UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN INGEGNERIA EDILE

SISTEMI FRCM CON MATRICI GEOPOLIMERICHE E CEMENTIZIE A CONFRONTO PER IL RINFORZO STRUTTURALE

Comparison of FRCM systems with geopolymeric and cementitious matrices for structural reinforcement

Relatore:

Prof. Jacopo Donnini

Correlatore:

Prof. Valeria Corinaldesi

Tesi di laurea di:

Gianmarco Rossi

ANNO ACCADEMICO 2020/2021

Indice

Premessa *pag. 1*

Obiettivi della ricerca *pag. 2*

Organizzazione della tesi *pag. 2*

1. Introduzione

1.1. I materiali compositi *pag. 3*

1.2. Classificazione dei materiali compositi *pag. 4*

1.3. Materiali componenti: matrici e fibre *pag. 5*

1.3.1. La matrice *pag. 5*

1.3.2. Le fibre *pag. 7*

1.3.2.1. Fibre di vetro *pag. 8*

1.3.2.2. Fibre arammidiche *pag. 9*

1.3.2.3. Fibre di carbonio *pag. 10*

1.4. Fillers e additivi *pag. 11*

1.4.1. Fillers per matrici organiche *pag. 12*

1.4.2. Fillers per matrici inorganiche *pag. 12*

1.4.3. Additivi per matrici organiche *pag. 13*

1.4.4. Additivi per matrici inorganiche *pag. 14*

2. Compositi FRCM

2.1. Confronto tra FRP e FRCM *pag. 15*

2.2. Proprietà e caratteristiche *pag. 17*

2.2.1. Densità *pag. 17*

2.2.2. Comportamento ad alte temperature *pag. 18*

2.2.3. Comportamento al fuoco *pag. 18*

2.2.4. Dilatazione termica *pag. 18*

2.2.5. Contenuto di fibre *pag. 19*

2.2.6. Permeabilità all'acqua e resistenza alla diffusione del vapore pag. 19

2.2.7. Ritiro pag. 20

2.2.8. Resistenza ai cicli di gelo-disgelo pag. 20

2.3. Sistemi FRGM e CRGM pag. 21

2.3.1. Geopolimeri e processo di geopolimerizzazione pag. 23

2.3.2. Polveri alluminosilicatiche pag. 24

2.3.3. Metacaolino pag. 24

2.3.4. Cenere volante pag. 25

2.3.5. Loppa d'altoforno pag. 26

2.3.6. Pozzolane pag. 26

2.3.7. Attivatori alcalini pag. 26

2.4. Tipologie di prove sperimentali pag. 27

2.4.1. Prove per la caratterizzazione meccanica dei materiali compositi pag. 27

2.4.2. Prove di trazione diretta pag. 28

2.4.2.1. Metodo di applicazione del carico pag. 29

2.4.2.2. Geometria dei provini pag. 29

2.4.2.3 Strumenti di acquisizione di spostamenti e deformazioni pag. 31

2.4.2.4. Risposta dei compositi FRCM pag. 32

2.4.3. Prove di adesione pag. 33

3. Programma sperimentale

3.1. I provini pag. 34

3.1.1. Glasstex Struktura 320 pag. 35

3.1.2. Glasstex Struktura BA 420 pag. 37

3.1.3. Malta GeoLite – Kerakoll S.p.A. pag. 39

3.1.4. Malta GeoCalce – Kerakoll S.p.A. *pag. 40*

3.1.5. Mix design dei provini. *pag. 42*

3.2. Realizzazione dei provini *pag. 46*

3.3. Prove sperimentali eseguite *pag. 48*

3.3.1. Prova di flessione e compressione *pag. 49*

3.3.2. Prova di trazione (tensile test) *pag. 50*

3.3.3. Prova pull-off *pag. 52*

4. Risultati e conclusioni

4.1. Elaborazione dei dati *pag. 54*

4.2. Prove di flessione e compressione *pag. 54*

4.3. Prove di pull-off *pag. 59*

4.4. Prove di trazione *pag. 61*

5. Conclusioni *pag. 67*

Bibliografia

Premessa

Il nostro Paese è caratterizzato dall'avere un patrimonio architettonico storico molto ricco, sia monumentale sia riguardante le abitazioni caratteristiche delle diverse città, da preservare e poter tramandare alle generazioni future. Il deterioramento e i danni alle strutture evidenziano la vulnerabilità del costruito storico a molteplici fattori, tra i più rilevanti quelli dovuti all'attività sismica, definendo così la necessità di conferire loro un adeguato livello di sicurezza. Gli interventi di rinforzo strutturale su manufatti storici uniscono alle complessità intrinseche del manufatto quelle derivanti dalla necessità di optare per soluzioni in grado di soddisfare i requisiti individuati in sede progettuale, allo stesso tempo poco invasive e totalmente compatibili con i materiali originali.

In linea a tutto ciò a partire dagli anni Sessanta ci si è volti verso lo sviluppo di tecnologie innovative ad integrazione dei sistemi tradizionali. Intorno agli anni Novanta hanno preso campo i materiali compositi con ampie applicazioni per strutture in cemento armato e muratura. In realtà questi materiali nacquero e furono sviluppati in altri settori come quello navale, aeronautico, spaziale o automobilistico, per poi trasferirne le conoscenze nel campo edilizio.

Tali materiali compositi permettono notevoli miglioramenti sulla capacità portante degli elementi strutturali dovuti alle loro caratteristiche meccaniche. Ne esistono di diversi tipi, i primi in ordine cronologico ad essere stati introdotti nel settore edile sono gli FRP (Fiber Reinforced Polymers), generalmente realizzati mediante l'impiego di fibre lunghe e continue a base di vetro, carbonio o arammide, ed immerse in una matrice polimerica termoindurente. Negli ultimi anni sono stati sviluppati nuovi sistemi in grado di affiancare gli FRP, ma la loro composizione è differente rispetto ai primi, in quanto si realizzano dall'unione di reti di fibra con una matrice inorganica, da cui prendono il nome di FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix).

