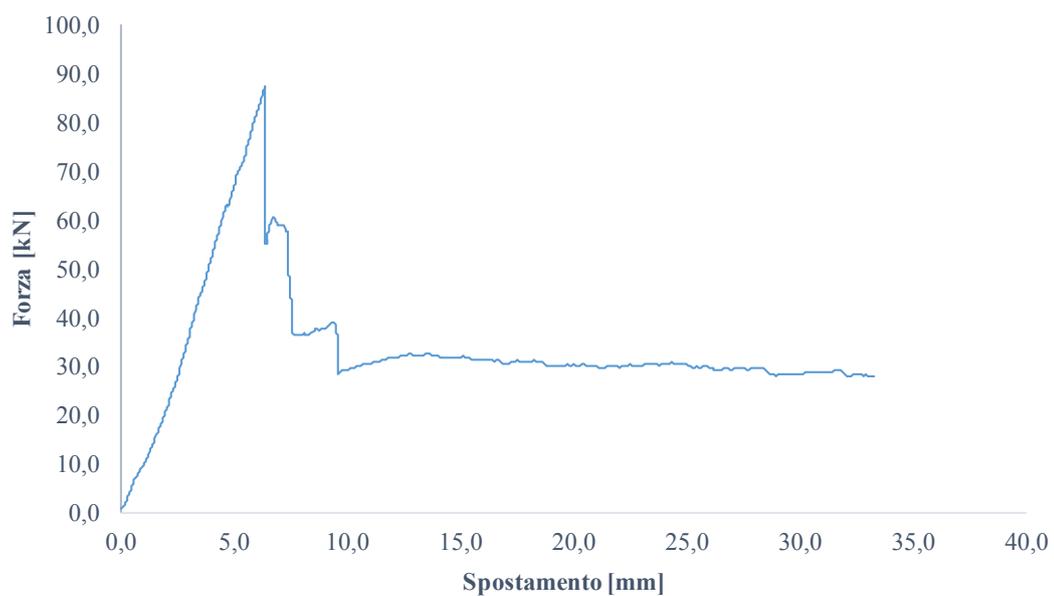


Figura 4. 133 – Risultato in termini di forza-spostamento della prova di compressione diagonale della prima parete in muratura rinforzata con tessuto di lino trattato.

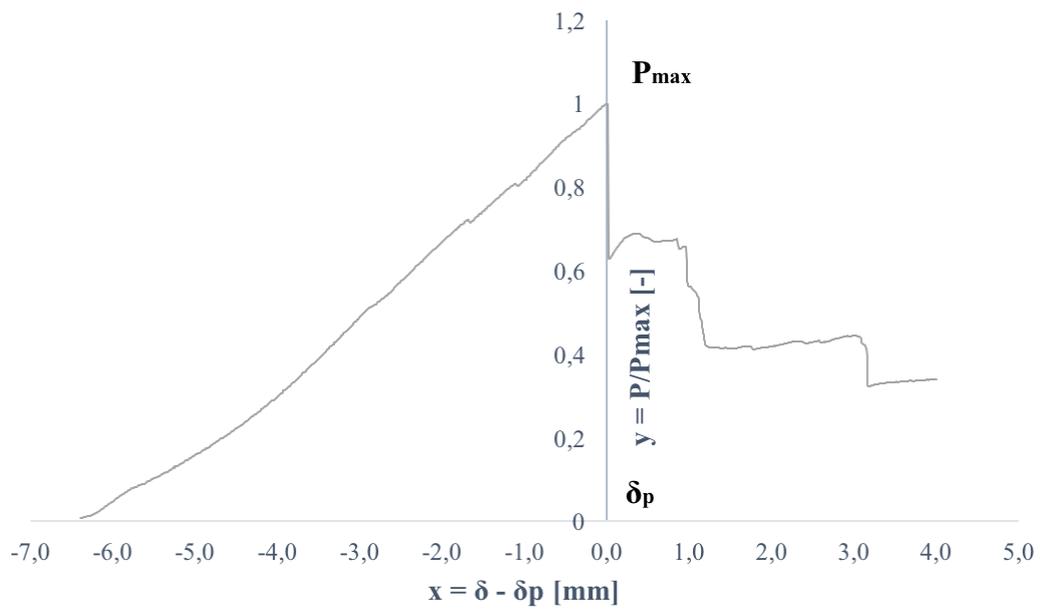


Figura 4. 134 – Diagramma P - δ della prima parete rinforzata con tessuto di lino trattato, sottoposta a compressione diagonale.

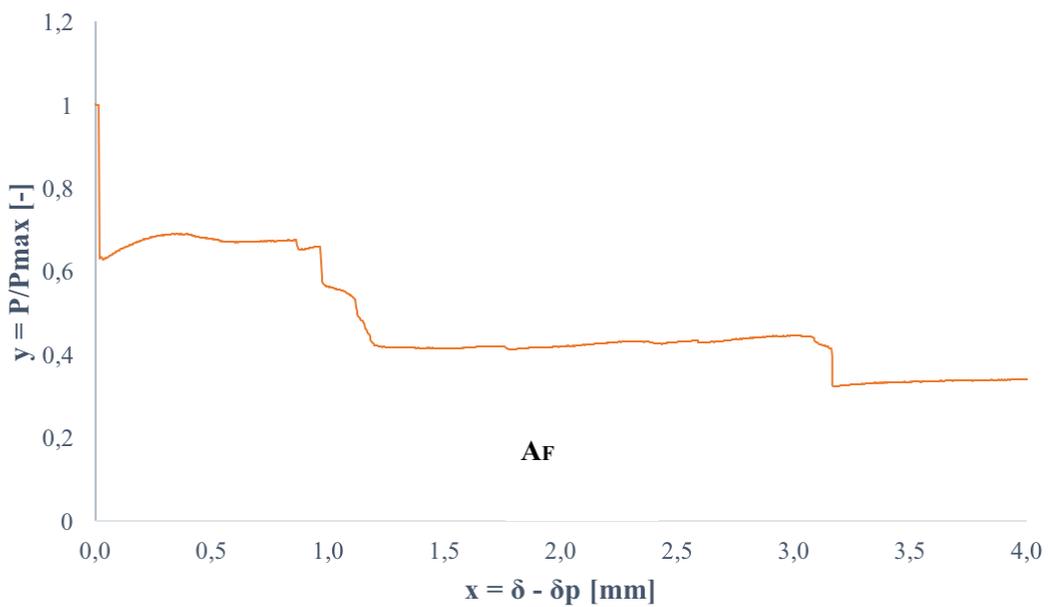


Figura 4. 135 – Comportamento dopo il picco della prima parete rinforzata con fibra di lino trattato, sottoposta a compressione diagonale.

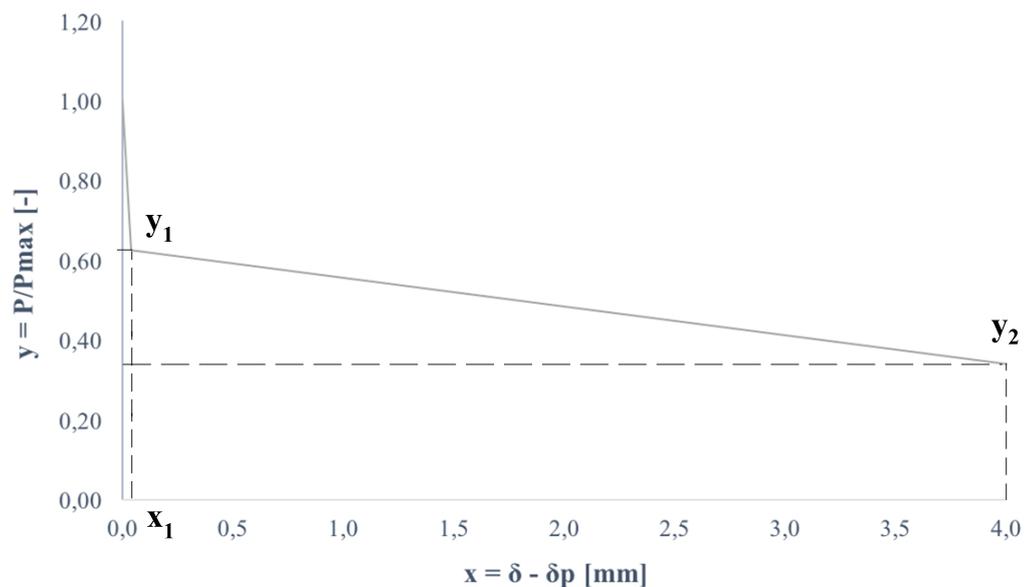


Figura 4. 136 – Relazione bilineare utilizzata per quantificare l'incremento di tenacità dovuto alla presenza del tessuto in fibra per la prima parete rinforzata con fibra di lino trattata, sottoposta a compressione diagonale.