Obiettivi della ricerca

Nel presente lavoro è stato indagato il comportamento meccanico di provini FRCM con matrici geopolimeriche con l'applicazione di fibre di rinforzo di basalto e vetro. A tal fine sono state condotte prove di trazione diretta sul composito, prove di pull-off della malta dal supporto e prove di compressione e flessione sulla malta.
Infine, tramite i risultati ottenuti in seguito alle prove sperimentali, è stata valutata la risposta meccanica di ognuno di essi e confrontate tra loro.

Organizzazione della tesi

La tesi si compone di tre capitoli.
Nel primo viene descritta la famiglia dei materiali compositi, con le diverse classificazioni che si possono fare e i diversi materiali componenti utilizzabili come matrici e rinforzi.
Nel secondo capitolo vengono presentati gli FRCM con le loro caratteristiche e proprietà che li distinguono dagli FRP e dagli altri compositi. Sono stati illustrati aspetti rilevanti come la densità, comportamento ad alte temperature, comportamento al fuoco, dilatazione termica, contenuto di fibre, permeabilità all'acqua, ritiro e resistenza ai cicli di gelo-disgelo. All'interno dello stesso vengono introdotti i sistemi FRCM con matrici geopolimeriche, illustrando che si intende per geopolimeri, i processi di produzione, le polveri alluminosilicatiche e gli attivatori alcalini utilizzabili, nonché riportando proprietà e vantaggi nel loro impiego nel settore edile.
Nel terzo capitolo si espone il programma sperimentale eseguito, a partire dai materiali necessari per la produzione dei provini, che saranno poi sottoposti a prove di trazione diretta, pull-off e compressione sulla malta. Una volta eseguite, sono stati analizzati i risultati e tratte delle conclusioni riguardo i diversi sistemi testati.

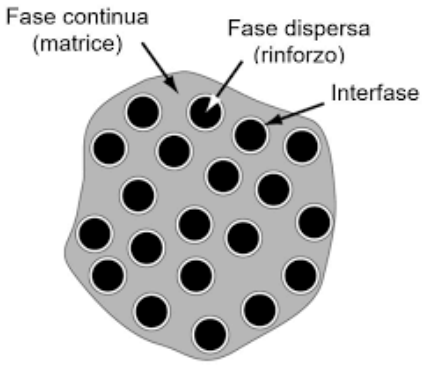
1. Introduzione

1.1. Materiali compositi

Quello che si intende per materiale composito è un sistema eterogeneo di due o più componenti, detti fasi. Solitamente le diverse fasi all'interno di un composito sono materiali differenti, fatta eccezione in rari casi come il SiC/SiC e SRPP. Si possono identificare come materiali compositi coloro che sono costituiti da due o più materiali fisicamente distinti e dispersi in modo controllato l'uno nell'altro. La loro caratteristica peculiare è che, in seguito all'unione delle singole fasi, si ottiene un prodotto con delle proprietà superiori a quelle dei singoli componenti. Sebbene si possa pensare che i materiali compositi siano nati recentemente, in realtà il concetto di rinforzare avvalendosi di fibre è molto antico, con addirittura dei riferimenti nella Bibbia.

Le caratteristiche di tali materiali dipendono dalle proprietà, distribuzione e geometria delle fasi, che svolgono ruoli differenti e dipendono dalla messa in opera e dal tipo di composito. Inoltre, è possibile introdurre degli ulteriori componenti con l'obiettivo di implementare le prestazioni finali, come filler (materiale di tipo particellare che conferisce al composito finale un alto grado di anisotropia, nonché resistenza al fuoco, duttilità e abrasione), additivi o fibre corte.

I principali costituenti dei compositi sono una fase continua (matrice), una fase dispersa (rinforzo) e l'interfaccia, che rappresenta la superficie di contatto tra le due.



1.2. Classificazione dei materiali compositi

La classificazione dei materiali compositi può essere effettuata sotto numerosi punti di vista, le più comuni sono quelle sui differenti tipi di matrice e di rinforzo. In base al tipo di matrice si suddividono:

- Compositi a matrice polimerica (PMC), costituita da resine vinilestere, poliestere ed epossidiche;
- Compositi a matrice ceramica (CMC), con maggiore resistenza e tenacità rispetto alle matrici ceramiche non rinforzate, dovute alle fibre di rinforzo che interferiscono con la propagazione delle cricche nella matrice;
- Compositi a matrice metallica (MMC), la cui caratteristica predominante è l'elevato rapporto resistenza/densità;
- Compositi a matrice cementizia.

A seconda del rinforzo si classificano in:

- Rinforzati con particelle, ulteriormente suddivisi in particelle grandi o con dispersione di particelle;
- Fibrorinforzati, con fibre allineate (continue) o corte (discontinue);
- Strutturali.

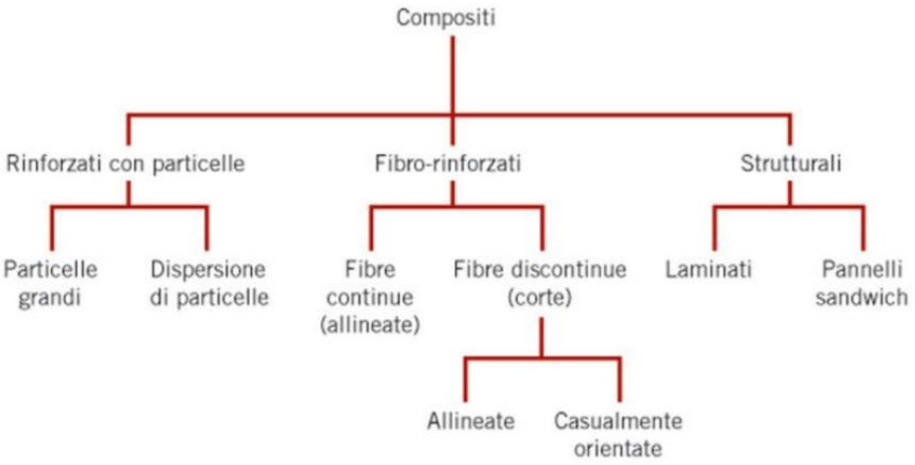


Fig. 1 – Classificazione dei materiali compositi

1.3. Materiali componenti

1.3.1. La matrice

Come definito precedentemente per matrice si intende la fase continua di un materiale composito. Anche se ha caratteristiche meccaniche inferiori alle fibre, svolge comunque ruoli fondamentali in quanto assicura protezione del rinforzo fibroso da agenti atmosferici e da attacchi di natura fisico-meccanica (impatti o abrasioni) e mantiene la stabilità geometrica del composito fungendo da legante. Inoltre, ha anche l'incarico di collante per conferire e mantenere un adeguato livello di adesione tra elemento rinforzato e le fibre, in modo tale da resistere alle sollecitazioni di taglio nell'interfaccia matrice-fibra. Il materiale con il quale si realizza la matrice incide perciò sulle prestazioni del composito.

Nel capitolo antecedente a questo era stata data una prima classificazione dei compositi in relazione alle tipologie di matrici. Più dettagliatamente

possiamo suddividerle in primo luogo tra organiche e inorganiche. La differenza risiede nel legame chimico che le costituisce, nelle prime si ha un legame di tipo covalente, nelle seconde di tipo ionico o anche metallico.
Tra le matrici organiche troviamo quelle termoplastiche e termoindurenti. Esempi di matrici termoplastiche sono il polietilene, policarbonato, PVC o polipropilene; hanno elevata viscosità che rappresenta un loro limite principale ma può essere ridotta con un aumento di temperatura. Rispetto alle termoindurenti inoltre hanno una maggiore tenacità e temperature di transizione elevate. Tra le matrici termoindurenti le più utilizzate sono le resine poliestere, fenoliche ed epossidiche, che presentano una viscosità ridotta permettendo una facile impregnazione delle fibre e buona resistenza ad agenti chimici, restando però molto sensibili all'umidità.

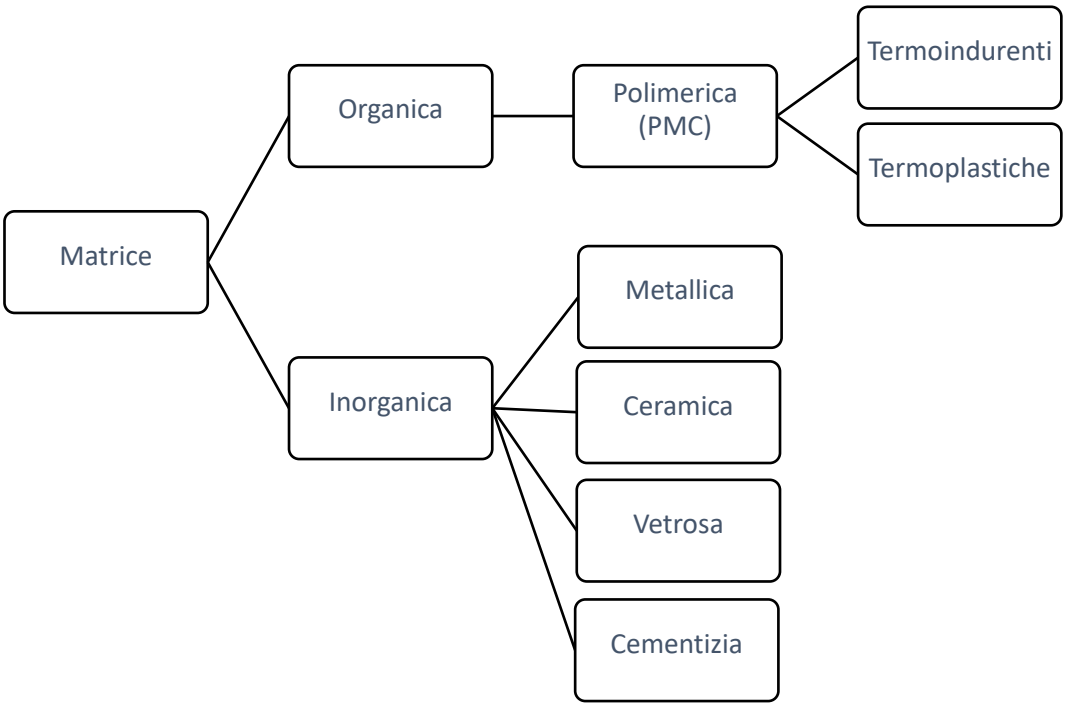


Fig. 2 - Matrici utilizzate nei materiali fibrorinforzati

1.3.2. Le fibre

Le fibre rappresentano la fase dispersa del composito, e come per le matrici anche loro si possono ottenere dalla lavorazione di differenti materiali che appunto resi sotto forma di fibra, ossia con una dimensione predominante sull'altra, riescono ad implementare la loro rigidezza e resistenza. Questo accade poiché al diminuire della sezione del materiale si ha anche una diminuzione dei difetti presenti in esso, che in genere riducono la resistenza. Le caratteristiche delle fibre prese in considerazione sono:

- disposizione;
- densità del materiale;
- geometria;
- forma;
- dimensione.