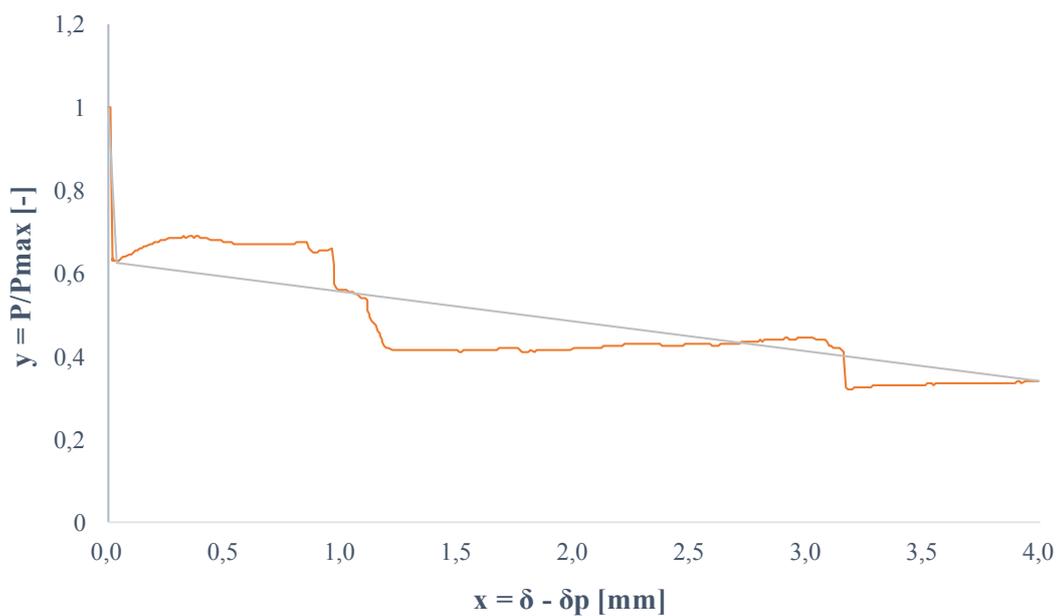


Figura 4. 137 – Sovrapposizione dei grafici relativi alla linearizzazione del comportamento della prima parete dopo il picco, rinforzata con lino trattato, sottoposta alla prova di compressione diagonale.

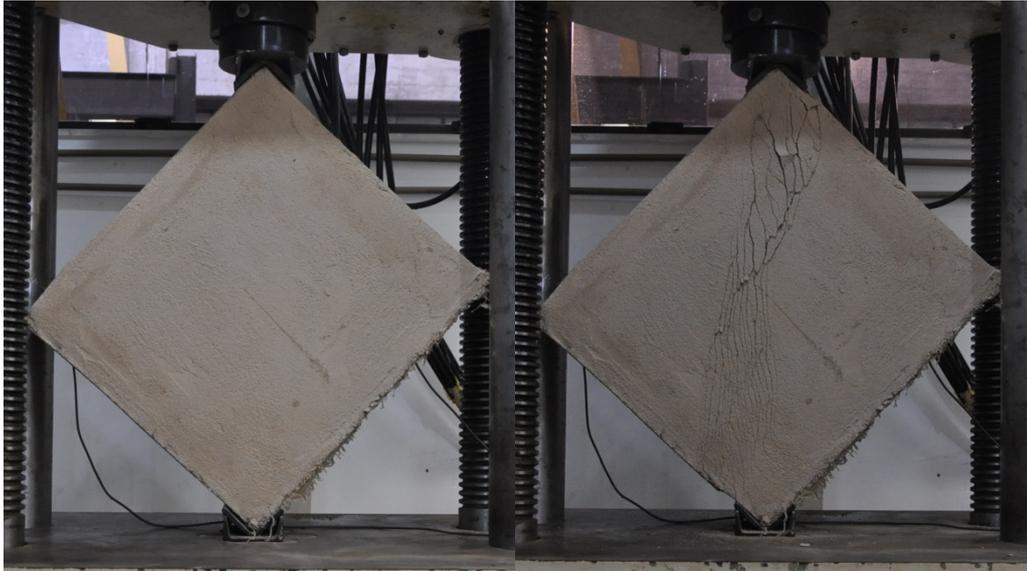


Figura 4. 138 – Immagini relative alla prova di compressione diagonale della seconda parete in muratura rinforzata con tessuto di lino trattato.

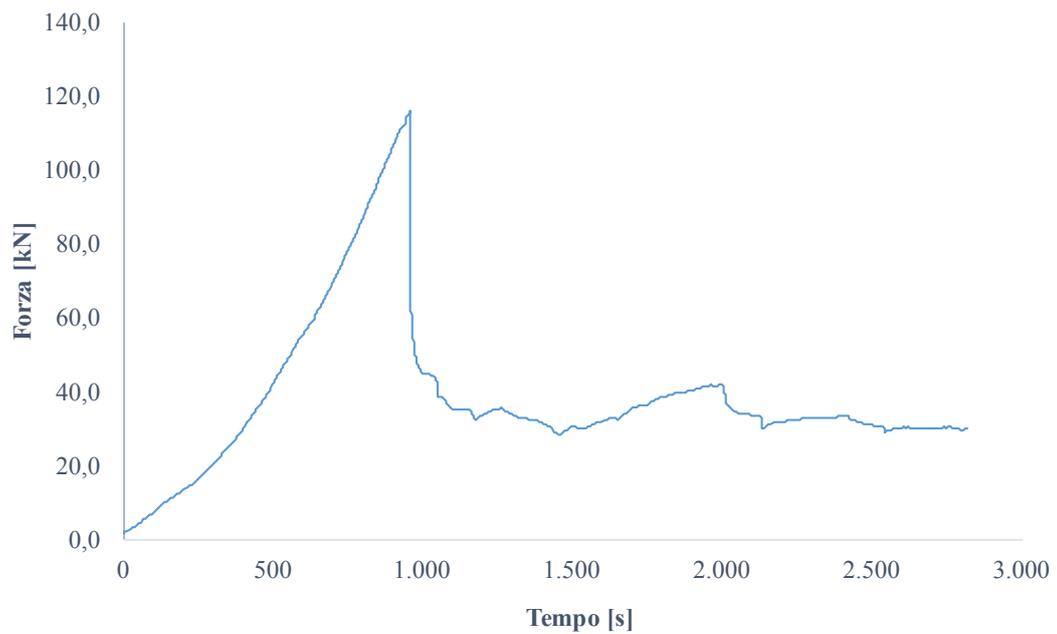


Figura 4. 139 – Risultato in termini di forza-tempo della prova di compressione diagonale della seconda parete in muratura rinforzata con tessuto di lino trattato.

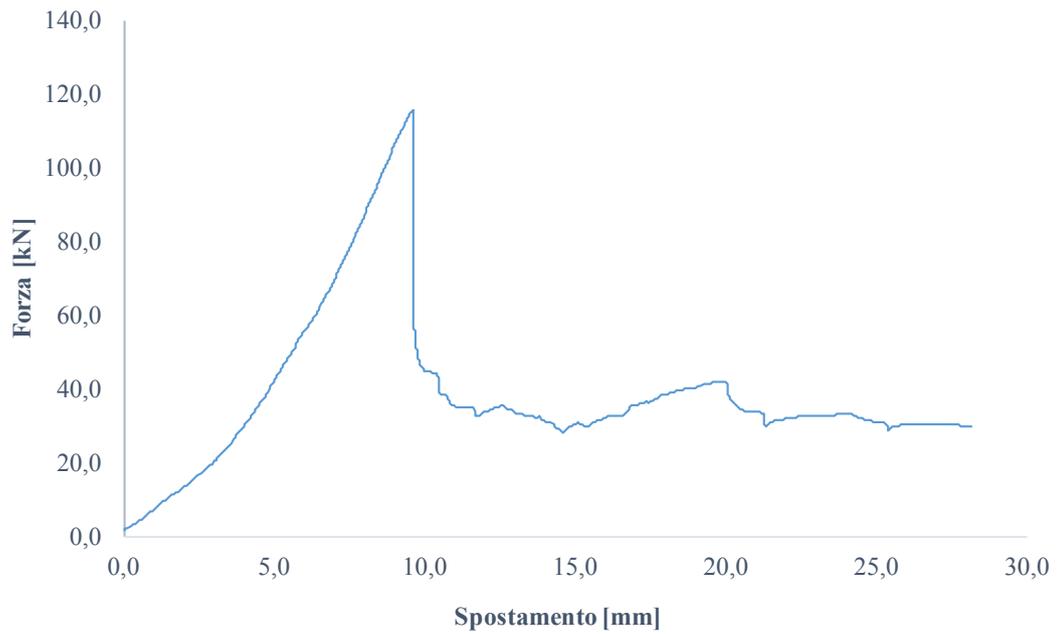


Figura 4. 140 – Risultato in termini di forza-spostamento della prova di compressione diagonale della seconda parete in muratura rinforzata con tessuto di lino trattato.