Sul mercato si trovano come:

- filamento, genericamente con un diametro di 10 μm;
- cavo di filatura o "*tow*", realizzato mettendo insieme migliaia di filamenti sotto forma di fascio;
- filato o "*spun yarn*", filamento composto da fibre tenute insieme tramite torsione;
- filo assemblato o "*roving"*, ossia filati assemblati in modo parallelo;
- tessuti, dove le fibre possono essere organizzate come una rete di fibra, conferendo un comportamento anisotropo, e dove possiamo distinguere l'ordito (warp), la direzione principale, e la trama (weft), la direzione ortogonale alla prima.

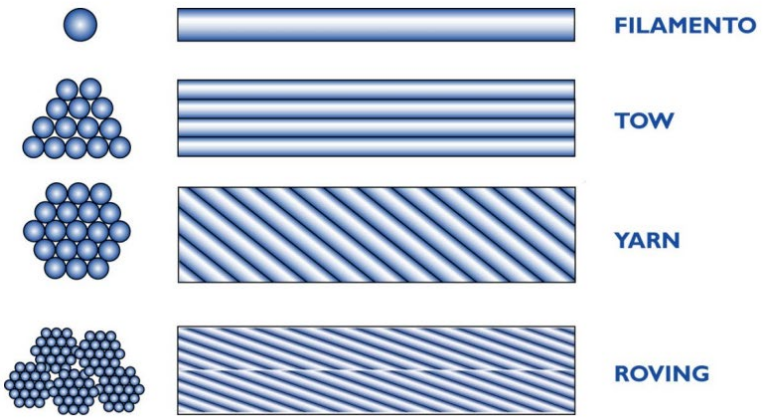


Fig. 3 - Tipologie di fibre disponibili in commercio e classificazione. Immagine tratta da CNR-DT 200/2004, p.11

Le fibre maggiormente utilizzate nei materiali compositi sono fibre di vetro, carbonio e arammidiche.

1.3.2.1. Fibre di vetro

Il componente principale delle fibre di vetro è la silice in forma tetraedrica, con aggiunta di ossidi di alluminio o altri ioni metallici per migliorarne la lavorabilità. La quantità di questi ossidi e ioni ci permettono di suddividerle in fibre di vetro S e fibre di vetro E, con conseguente diversificazione delle proprietà, prima tra tutte la resistenza a trazione che è più elevata nelle fibre di vetro S rispetto a quelle di vetro E. Queste fibre si realizzano in seguito ad un processo denominato filatura a caldo, che come suggerito dal nome, ci permette di ottenere dei filamenti che possono essere trovati in commercio sotto forma di bobine, e quindi in forma di filo, oppure in forma di tessuti a partire dal roving (filamenti messi insieme non ritorti).
Le fibre di vetro hanno un modulo di elasticità normale inferiore rispetto a quelle di carbonio e arammidiche, inoltre risultano sensibili all'abrasione.

Nonostante ciò, da numerosi anni vengono impiegati per sistemi compositi in quanto conferiscono a questi ultimi un elevato rapporto tra resistenza meccanica e peso, una buona resistenza all'umidità e alla corrosione, buon isolamento elettrico, basso costo e di facile fabbricazione.

1.3.2.2. Fibre arammidiche

Come definito all'interno del *CNR-DT 200/2004* le fibre arammidiche, o anche dette aramidiche, sono fibre di natura organica costituite da poliammidi aromatiche in forma estremamente orientata. Si possono trovare in commercio sotto forma di yarn, roving e tessuti, in seguito alla produzione che avviene per estrusione ad alta temperatura e velocità del polimero in soluzione, successivamente raffreddato ed essiccato. Vennero introdotte nel mercato nel 1971 da Dupont col nome di Kevlar.

Tra le loro principali proprietà si può notare la bassa densità ed elevata resistenza meccanica, conferendo al composito un basso peso, alta rigidezza e resistenza al danneggiamento e a rottura sotto sforzo.

Sono caratterizzate dall'avere una resistenza a trazione circa otto volte maggiore a quella di compressione, fattore che evidenzia la forte anisotropia della struttura fibrosa. Inoltre, il loro modulo di elasticità normale può essere collocato in una posizione intermedia tra le fibre di vetro e le fibre di carbonio, descritte nel paragrafo successivo. Un altro svantaggio nell'utilizzo delle fibre arammidiche, oltre alla bassa resistenza a compressione, è la degradazione se sottoposte a radiazioni ultraviolette e la forte sensibilità all'umidità, fattori che possono ridurre quasi del 50% la resistenza a trazione.

1.3.2.3. Fibre di carbonio

Le fibre di carbonio vengono prodotte attraverso un processo di decomposizione termica senza ossigeno, detta pirolisi, di diversi precursori organici come fibre di poliacrilonitrile, pece o catrame.

La struttura delle fibre di carbonio non è completamente cristallina come quella della grafite. Il termine "fibre di grafite" viene tuttavia utilizzato nel linguaggio comune, anche se in modo improprio, per indicare fibre con un contenuto di carbonio maggiore del 99%; il termine "fibre di carbonio" indica, invece, fibre con un contenuto di carbonio variabile tra l'80 ed il 95% (CNR-DT 200/2004 p.15). L'anisotropia, come conseguenza dei legami forti tra gli atomi di carbonio sullo stesso piano e le forze di Van der Waals che legano gli atomi trasversalmente, comportano un'alta resistenza in direzione longitudinale della fibra e una resistenza molto minore in direzione trasversale ad essa.