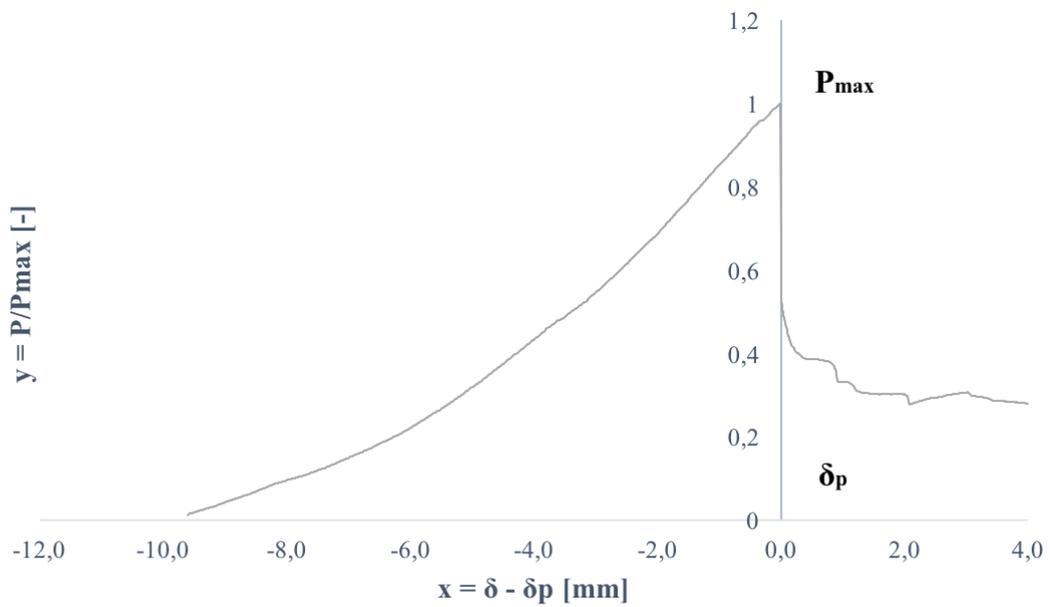


Figura 4. 141 – Diagramma P - δ della seconda parete rinforzata con tessuto di lino trattato, sottoposta a compressione diagonale.

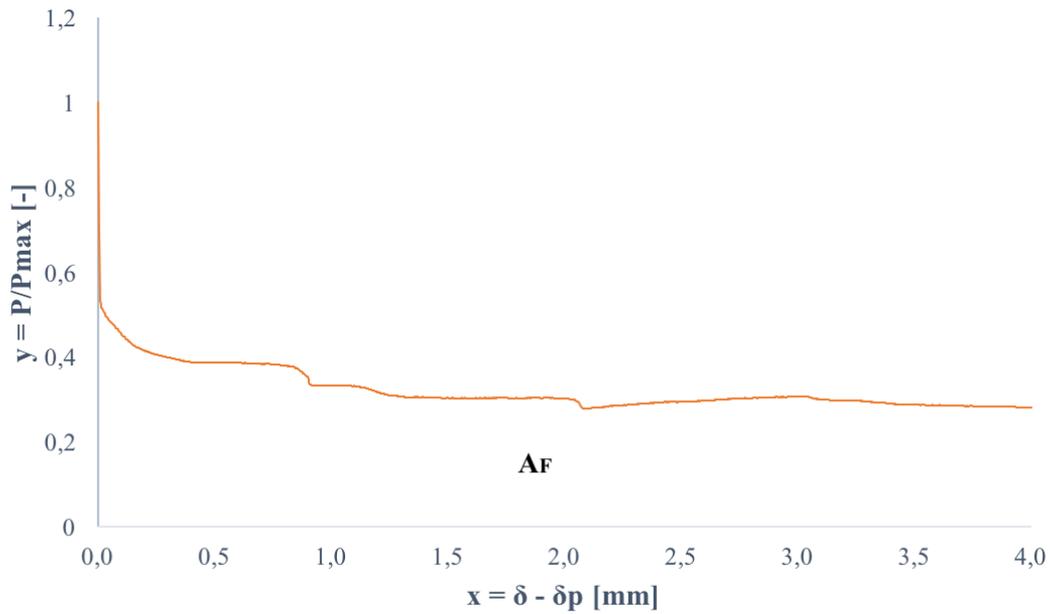


Figura 4. 142 – Comportamento dopo il picco della seconda parete rinforzata con fibra di lino trattata, sottoposta a compressione diagonale.

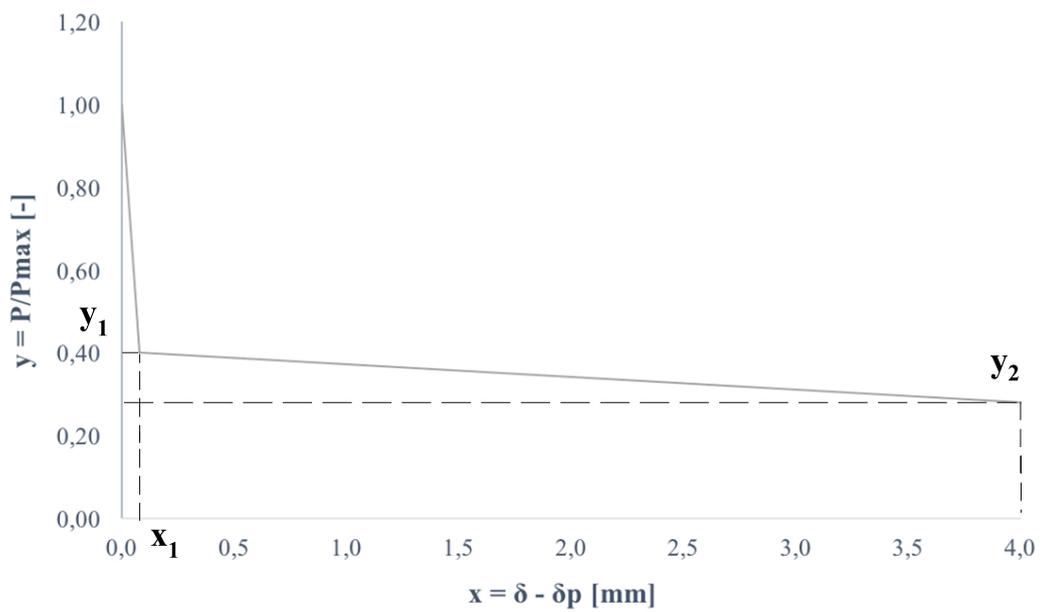


Figura 4. 143 – Relazione bilineare utilizzata per quantificare l'incremento di tenacità dovuto alla presenza del tessuto in fibra per la seconda parete rinforzata con fibra di lino trattata, sottoposta a compressione diagonale.

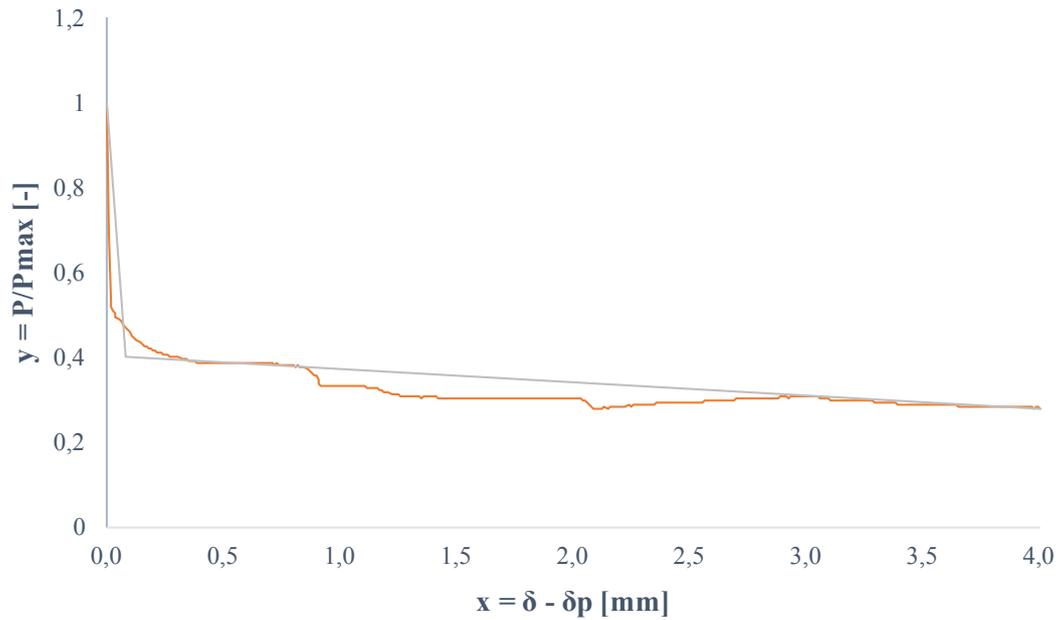


Figura 4. 144 – Sovrapposizione dei grafici relativi alla linearizzazione del comportamento della seconda parete dopo il picco, rinforzata con lino trattato, sopposta alla prova di compressione diagonale.

Campione	F_{max} kN	s_p mm	y_1 -	y_2 -	A_F mm
Lino_1	87,88	6,39	0,63	0,34	1,95
Lino_2	115,75	9,60	0,40	0,28	1,39

Tabella 4. 12 – Principali risultati relativi alla prova di compressione diagonale di due pannelli murari rinforzati con il composito in fibra di lino.

CAPITOLO 5

Analisi dei risultati

Il confronto delle pareti sottoposte alla prova di compressione diagonale, rinforzate in fibra di lino e iuta è stato analizzato tramite un parametro τ_{max} , il quale rappresenta la massima sollecitazione di taglio sull'area netta, esso si calcola:

$$\tau_{max} = \frac{0,707 \cdot P_{max}}{A_n}$$

dove A_n risulta essere:

$$A_n = \frac{(w + h)t}{2}$$

Nello specifico P_{max} è la massima forza applicata, A_n è l'area del piano di taglio netto dei pannelli espresso in mm^2 dalla formula sovrastante, w è la larghezza del provino, h è l'altezza del provino e t è lo spessore dello stesso.

Campione	P_{max} kN	A_f mm	A_n mm^2	τ_{max} MPa	N_{fess}
Iuta	99,87	0,81	66000	1,07	9,00
Lino	101,81	1,67	66000	1,09	24,00

Tabella 5. 1 – Confronto dei risultati per i compositi in fibra di lino e iuta.

Nella tabella si è riportata i valori medi della forza massima di picco prima della rottura della parete sottoposta alla prova di compressione diagonale, dell'area rappresentativa delle tensioni residue, dell'area del piano di taglio netto delle murature, della massima sollecitazione di taglio sull'area netta e del numero di fessure relativo alla prova di trazione diretta del composito.

Sono stati messi in relazione, l'area rappresentativa delle tensioni residue per i due sistemi differenti nella compressione diagonale e il numero di fessure relativo risultante dalla prova di trazione diretta delle placche di composito fibra-matrice.

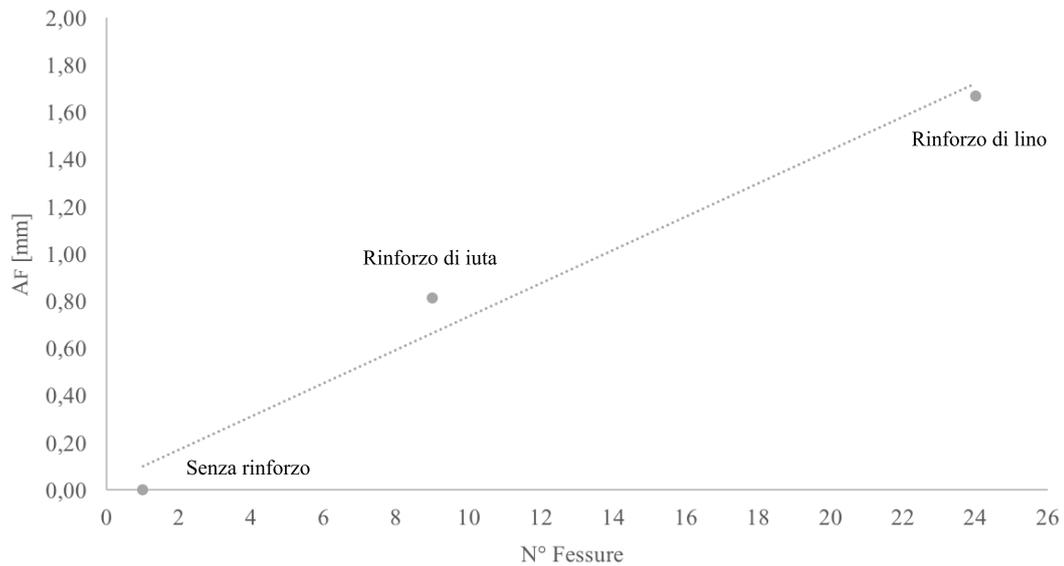


Figura 5. 1 – Confronto tra il numero delle fessure e l'area di tensione residua nel caso di provino privo di rinforzo, di provino rinforzato con fibra di iuta e provino rinforzato con fibra di lino.

Come è possibile constatare l'andamento del grafico risulta essere quasi lineare, all'aumentare delle tensioni residue aumenta il numero di fessure presenti nel composito. Il lino presenta delle caratteristiche prestazionali migliori rispetto alla iuta, la quale nel complesso risulta essere meno tenace.

Sono stati, inoltre, messi in relazione i valori di y_1 e y_2 , ovvero la percentuale del carico residuo appena prima la rottura e la percentuale di carico residuo in presenza di grandi fratture.

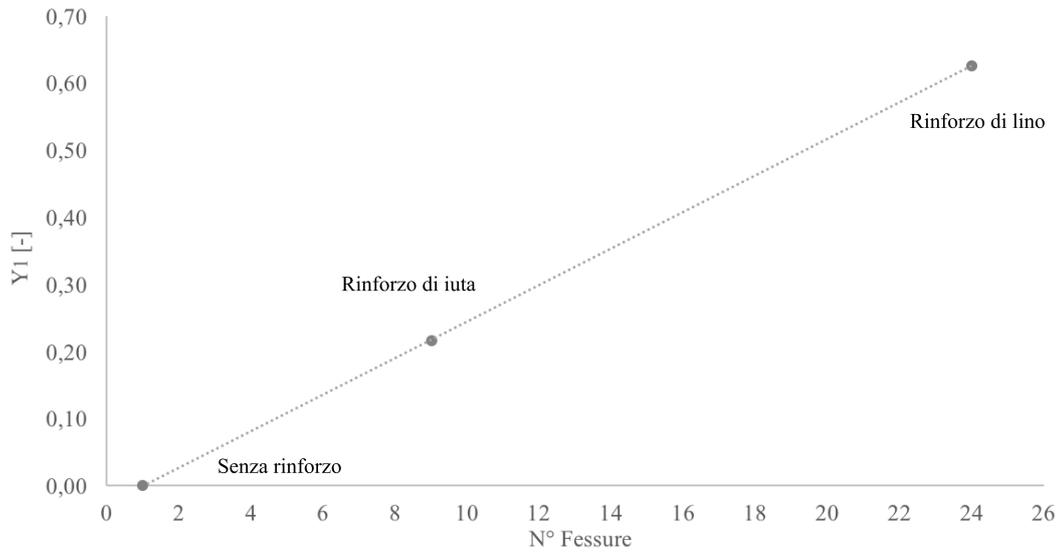


Figura 5. 2 – Confronto tra il numero delle fessure e la percentuale di carico residuo appena prima della rottura nel caso di provino privo di rinforzo, di provino rinforzato con fibra di iuta e provino rinforzato con fibra di lino.

In questo caso il diagramma mostra un andamento perfettamente lineare, essendo il fattore y_1 relativo alla resistenza del sistema e non alla sua tenacità. Il lino, come facilmente percettibile, ha una resistenza nettamente maggiore rispetto alla iuta.

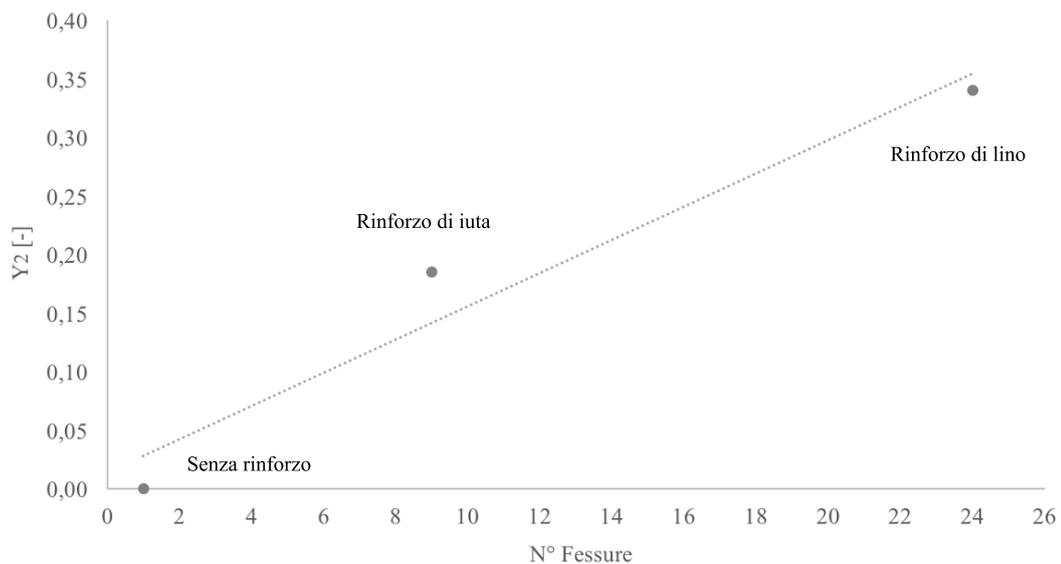


Figura 5. 3 – Confronto tra il numero delle fessure e la percentuale di carico residuo in presenza di grandi fratture nel caso di provino privo di rinforzo, di provino rinforzato con fibra di iuta e provino rinforzato con fibra di lino.

Come è possibile riscontrare anche nel caso della percentuale di carico residuo il diagramma risulta avere un andamento piuttosto lineare come nel caso del grafico relativo all'area di tensione residua.

Infine è stato prodotto un grafico di correlazione tra il numero di fessure e il carico massimo registrato durante la prova.