I compositi realizzati con fibre di carbonio presentano bassa densità e basso peso non incidendo negativamente sulla resistenza meccanica e rigidezza, valori che risultano maggiori rispetto alle fibre di vetro e arammidiche.

Di seguito sono riportati grafici e tabella per poter confrontare le diverse tipologie di fibre.

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

Tabella 1 - Confronto tra le proprietà delle fibre e delle matrici più comuni (CNR-DT 200/2004).

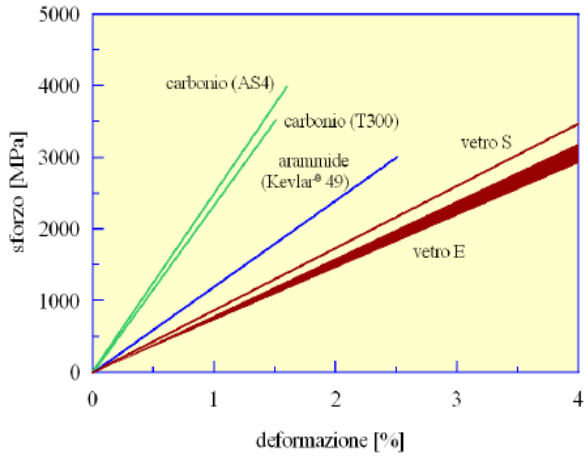


Fig. 4 - Fibre a confronto sul loro comportamento a trazione monoassiale (CNR-DT 200/2004).

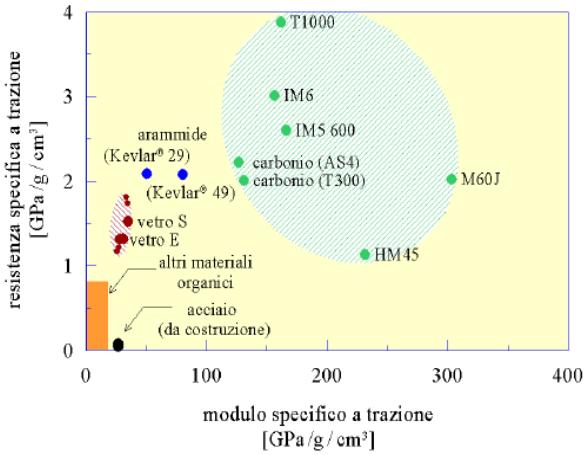


Fig. 5 - Confronto tra le fibre in relazione alla resistenza specifica a trazione e modulo specifico a trazione (CNR-DT 200/2004).

1.4. Fillers e additivi

La principale differenza tra fillers e additivi risiede nel fatto che i primi in genere sono di natura inorganica sotto forma di particelle solide con diametro massimo non superiore ai 2 µm, i secondi invece sono di natura organica solubilizzandosi nella matrice ed agendo a livello molecolare (*Bellomo e D'Ambrosio 2009*). Entrambi vengono utilizzati con lo scopo di ridurre la

microporosità delle matrici allo stato sia fluido che solido, rendendoli meno vulnerabili agli agenti atmosferici. In particolar modo di recente si predilige l'utilizzo di particelle nanometriche che con la loro elevata superficie specifica contribuiscono a migliorare le proprietà meccaniche.

1.4.1. Fillers per matrici organiche

Alcune tipologie di fillers molto utilizzati sono il carbonato di calcio e le clay, ossia argille naturali oppure modificate organicamente. Danno al materiale composito alcuni miglioramenti come incremento del modulo elastico, della lavorabilità e della stabilità dimensionale, nonché una considerevole resistenza al fuoco in quanto si impedisce la diffusione dell'ossigeno che durante la combustione funge da comburente.
Alcune carenze riguardano la capacità finale del composito alla deformazione plastica, scarsa duttilità e resistenza a rottura.

1.4.2. Fillers per matrici inorganiche

I fillers impiegati per le matrici inorganiche sono le fly-ash (ceneri volanti) e la fumo di silice. Le fly-ash hanno composizioni variabili in dipendenza ad alcuni fattori, primo tra tutti il combustibile utilizzato nelle centrali di produzione. In linea generale sono composti da una frazione considerevole di silice amorfa e da silico-alluminati. Oltre che migliorare la durabilità del composito, queste fly-ash si usano in sostituzione parziale del cemento esibendo basse temperature di indurimento.
Il fumo di silice permette di ottenere materiali più compatti poiché le particelle occupano gli interstizi del cemento. Sono un sottoprodotto ottenuto

dalla produzione di silicio e leghe ferro-silicio, con dimensioni sferiche di massimo 0,15 μm.

1.4.3. Additivi per matrici organiche

Quando si parla di additivi per matrici organiche si intendono dei composti organici con basso peso molecolare e che agiscono come catalizzatori, solventi reattivi e plastificanti. Come definito in Bellomo e D'Ambrosio 2009, tali additivi contribuiscono a definire alcune proprietà finali del materiale composito come:

- modificazione del tempo di cura;
- prolungamento del tempo di stoccaggio;
- riduzione di viscosità e porosità;
- miglioramento della resistenza agli agenti atmosferici.

Uno degli aspetti da tenere maggiormente in considerazione sono le condizioni di cura, in relazione alla temperatura, in quanto da loro dipendono i quantitativi diversi di additivi. Se per esempio la cura venisse condotta ad alte temperature sarebbe inutile l'utilizzo di additivi, viceversa se condotta a basse temperature si consiglia l'uso di solventi e catalizzatori per non ridurre le capacità meccaniche finali.

1.4.4. Additivi per matrici inorganiche

Gli additivi generalmente utilizzati per le matrici inorganiche sono:

- acceleranti e ritardanti;
- fluidificanti;
- aeranti;
- anti-ritiro
- tixotropanti.

Gli additivi acceleranti e ritardanti agendo sul processo di presa e indurimento permettono rispettivamente un aumento o una diminuzione della velocità di reazione.

Il compito dei fluidificanti è prevalentemente quello di permettere una migliore dispersione del legante cementizio, riducendo la quantità di acqua nell'impasto senza intaccare la lavorabilità.

Per dare al materiale un'elevata durabilità e resistenza ai cicli gelo-disgelo si usano gli aeranti, ossia sostanze che introducono nella matrice bolle d'aria con diametro dell'ordine dei micron. Grazie proprio a quest'ultime l'acqua presente nel materiale e sotto posta ai cicli di gelo-disgelo può variare di volume senza compromettere o lesionare la matrice, non incidendo negativamente sulla porosità e integrità del composito.

Gli additivi anti-ritiro vengono anche chiamati compensatori di ritiro, caratterizzati da capacità espansive quando entrano in contatto con acqua. Agiscono riducendo la tensione superficiale dell'acqua situata nei pori capillari, con conseguente riduzione della pressione capillare.

I tixotropanti permettono l'aumento di viscosità e riducono gli sfridi durante la fase di applicazione. Sono a base di amido o amido modificato oppure in combinazione con il fumo di silice per maggiori proprietà di tixotropia.

2. Compositi FRCM

2.1. Confronto tra FRP e FRCM

Come accennato nel capitolo introduttivo, l'esigenza sempre maggiore di materiali ad elevate prestazioni utilizzati come rinforzo strutturale ha condotto nel corso degli anni allo sviluppo di tecnologie e prodotti disponibili. I primi prodotti ad essere commercializzati sono stati gli FRP (Fiber Reinforced Polymers). Si ottengono da una matrice polimerica, in genere una resina in grado di garantire una distribuzione uniforme delle tensioni tra le fibre stesse e tra le fibre e l'elemento strutturale da rinforzare, e il rinforzo rappresentato dalle fibre, che conferiscono elevata rigidezza e resistenza a trazione. Gli FRP presentavano procedure di installazioni rapide e semplici, erano leggeri e mostravano buone proprietà di rinforzo (*Appl. Sci. 2020, 10, 2865)*. In accordo a tutto ciò le loro applicazioni divennero numerose, ad esempio per compensare il degrado dei materiali esistenti, messa in sicurezza in caso di eventi sismici, variazioni di destinazione d'uso o rinforzo e confinamento di elementi portanti.

Fig. 6 e 7 (CNR-DT 215/2018)– Applicazione di fasce di tessuto metallico galvanizzato unidirezionale e malta per il rinforzo estradossale di volte murarie (Fig. 6). Confinamento pilastro con FRP (Fig. 7).

Fig. 8 (CNR-DT 215/2018) – Rinforzo di nodi travi-pilastro.

Nonostante gli indiscutibili vantaggi, presentano numerosi limiti:

- vulnerabilità a fattori ambientali come umidità, temperatura, raggi UV;
- non traspirabilità, per cui fortemente sconsigliati in ambienti umidi;
- scarsa resistenza al fuoco;
- considerevole impatto ambientale dovuto al loro difficile smaltimento e riciclo;
- costi elevati.

Oggi l'attenzione è riposta su una seconda generazione di prodotti basati sull'impiego di una matrice inorganica a base di calce o cemento e di tessuti incorporati, denominati con l'acronimo FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix). Tra i loro principali vantaggi troviamo una buona compatibilità con i supporti in muratura e calcestruzzo armato, traspirabilità, facile messa in opera e buona resistenza ad alte temperature, al fuoco e agenti atmosferici.

2.2. Proprietà e caratteristiche

2.2.1. Densità

Una delle priorità maggiori in ambito strutturale è quello di raggiungere una certa capacità portante prevista in sede progettuale con il minimo aumento di peso. Obiettivo largamente soddisfatto in quanto il peso specifico dei sistemi FRCM oscilla tra i 1350 e 2300 kg/m^3, valore che dipende strettamente al loro mix design.

2.2.2. Comportamento ad alte temperature

Come riportato nel capitolo precedente, uno dei principali vantaggi è la buona resistenza alle alte temperature, grazie alla quale i dispositivi FRCM mantengono le proprie caratteristiche meccaniche e adesive per temperature di esercizio molto elevate. Tuttavia, è abbastanza marcata la differenza tra il coefficiente di dilatazione termica lineare che caratterizza la fase polimerica e quello che caratterizza la fase cementizia. Tale inconveniente viene amplificato quando si supera la temperatura di transizione vetrosa della fase polimerica, generalmente intorno ai 100 °C (*Bellomo e D'Ambrosio, 2009*). Ragione per cui è richiesto un opportuno dosaggio delle fibre corte polimeriche per non compromettere la resistenza termica della matrice.

2.2.3. Comportamento al fuoco

Confrontando il comportamento a fuoco degli FRP con FRCM sottoposti ad un'esposizione a carico di incendio, si può osservare che per i primi già dopo 7' si ha una perdita delle proprietà adesive e meccaniche, raggiunti i 15' si ha un distaccamento completo dal supporto. Per i sistemi FRCM a 15' si ha ancora perfetta aderenza con il supporto, questo dovuto all'impiego di matrici cementizie con un comportamento al fuoco molto simile a quello del supporto in calcestruzzo.