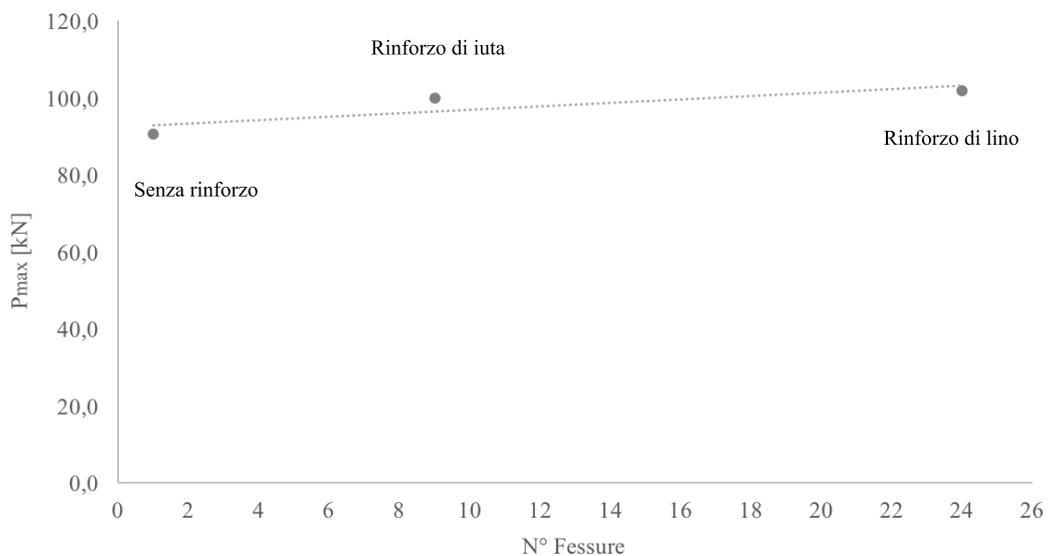


Figura 5. 4 – Confronto tra il numero delle fessure e il carico massimo registrato durante la prova di compressione diagonale nel caso di provino privo di rinforzo, di provino rinforzato con fibra di iuta e provino.

Nel grafico in alto è possibile notare, come, il carico massimo non abbia una importante variazione nelle tre differenti situazioni. La motivazione è data dal fatto che il picco si ha con un'intensità di carico simile per i tre sistemi, essendo dipendente dal comportamento fragile della muratura, la quale però, priva di rinforzo, si frattura senza subire deformazioni residue a differenza degli altri sistemi rinforzati.

Conclusion

Il presente lavoro di tesi riconduce a dei risultati di uno studio sperimentale volto ad analizzare e studiare la risposta meccanica di sistemi di rinforzo compositi costituiti da matrice di malta e rinforzo in fibra vegetale con la seguente successione di fasi:

- è stata progettata una malta nella quale una percentuale di cemento è stata sostituita con materiali di scarto, nello specifico metacaolino e cenere volante, ottenendo una resistenza simile nei 14 e nei 28 giorni di maturazione di circa 39 MPa a compressione, ottenendo così la voluta compatibilità meccanica con la fibra;
- si sono effettuate prove per la caratterizzazione meccanica della fibra di iuta, eseguendo una prova a trazione diretta della stessa, sia in forma di corda che di rete di tessuto. La fibra è stata sottoposta poi ad un trattamento alcalino il quale ha dimostrato di migliorare la resistenza della fibra del 14% (49 MPa) rispetto alla fibra normale (42MPa) nel caso della corda, diversamente invece, nel caso della rete, ha dimostrato che il tessuto trattato ha una resistenza minore di circa il 40% rispetto al non trattato. Ciò dimostra che il tessuto è un sistema differente dalla corda e nel caso della iuta l'aggressività del trattamento alcalino ha fatto sì che nei punti di intersezione tra le corde si formassero degli accumuli di tensione che hanno generato una maggiore fragilità;
- è stata effettuata una prova di pull-out del sistema corda di iuta e malta nel caso della fibra al naturale e sottoposta a trattamento alcalino. Il test ha dimostrato che nel caso della corda di iuta trattata l'interazione tra la matrice e la fibra risulta essere preferibile alla iuta non trattata, il trattamento infatti fa sì che la superficie della fibra risulti maggiormente irregolare così da migliorare la presa della matrice creando attrito;
- i test di trazione diretta dei provini rettangolari in composito hanno dimostrato che, coerentemente con il punto sopra, la placca rinforzata in fibra di iuta trattata ha una minore resistenza rispetto a quella non trattata, viceversa, nel caso del rinforzo in fibra di iuta trattata la resistenza risulta

essere minore del 30%. Il numero di fessure rimane circa invariato, di poco maggiore nel caso di fibra trattata che come abbiamo esaminato in precedenza mostra una migliore compatibilità con la matrice. Nel caso del lino invece, il tessuto trattato ha presentato una migliore resistenza a trazione presumibilmente dovuto alla minore presenza di residui sulla superficie della fibra, ciò avrebbe provocato un minor infragilimento rispetto al composto di iuta, ma la risposta necessita uno studio più specifico ed approfondito;

- la realizzazione dei prototipi in muratura e la successiva applicazione del composito rinforzato hanno dimostrato che il sistema TRM conferisce una buona tenacità e capacità di multi-fessurazione prima del collasso, prerogative importanti nell'ottica del rinforzo sismico delle strutture. Infine anche il set di ultime prove ha dimostrato che il lino ha un comportamento indiscutibilmente migliore rispetto alla iuta, la quale comunque ha dimostrato di avere un buon comportamento come rinforzo in fibra.

Sebbene lo studio del composito e le prestazioni delle fibre di rinforzo abbiano dimostrato un certo incremento in termini di miglioramento della compattezza e della resistenza della struttura muraria, sono necessari ulteriori studi sperimentali per comprendere a fondo il comportamento meccanico del sistema, effettuando ulteriori prove ed analisi su scala locale. Inoltre, è necessario uno studio più approfondito relativo alla compatibilità tra fibra e matrice, in termini di interfaccia, valutandone ad esempio trattamenti appropriati sia per la fibra che per la malta, affinché il miglioramento della coesione tra le due possa conferire un ulteriore miglioramento in termini di consolidamento e compattezza della muratura.

È possibile affermare che questo studio ha constatato la capacità del sistema composito TRM rinforzato mediante fibre vegetali, di rappresentare una tecnica innovativa e più sostenibile nell'ambito dell'ingegneria civile atta al consolidamento sismico delle murature, il quale, però, necessita di una implementazione con studi futuri che possano apportare migliorie in termini di prestazioni meccaniche, interfaccia fibra-matrice e sostenibilità ambientale.

Bibliografia

Ascione L., Poggi C., Savoia M., “La qualificazione degli FRCM”, in *Compositi Magazine*, 29 settembre 2013.

Araújo J., Waldman W., & De Paoli M., “Thermal propertie of high density polyethylene composites with natural fibres: coupling agent effect”, in *Polymer Degradation and Stability*, Vol.93, N°10, pp.1770-1775, 2008.

Bilotta A., Ceroni F., Lignola G.P., Prota A., “Use of DIC technique for investigating the behaviour of FRCM materials for strengthening masonry elements”, in *ScienceDirect*, 2017.

Caneva G., Nugari M. P., Salvadori O. (a cura di), “La Biologia Vegetale per i Beni Culturali”, in *Biodeterioramento e Conservazione*, Firenze, Nardini Editore, vol.1, 2005.

Canevarolo S.V., “Ciências dos polímeros”, 2006.

Carozzi F.G., Bellini A., D’Antino T., De Felice G., Focacci F., Hojdys L., Laghi L., Lanoye E., Micelli F., Panizza M., Poggi C., “Experimental investigation of tensile and bond properties of Carbon-FRCM composites for strengthening masonry elements”, in *ScienceDirect*, 2017.

C. M. O. Müller et al., 2009.

D’Antino T., Catherine Papanicolaou (Corina), “Mechanical characterization of textile reinforced inorganic-matrix composites”, in *ScienceDirect*, 2017.

Deifoirt N., Biswas S., Vriese L., Tran L.Q.N., Acker J.V., Ahsan, Q., Gorbatikh L., Vuure L., A.V., Verpoest I., “Assessment of the tensile properties of coir, bamboo and jute fibre”, *Composite: Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41, N°5, pp. 588-595, 2010.

Dittenber et al., “Critical review of recent publications on use of natural composites in infrastructure”, in *ScienceDirect*, volume 43, N° 8, pp. 1419-1429, Agosto 2012.

Ferrara G., Martinelli E., “Tensile behavior of textile Reinforced Mortar composite system with flax fibres”, in *MDPI*, 2019.

Ferreira S.R., “Effect of surface treatments on the structure, mechanical, durability and bond behavior of Vegetable Fibers for Cementitious Composites, *tesi di dottorato presentata al programma di post-laurea in ingegneria civile, COPPE, Università Federale di Rio de Janeiro, Relatori: Toledo Filho R.D., de Andrade Silva F.*, 2016.

F. P. La Mantia & M. Morreale, Green composites: A brief review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 42 (2011) 579–588.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.01.017>.

Ghiassi B., Oliveira D.V., Razavizadeh A., Lourenco P.B., “Tensile and bond characterization of natural fibers embedded in inorganic matrices”, in *ResearchGate*, 2015.

Graupner N., Müssig J., “Technical Application of Natural Fibres: An Overview”, in *Industrial Applications of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Application*, 1 ed., Wiley Series in Renewable Resources, Edited by Jörg Müssig, 2010.

John M.J., Thomas S., “Biofibres and biocomposites”, in *ResearchGate, Carbohydrate Polymers*, Vol. 71, N°3, pp 343-364, Febbraio 2008.

John et al., 2008, THOMAS et al., 2011, DITTENBER et al., 2012.

Kundu S.P., Chakraborty S., Roy A., Adhikari B., Majumber S.B., “Improvement in mechanical properties of jute fibres through mild alkali treatment as demonstrated by

utilization of the Weibull distribution model”, in *Bioresource Technology*, Vol. 107, pp. 222-228, 2012.

Leone M., Aiello M.A., Balsamo A., Carozzi F.G., Ceroni F., Corradi M., Gams M., Grabin E., Gattesco N., Krajewski P., Mazzotti C., Oliveira D., Papanicolaou C., Ranocchiali G., Roscini F., Saenger D., “Glass fabric reinforced cementitious matrix: Tensile properties and bond performance on masonry substrate”, in *ScienceDirect*, 2017.

Mercedes L., Gil L., Bernat-Maso E., “Mechanical performance of vegetal fabric reinforced cementitious matrix (FRCM) composites”, in *ScienceDirect*, 2018.

Mit, Rapporto “The limits to Growth”, 1972.

Nardon F., “Materiali compositi per il rinforzo di strutture in legno: Problemi di durabilità e compatibilità”, Università degli studi di Padova, 2014.

Ochi S., “Mechanical properties of kenaf fibers and kenaf/PLA composites”, in *Mechanics of Materials*, 40(4):446-452, Aprile 2008.

Pasqualon G., “Il comportamento delle strutture in muratura sotto l’azione del sisma”, in *Ingenio*, 2019, Pag.1-2.

Pasqualon G., “Il comportamento delle strutture in muratura sotto l’azione del sisma”, in *Ingenio*, 2019, Pag.3-4.

Pasqualon G., “Il comportamento delle strutture in muratura sotto l’azione del sisma”, in *Ingenio*, 2019, Pag.5.

Pasqualon G., “Il comportamento delle strutture in muratura sotto l’azione del sisma”, in *Ingenio*, 2019, Pag.6-14.

- Pasqualon G., “Il comportamento delle strutture in muratura sotto l’azione del sisma”, in *Ingenio*, 2019, Pag.14-15.
- Rahman S., “Jute – A Versatile Natural Fbre: Cultivation, Extraction and Processing”, *Industrial Application of Natural Fibres: Structure, Properties and Technical Application*. Wiley Series in Renewable Resources. Edited by Jörg Müssing. 1 ed., 2010.
- Saha P., Manna S., Chowdhury S.R., Sen R., Roy D., Adhikari B., “Enhancement of tensile strength of lignocellulosic jute fibers by alkali-steam treatment”, in *Bioresource Technology*, Vol.101, pp.3182-3187, 2010.
- Santulli C., “Selezione delle fibre vegetali per composite resistenti all’impatto”, in *www.academia.edu*, 2014.
- Silva F.A., Chawla N., Toledo Filho R.D., “Tensile behavior of High Performance (sisal) Fibers”, in *Composites Science and Technology*, Vol. 68, N° 15-16, pp. 3438-3443, 2008.
- Silva et al., 1999.
- Singh et al., 2011;
- Sydenstricker T.H.D., Mochnaz S., Campos Amico S., “Pull-out and other evaluations in sisal-reinforced polyester biocomposites”, in *Polymer Testing*, 22(4):375-380, giugno 2003.
- Thomas S., Paul S.A., “Natural fibres: Structure, properties and applications”, in *ResearchGate*, gennaio 2011.
- Torricelli M., “Per ragionare di sostenibilità nelle costruzioni”, in *Imprese edili*, 31 dicembre 2017.

Wang W.M., Cai Z.S., Yu J.Y., “Eco-friendly pretreatments of jute and cotton blended fabric”, in *ResearchGate*, gennaio 2008.

Wced, “Our Conservation Strategy”, 1987.

Winklerprins A.M.G.A., “Jute cultivation in the Lower Amazon, 1940-1990: An ethnographic account from Santarém, Pará, Brasil”, in *Journal of Historical Geography*, 32:818-838, 2006.

Yan L., Chouw N., “Sustainable Concrete and Structures with Natural Fibre Reinforcements”, in *Infrastructure Corrosion and Durability – a sustainability study, Chapter: Sustainable Concrete and Structures with Natural Fibre Reinforcements*, Publisher: OMICS Group Incorporation, Editors: Yang Lu, pp. 1-25, 2014.

Zanello E., “Rinforzo strutturale e conservazione, esempio applicativo su edifici storici in tufo”, in *Recupero e Conservazione magazine*, N.142, luglio-agosto 2017.

Zimmermann T., Pöhler E., Geiger T., “Cellulose Fibrils for Polymer Reinforcement”, in *Advanced Engineering Materials*, Vol.6, Punto 9, 2004.

Elenco delle figure

Figura 2. 1 - Piano resistente e non della muratura.....	11
Figura 2. 2– Crolli dovuti alla faticenza intrinseca della muratura.....	12
Figura 2. 3 - Comportamenti disgregativi delle murature in ciottoli.....	13
Figura 2. 4 – Comportamento di una muratura a due teste senza e con collegamento.	14
Figura 2. 5– immagini (1) meccanismi fuori piano – 1°modo, immagine (2) meccanismi nel piano – 2°modo.....	15
Figura 2. 6– Possibili meccanismi di ribaltamento semplice.....	16
Figura 2. 7– Possibili meccanismi di flessione semplice.....	17
Figura 2. 8– Spanciamenti e fuori piombo della parete.....	17
Figura 2. 9– Possibili meccanismi di flessione orizzontale.....	18
Figura 2. 10– Flessione orizzontale.....	19
Figura 2. 11– Esempio di flessione orizzontale.....	19
Figura 2. 12– Possibili meccanismi di ribaltamento composto.....	20
Figura 2. 13– Esempio di ribaltamento composto.....	20
Figura 2. 14 – Meccanismo di martellamento.....	21
Figura 2. 15– Martellamento della copertura.....	21
Figura 2. 16 – Martellamento dei diagonali.....	22
Figura 2. 17– Martellamento dei puntoni della copertura.....	22
Figura 2. 18– Meccanismi nel piano – rottura a taglio dei maschi murari.....	23
Figura 2. 19– Meccanismo nel piano – rottura a taglio delle fasce di piano.....	23
Figura 2. 20– Meccanismo nel piano.....	24
Figura 3. 1 – Struttura di una fibra naturale, Zimmermann et al. (2004).....	27
Figura 3. 2 – Micrografia della fibra di (a) cocco e (b) iuta.....	28
Figura 3. 3 – (a) Pianta da dove viene estratta la fibra di Iuta (Fonte: Alila et al., 2013) e (b) Fibra dopo l'estrazione (Fonte: http://www.parintins.am.gov.br).....	30
Figura 3. 4 – Struttura del lino dalla pianta alle fibrille di cellulosa (Yan et al., 2014).	31
Figura 3. 5 – Micro-struttura di una cellula di fibra di lino (Yan et al., 2014).....	32
Figura 4. 1 – Dimensione dei grani dei materiali componenti la malta.....	43
Figura 4. 2 – Setaccio della sabbia.....	44
Figura 4. 3 – Miscela.....	47
Figura 4. 4 – Spandimento della malta.....	47

Figura 4. 5 – Diametro di spandimento.	48
Figura 4. 6 – Miscela per il test.....	49
Figura 4. 7 – Riempimento dei corpi di prova.....	49
Figura 4. 8 – Tornio per la pulizia dei corpi di prova.	50
Figura 4. 9 – Shimadzu UH-F.....	51
Figura 4. 10 – Set up della prova di compressione della malta.	51
Figura 4. 11 – Provino sottoposto alla prova di compressione.....	52
Figura 4. 12 – Macchina di prova per il test di compressione.....	52
Figura 4. 13 – 7 cilindri dopo il test di compressione a 14 giorni di maturazione. ...	53
Figura 4. 14 – 7 cilindri sottoposti al test di compressione a 28 giorni di maturazione.	54
Figura 4. 15 – Grafico relativo alla forza massima a 14 e 28 giorni di maturazione.	55
Figura 4. 16 – Grafico relativo allo sforzo massimo a 14 e 28 giorni di maturazione.	55
Figura 4. 17 – Grafico relativo alla deformazione a 14 e 28 giorni di maturazione..	56
Figura 4. 18 – Grafico relativo al modulo elastico a 14 e 28 giorni di maturazione.	56
Figura 4. 19 – Dimensioni del corpo di prova per il test di flessione.....	57
Figura 4. 20 – Macchina di prova per la flessione.....	57
Figura 4. 21 – Prova di flessione.	58
Figura 4. 22 – Corpo di prova sottoposto al test di flessione a 14 giorni di maturazione.....	59
Figura 4. 23 – Corpo di prova sottoposto al test di flessione a 28 giorni di maturazione.....	59
Figura 4. 24 – Diagramma relativo alla resistenza a flessione media in funzione della flessione dei provini di malta.....	60
Figura 4. 25 – Miscela di materiale cementizio.....	61
Figura 4. 26 – Suddivisione del materiale per età della miscela.....	62
Figura 4. 27 – Analisi termogravimetrica della pasta cementizia all'età di 14 giorni.	62
Figura 4. 28 – Analisi termogravimetrica della pasta cementizia all'età di 30 giorni.	63
Figura 4. 29 – Analisi termogravimetrica della pasta cementizia all'età di 60 giorni.	63
Figura 4. 30 – Trattamento della fibra di iuta in soluzione alcalina.	65
Figura 4. 31 – Illustrazione schematica della degradazione della fibra naturale in presenza di soluzione alcalina.....	66