2.2.4. Dilatazione termica

La tipologia di aggregato influisce in modo predominante sul coefficiente di dilatazione termica. Se sotto posta ad un effetto termico, la malta può subire un aumento o una contrazione volumetrica. In genere per i conglomerati cementizi si riscontrano valori del coefficiente di dilatazione tra 0,8 e 1,2

mm/m°C, mentre utilizzando i conglomerati leggeri si riduce tale valore fino a 0,6 μm/m a 100°C. Sono invece gli aggregati calcarei e silicei ad aumentare il coefficiente.
Si può dire che gli scostamenti termici non rappresentano un problema per i materiali fibrorinforzati, contribuito anche dalla presenza di un appretto siliconico che riveste le fibre in grado di minimizzare gli effetti dovuti alla dilatazione termica.

2.2.5. Contenuto di fibre

Le tipologie di fibre che compongono gli FRCM sono prevalentemente due:

- le fibre lunghe costituenti l'armatura, il cui dimensionamento si determina allo Stato Limite Ultimo considerando una modalità di crisi per scorrimento della fibra nella matrice cementizia (delaminazione intermedia);
- le fibre disperse nella matrice, impiego ristretto solo ad una frazione in peso dell'1% e una frazione in volume del 0,5-2,5% in base al tipo di fibra.

2.2.6. Permeabilità all'acqua e resistenza alla diffusione del vapore

Uno degli aspetti negativi degli FRP è la scarsa traspirabilità, cosa che non avviene con i sistemi FRCM, permettendo un normale scambio termo-igrometrico con l'ambiente esterno. Problemi riscontrati nel caso degli FRP dovuti proprio ad una traspirabilità quasi nulla sono l'alterazione negativa delle proprietà meccaniche e di adesione. L'umidità presente nel supporto in calcestruzzo resta intrappolata e compromette il processo di catalisi della resina, riducendo la temperatura di transizione vetrosa e di conseguenza

l'adesione fibra-supporto. Negli FRCM invece il legante inorganico non viene influenzato dall'umidità presente nel supporto.
Mescolando additivi polimerici acrilici in opportune quantità alla frazione inorganica, si permette la formazione di un film organico che riveste le superfici dei pori capillari, riducendo la permeabilità all'acqua in grado anche di veicolare agenti aggressivi esterni. Tuttavia, si penalizza in questo modo la permeabilità al vapore del supporto cementizio, che rimane comunque maggiore rispetto ai sistemi FRP anche del 50%.

2.2.7. Ritiro

La malta utilizzata, oltre per l'effetto di dilatazione termica, può subire delle variazioni di volume a causa dell'umidità relativa ambientale, effetto denominato ritiro igrometrico. Se esposta ad aria secca il volume diminuisce e si ha ritiro, con un alto tasso di umidità invece si rigonfia.
Per evitare il ritiro, fenomeno su cui ricade maggiormente l'attenzione in quanto può portare ad una fessurazione indotta da sforzi di trazione, si impiegano fibre disperse o additivi anti-ritiro che controllano la velocità di evaporazione dell'acqua di impasto.

2.2.8. Resistenza ai cicli di gelo-disgelo

Per implementare la resistenza ai cicli di gelo-disgelo si utilizzano additivi aeranti. L'acqua eventualmente presente nei pori capillari della malta, se solidifica può aumentare il proprio volume del 9%, aumentando la pressione esercitata e comportare la rottura della struttura cementizia. Tali additivi introducono delle microbolle con diametro tra i 100 e i 300 μm che contengono l'aumento di volume dell'acqua e di pressione indotta.

2.3. Sistemi FRGM e CRGM

In un contesto globale che ha come obiettivo la riqualificazione statica ed energetica, il ricorso a tecniche tradizionali di rinforzo presenta numerose limitazioni, quali ad esempio l'incremento della massa strutturale e la scarsa durabilità. Un tema di ricerca molto attuale riguarda l'impiego di una malta a base di geopolimeri che funge da matrice in un composito FRCM. I sistemi ottenuti prendono il nome di FRGM (*Fabric Reinforced Geopolymer Mortar*) e CRGM (*Composite Reinforced Geopolymer Mortar*). Rientrano nella nomenclatura SRG (*Steel Reinforced Grout*) e SRGG (*Steel Reinforced Geopolymer Grout*) i materiali compositi nei quali vengono utilizzate fibre di acciaio come rinforzo e rispettivamente delle malte tradizionali e innovative.

Etichetta	Resistenza a trazione (MPa)		Deformazione ultima	
	Media	CoV	Media	CoV
	MPa	%	%	%
FRCM	891	16	0.87	19
FRGM	868	11	0.87	19
SRG	1909	9	2.34	9
SRGG	1959	6	2.03	11

Tabella 2 – Caratterizzazione meccanica a trazione.

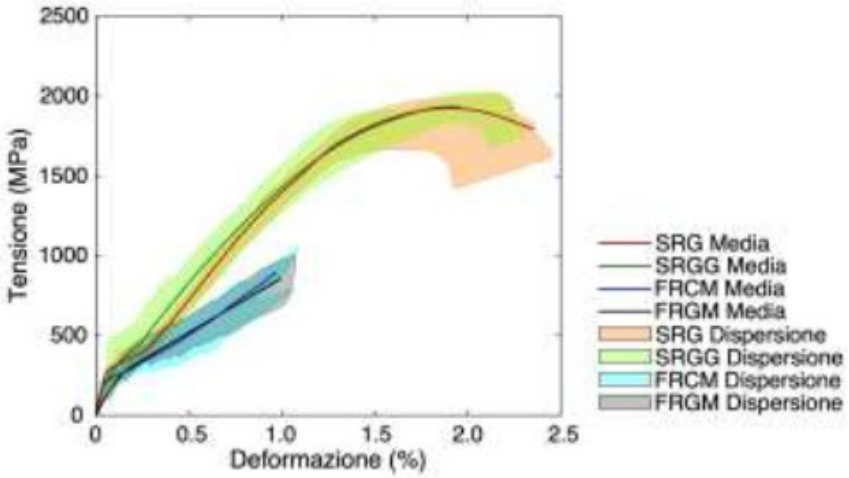


Fig. 9 – Confronto tra i legami costitutivi a trazione.