Figura 4. 32 – Corpo di prova del test di trazione della corda di iuta, non trattato. . .	69
Figura 4. 33 – Corpo di prova del test di trazione della corda di iuta, trattato.	70
Figura 4. 34 – Macchina MTS Tytron 250.	71
Figura 4. 35 – Corpo di prova del test di trazione della corda di iuta nella fase preliminare al test.....	71
Figura 4. 36 – Corpo di prova del test di trazione della corda di iuta durante il test.	72
Figura 4. 37 – Corpo di prova del test di trazione della corda di iuta durante il test.	72
Figura 4. 38 – Software utilizzato per la memorizzazione dei dati relativi al test di trazione.....	73
Figura 4. 39 – Corpo di prova del test di trazione della corda di iuta trattata nella fase successiva alla prova.....	74
Figura 4. 40 – Corpo di prova del test di trazione della corda di iuta non trattata nella fase successiva alla prova.	74
Figura 4. 41 – Corpi di prova del test di trazione della corda di iuta durante il lavaggio in acqua.	75
Figura 4. 42 – Corpi di prova delle corde di iuta per la determinazione dell’area di sezione tramite il SEM.....	75
Figura 4. 43 – Immagine al microscopio elettronico a scansione si una corda di iuta.	76
Figura 4. 44 – Corpo di prova delle corde di iuta realizzati per il SEM.....	76
Figura 4. 45 – Immagine al microscopio elettronico a scansione di una corda di iuta per la determinazione del diametro.....	77
Figura 4. 46 – Immagine al microscopio elettronico a scansione del diametro di una corda di iuta.....	77
Figura 4. 47 – Diagramma Forza-Spostamento relativo a 6 provini di corda di iuta non trattata sottoposti a trazione diretta.....	79
Figura 4. 48 – Diagramma Forza-Spostamento in trazione diretta, della corda di iuta non trattata più prossima al valor medio.....	79
Figura 4. 49 - Diagramma Forza-Spostamento relativo a 6 provini di corda di iuta trattata sottoposti a trazione diretta.....	80
Figura 4. 50 - Diagramma Forza-Spostamento in trazione diretta, della corda di iuta trattata più prossima al valor medio.....	80
Figura 4. 51 – Diagramma Forza-Spostamento della corda di iuta trattata e non trattata.	81
Figura 4. 52 – Preparazione dei corpi di prova per il test di trazione diretta del tessuto di iuta trattato e non trattato	83
Figura 4. 53 – Test di trazione del tessuto di iuta.....	84
Figura 4. 54 – Test di trazione del tessuto di iuta.....	84

Figura 4. 55 – Corpo di prova del tessuto di iuta non trattato sottoposto a trazione diretta.	85
Figura 4. 56 – Corpo di prova del tessuto di iuta trattato sottoposto a trazione diretta.	85
Figura 4. 57 – Diagramma forza-spostamento, relativo al tessuto di iuta non trattato, di tre corpi di prova sottoposti a trazione diretta.	86
Figura 4. 58 – Diagramma forza-spostamento del tessuto di iuta non trattato, sottoposto a trazione diretta, che è più prossimo al valore medio.	87
Figura 4. 59 – Diagramma sforzo-deformazione, relativo al tessuto di iuta non trattato, di tre corpi di prova sottoposti a trazione diretta.	87
Figura 4. 60 - Diagramma sforzo-deformazione del tessuto di iuta non trattato, sottoposto a trazione diretta, che è più prossimo al valore medio.	88
Figura 4. 61 – Diagramma Forza-Spostamento, relativo al tessuto di iuta trattato, di tre corpi di prova sottoposti a trazione diretta.	88
Figura 4. 62 – Diagramma forza-spostamento del tessuto di iuta trattato, sottoposto a trazione diretta, che è più prossimo al valore medio.	89
Figura 4. 63 - Diagramma sforzo-deformazione, relativo al tessuto di iuta trattato, di tre corpi di prova sottoposti a trazione diretta.	89
Figura 4. 64 – Diagramma Sforzo-Deformazione del tessuto di iuta trattato, sottoposto a trazione diretta, che è più prossimo al valore medio.	90
Figura 4. 65 – Diagramma forza-spostamento, comparazione tra tessuto trattato e non trattato.	90
Figura 4. 66 - Diagramma Sforzo-Deformazione, comparazione tra tessuto trattato e non trattato.	91
Figura 4. 67 – Preparazione del corpo di prova per il test Pull out.....	93
Figura 4. 68 – Preparazione corpi di prova test Pull out.....	93
Figura 4. 69 – Inserimento della malta nei cilindri.....	94
Figura 4. 70 – Inserimento della malta nei cilindri (alto).	94
Figura 4. 71 – Provino prima di essere sottoposto alla prova.....	95
Figura 4. 72 – Prova di Pull out, Tytron 250.	96
Figura 4. 73 – Prova di Pull out, Tytron 250 (alto).....	96
Figura 4. 74 – Diagramma Forza-Sfilamento relativo al test di Pull out per corda di iuta trattata e non trattata.....	97
Figura 4. 75 – Realizzazione dei provini di composito tessuto di iuta e matrice per il test di trazione diretta.....	99
Figura 4. 76 – Set up della prova di trazione delle placche di composito.	100
Figura 4. 77 – Setup del test di trazione diretta della placca di composito rinforzato con fibra naturale.	102

Figura 4. 78 – Tipologia di frattura nel sistema composito di rinforzo fibra-matrice.	102
Figura 4. 79 – Diagramma forza-spostamento di tre provini di composito, rinforzato con due strati di tessuto di iuta non trattato, sottoposto a trazione diretta	103
Figura 4. 80 – Diagramma forza-spostamento del provino relativo al composito, rinforzato con tessuto in fibra di iuta non trattata, che risulta avere un comportamento più vicino a quello medio.....	103
Figura 4. 81 – Diagramma sforzo-deformazione di tre provini di composito, rinforzato con due strati di tessuto di iuta non trattato, sottoposto a trazione diretta.	104
Figura 4. 82 – Diagramma sforzo-deformazione del provino relativo al composito, rinforzato con tessuto in fibra di iuta non trattata, che risulta avere un comportamento più vicino a quello medio.....	104
Figura 4. 83 - Test di trazione diretta della placca di composito rinforzata con due strati di tessuto di iuta non trattata.	105
Figura 4. 84 – Diagramma forza-spostamento di tre provini di composito, rinforzato con due strati di tessuto di iuta trattato, sottoposto a trazione diretta.	106
Figura 4. 85 – Diagramma forza-spostamento del provino relativo al composito, rinforzato con tessuto in fibra di iuta trattata, che risulta avere un comportamento più vicino a quello medio.....	106
Figura 4. 86 – Diagramma sforzo-deformazione di tre provini di composito, rinforzato con due strati di tessuto di iuta trattato, sottoposto a trazione diretta.	107
Figura 4. 87 – Diagramma sforzo-deformazione del provino relativo al composito, rinforzato con tessuto in fibra di iuta trattata, che risulta avere un comportamento più vicino a quello medio.....	107
Figura 4. 88 – Test di trazione diretta della placca di composito rinforzata con due strati di tessuto di iuta trattata.	108
Figura 4. 89 – Comparazione tra il diagramma forza-spostamento nel caso di composito rinforzato con tessuto di iuta non trattato e trattato rispettivamente.	108
Figura 4. 90 – Comparazione tra il diagramma sforzo-deformazione nel caso di composito rinforzato con tessuto di iuta non trattato e trattato rispettivamente.	109
Figura 4. 91 – Confronto test di trazione diretta del composito rinforzato con tessuto in fibra di iuta trattato e non trattato.	109
Figura 4. 92 – Diagramma forza-spostamento della placca di composito rinforzata con tessuto di lino non trattato.	111
Figura 4. 93 – Diagramma forza-spostamento del provino relativo al composito, rinforzato con tessuto in fibra di lino non trattato, che risulta avere un comportamento più vicino a quello medio.....	111
Figura 4. 94 – Diagramma sforzo-deformazione della placca di composito rinforzata con tessuto di lino non trattato.	112

Figura 4. 95 – Diagramma sforzo-deformazione del provino relativo al composito, rinforzato con tessuto in fibra di lino non trattato, che risulta avere un comportamento più vicino a quello medio.....	112
Figura 4. 96 – Test di trazione diretta del composito rinforzato con lino non trattato.	113
Figura 4. 97 – Diagramma forza-spostamento delle placche di composito rinforzate con due strati di tessuto di lino trattato con soluzione alcalina.....	113
Figura 4. 98 – Diagramma forza-spostamento del provino di composito rinforzato con tessuto di lino trattato con soluzione alcalina, che ha un comportamento più vicino a quello medio.....	114
Figura 4. 99 – Diagramma sforzo-deformazione delle placche di composito rinforzate con due strati di tessuto di lino trattato con soluzione alcalina.....	114
Figura 4. 100 – Diagramma sforzo-deformazione del provino di composito rinforzato con tessuto di lino trattato con soluzione alcalina, che ha un comportamento più vicino a quello medio.....	115
Figura 4. 101 – Test di trazione diretta della placca di composito di matrice a base cementizia rinforzata con doppio strato di tessuto di fibra di lino trattato con soluzione alcalina.....	115
Figura 4. 102 – Diagramma forza-spostamento relativo test di trazione diretta della placca di composito rinforzata con due strati di tessuto di lino trattato e non trattato.	116
Figura 4. 103 – Diagramma sforzo-deformazione relativo test di trazione diretta della placca di composito rinforzata con due strati di tessuto in fibra di lino trattato e non trattato.	116
Figura 4. 104 – Immagine relativa al confronto tra i corpi di prova del composto rinforzato con fibra di lino non trattata e trattata dopo essere stati sottoposti a test di trazione diretta.	117
Tabella 4. 10 – Diagramma forza-spostamento delle placche di composto rinforzato, poste a confronto.....	119
Figura 4. 105 – Perfetto allineamento del pannello murario nella macchina di prova prima di dare inizio alla prova di compressione diagonale.....	121
Figura 4. 106 – Ancoraggio metallico applicato in alto e alla base della muratura durante la prova di compressione diagonale per il trasferimento del carico dalla macchina al corpo di prova.	121
Figura 4. 107 – Muratura in laterizio pieno 60 cm x 60 cm.	122
Figura 4. 108 – Applicazione del composito di rinforzo alla parete 1 lato A.....	123
Figura 4. 109 – Applicazione del composito di rinforzo alla parete 2.....	123
Figura 4. 110 – Applicazione del composito di rinforzo alla parete 1 lato B.	124
Figura 4. 111 – Test di compressione diagonale della parete priva di rinforzo.....	124
Figura 4. 112 – Rottura fragile della parete priva di rinforzo in fibra.	125

Figura 4. 113 – Diagramma Forza-Tempo del primo pannello murario sottoposto a compressione diagonale, privo di rinforzo in fibra.....	125
Figura 4. 114 – Diagramma Forza-Spostamento del primo pannello murario sottoposto a compressione diagonale, privo di rinforzo in fibra.....	126
Figura 4. 115 – Diagramma Forza-Tempo del secondo pannello murario sottoposto a compressione diagonale, privo di rinforzo in fibra.....	126
Figura 4. 116 – Diagramma Forza-Spostamento del secondo pannello murario sottoposto a compressione diagonale, privo di rinforzo in fibra.....	127
Figura 4. 117 – Immagini relative alla prova di compressione diagonale della prima parete in muratura rinforzata con tessuto di iuta non trattato.	129
Figura 4. 118 – Risultato in termini di forza-tempo della prova di compressione diagonale della prima parete in muratura rinforzata con tessuto di iuta non trattato.	129
Figura 4. 119 – Risultato in termini di forza-spostamento della prova di compressione diagonale della prima parete in muratura rinforzata con tessuto di iuta non trattato.	130
Figura 4. 120 – Diagramma $P - \delta$ della prima parete rinforzata con tessuto di iuta non trattato, sottoposta a compressione diagonale.....	130
Figura 4. 121 – Comportamento dopo il picco della prima parete rinforzata con fibra di iuta non trattata, sottoposta a compressione diagonale.....	131
Figura 4. 122 – Relazione bilineare utilizzata per quantificare l’incremento di tenacità dovuto alla presenza del tessuto in fibra per la prima parete rinforzata con fibra di iuta non trattata, sottoposta a compressione diagonale.	131
Figura 4. 123 – Sovrapposizione dei grafici relativi alla linearizzazione del comportamento della prima parete dopo il picco, in iuta non trattata, sottoposta alla prova di compressione diagonale.....	132
Figura 4. 124 – Immagini relative alla prova di compressione diagonale della seconda parete in muratura rinforzata con tessuto di iuta non trattato.	132
Figura 4. 125 – Risultato in termini di forza-tempo della prova di compressione diagonale della seconda parete in muratura rinforzata con tessuto di iuta non trattato.	133
Figura 4. 126 – Risultato in termini di forza-spostamento della prova di compressione diagonale della seconda parete in muratura rinforzata con tessuto di iuta non trattato.	133
Figura 4. 127 – Diagramma $P - \delta$ della seconda parete rinforzata con tessuto di iuta non trattato, sottoposta a compressione diagonale.....	134
Figura 4. 128 – Comportamento dopo il picco della seconda parete rinforzata con fibra di iuta non trattata, sottoposta a compressione diagonale.	134
Figura 4. 129 – Relazione bilineare utilizzata per quantificare l’incremento di tenacità dovuto alla presenza del tessuto in fibra per la seconda parete rinforzata con fibra di iuta non trattata, sottoposta a compressione diagonale.	135

Figura 4. 130 – Sovrapposizione dei grafici relativi alla linearizzazione del comportamento della seconda parete dopo il picco, in iuta non trattata, sottoposta alla prova di compressione diagonale.....	135
Figura 4. 131 – Immagini relative alla prova di compressione diagonale della prima parete in muratura rinforzata con tessuto di lino trattato.....	136
Figura 4. 132 – Risultato in termini di forza-tempo della prova di compressione diagonale della prima parete in muratura rinforzata con tessuto di lino trattato.	137
Figura 4. 133 – Risultato in termini di forza-spostamento della prova di compressione diagonale della prima parete in muratura rinforzata con tessuto di lino trattato.	137
Figura 4. 134 – Diagramma P - δ della prima parete rinforzata con tessuto di lino trattato, sottoposta a compressione diagonale.....	138
Figura 4. 135 – Comportamento dopo il picco della prima parete rinforzata con fibra di lino trattata, sottoposta a compressione diagonale.....	138
Figura 4. 136 – Relazione bilineare utilizzata per quantificare l'incremento di tenacità dovuto alla presenza del tessuto in fibra per la prima parete rinforzata con fibra di lino trattata, sottoposta a compressione diagonale.	139
Figura 4. 137 – Sovrapposizione dei grafici relativi alla linearizzazione del comportamento della prima parete dopo il picco, in lino trattato, sottoposta alla prova di compressione diagonale.....	139
Figura 4. 138 – Immagini relative alla prova di compressione diagonale della seconda parete in muratura rinforzata con tessuto di lino trattato.	140
Figura 4. 139 – Risultato in termini di forza-tempo della prova di compressione diagonale della seconda parete in muratura rinforzata con tessuto di lino trattato..	140
Figura 4. 140 – Risultato in termini di forza-spostamento della prova di compressione diagonale della seconda parete in muratura rinforzata con tessuto di lino trattato.	141
Figura 4. 141 – Diagramma P - δ della seconda parete rinforzata con tessuto di lino trattato, sottoposta a compressione diagonale.....	141
Figura 4. 142 – Comportamento dopo il picco della seconda parete rinforzata con fibra di lino trattata, sottoposta a compressione diagonale.	142
Figura 4. 143 – Relazione bilineare utilizzata per quantificare l'incremento di tenacità dovuto alla presenza del tessuto in fibra per la seconda parete rinforzata con fibra di lino trattata, sottoposta a compressione diagonale.	142
Figura 4. 144 – Sovrapposizione dei grafici relativi alla linearizzazione del comportamento della seconda parete dopo il picco, in lino trattato, sottoposta alla prova di compressione diagonale.....	143
Figura 5. 1 – Confronto tra il numero delle fessure e l'area di tensione residua nel caso di provino privo di rinforzo, di provino rinforzato con fibra di iuta e provino rinforzato con fibra di lino.	145

Figura 5. 2 – Confronto tra il numero delle fessure e la percentuale di carico residuo appena prima della rottura nel caso di provino privo di rinforzo, di provino rinforzato con fibra di iuta e provino rinforzato con fibra di lino. 146

Figura 5. 3 – Confronto tra il numero delle fessure e la percentuale di carico residuo in presenza di grandi fratture nel caso di provino privo di rinforzo, di provino rinforzato con fibra di iuta e provino rinforzato con fibra di lino..... 146

Elenco Tabelle

Tabella 3. 1 – Proprietà comparative di alcune fibre naturali con tradizionali fibre sintetiche (Start Innovetion S.r.l).....	34
Tabella 4. 1 – Diametro del materiale cementizio.....	43
Tabella 4. 2 – Valori relativi alla prova di compressione per 14 e 28 giorni di maturazione.....	54
Tabella 4. 3 – Risultato del test di flessione della malta con maturazione di 28 giorni.....	60
Tabella 4. 4 – Confronto tra Corde di iuta trattate e non trattate relativo alla trazione diretta.....	81
Tabella 4. 5 - Confronto tra Tessuto di iuta trattato e non trattato, sottoposto a trazione diretta.....	91
Tabella 4. 6 – Tabella riassuntiva dei valori caratteristici relativi al test di Pull out per la corda di iuta trattata e non trattata.....	98
Tabella 4. 7 – Confronto dei valori caratteristici relativi al composito rinforzato con tessuto di iuta trattato e non trattata nel caso di trazione diretta della placca.....	110
Tabella 4. 8 – Risultati relativi al test di trazione diretta del composito rinforzato con lino rispettivamente trattato e non trattato.....	117
Tabella 4. 9 – Tabella riassuntiva dei risultati relativi al test di trazione diretta nel caso di composito rinforzato con un doppio strato di tessuto in fibra di iuta, fibra di lino rispettivamente trattate e non trattate.....	118
Tabella 4. 10 – Diagramma forza-spostamento delle placche di composito rinforzato, poste a confronto.....	119
Tabella 4. 11 – Principali risultati relativi alla prova di compressione diagonale di due pannelli murari rinforzati con il composito in fibra di iuta.....	136
Tabella 4. 12 – Principali risultati relativi alla prova di compressione diagonale di due pannelli murari rinforzati con il composito in fibra di lino.....	143
Tabella 5. 1 – Confronto dei risultati per i compositi in fibra di lino e iuta.....	144