Analizzando il confronto tra i legami costitutivi e le proprietà meccaniche a trazione che li caratterizza, si può notare che i sistemi FRCM e FRGM presentano un legame costitutivo bilineare, gli SRG e SRGG invece viene assimilato ad una trilatera; inoltre, risultano confrontabili la resistenza a trazione e la deformazione ultima nei compositi con malta innovativa e tradizionale.

Esempi di applicazioni di tali sistemi con malta innovativa sono riguardanti il rinforzo sia di elementi verticali sia di quelli orizzontali, consentendo un incremento considerevole della resistenza a taglio e in termini di duttilità. Eseguendo un set-up di prova energetica, che consiste nel considerare una porzione di pannello murario in cui un lato viene continuamente riscaldato da lampade alogene e l'altro rimane freddo, si possono trarre considerazioni riguardanti le capacità termiche degli stessi pannelli. In linea generale tutti i sistemi applicati favoriscono una diminuzione della trasmittanza termica, ma in particolar modo quelli a base di malta geo-polimerica danno risultati più significativi. Comparandoli, gli FRCM sono responsabili di una riduzione dell'11% della trasmittanza termica, gli FRGM bensì del 46%.

Le malte geopolimeriche prima citate, si possono ottenere da numerose tipologie differenti di polveri reattive prodotte a partire da fonti naturali,

sottoprodotti industriali o attivatori alcalini. Prendendo in esame questi ultimi, il loro contenuto e natura influiscono sulle proprietà meccaniche, durabilità e comportamento a ritiro delle malte prodotte. Se si utilizzano polveri reattive come metacaolino o cenere volante si rendono necessarie temperature miti e soluzioni alcaline attivanti molto forti.
I principali prodotti di reazione dell'attivazione alcalina sono il C-A-S-H (un gel di alluminosilicato di calcio idrato) e l'idrotalcite. Il primo influisce particolarmente sulla resistenza a compressione e a flessione della matrice ed è meno cristallino del C-S-H (prodotto del legante Portland in seguito alla sua idratazione).
Caratteristica che accomuna tutti i materiali attivati con alcali è il ritiro a cui sono soggetti. È un aspetto molto rilevante, in quanto il ritiro generato dalla perdita di umidità ed essiccazione comporta fessurazioni, da cui ne consegue perdita di durabilità e funzionalità. Una soluzione è rappresentata dall'aggiunta di CaO che in percentuali modeste rispetto al peso delle polveri reattive può aiutare a compensare il ritiro delle malte attivate con alcali.

2.3.1. Geopolimeri e processo di geopolimerizzazione

I geopolimeri sono materiali inorganici con composizioni chimiche simili a quelle delle zeoliti (minerali), ma al contrario di queste dotati di una struttura amorfa. In genere un geopolimero è ottenuto dalla combinazione di una polvere di un materiale alluminosilicatico, tipicamente i metacaolini dalla calcinazione a 500-800°C del caolino, la loppa di altoforno o le ceneri volanti (fly-ash) provenienti dalle centrali a carbone con una soluzione di un silicato alcalino (sodio o potassio).
Il processo di produzione viene detto geopolimerizzazione o geosintesi. Gli atomi di silicio (Si) e di alluminio (Al) si legano tra loro attraverso legami covalenti conferendo al geopolimero finale una struttura bidimensionale o tridimensionale in relazione al rapporto atomico Si/Al.

Questo procedimento è abbastanza complesso, articolabile in diverse fasi. La fase preliminare consiste nella selezione delle materie prime, che possono essere una polvere allumino-silicatica e una soluzione acquosa di idrossidi e silicati alcalini. Dopodiché si procede con la dissoluzione di alluminio e silicio in una soluzione fortemente alcalina, con conseguente diffusione delle due specie. Si formerà un gel dovuto alla policondensazione di alluminio e silicio nella soluzione alcalina, e dalla condensazione di questo gel si ottiene il prodotto geopolimerico.

2.3.2. Polveri alluminosilicatiche

Le tipologie di polveri alluminosilicatiche più diffuse ed impiegate sono:

- Metacaolino;
- Cenere volante;
- Loppa d'altoforno;
- Pozzolane;
- Polveri minerali.

Scegliere in modo opportuno una di queste elencate è molto importante. Da esse dipenderà in primo luogo la formazione del geopolimero. Come descritto nel capitolo precedente, si prediligono sostanze ricche in silicio ed alluminio per favorire la geopolimerizzazione. Esistono comunque dei processi per incrementare la reattività di tali polveri, un esempio sottoporli alla calcinazione, processo di attivazione termico per aumentare la loro componente amorfa.

2.3.3. Metacaolino

La materia prima più reattiva nella geopolimerizzazione è il metacaolino. Non tutti i metacaolini reagiscono allo stesso modo conducendo a prodotti analoghi durante il processo. Ciò che influisce sulla sua reattività, oltre alla

sua disposizione spaziale dei cationi, è la morfologia, composizione chimica-mineralogica, tecnologia di produzione e la deidrossilazione. Quest'ultimo è un processo nel quale al di sopra dei 500 °C si forma metacaolino; si può suddividere in due modi:

- intra-deidrossilazione, che permette la formazione di metacaolino con alluminio in pentacoordinazione, la più reattiva nella geopolimerizzazione.
- Inter-deidrossilazione, comporta la formazione di alluminio in tetracoordinazione.

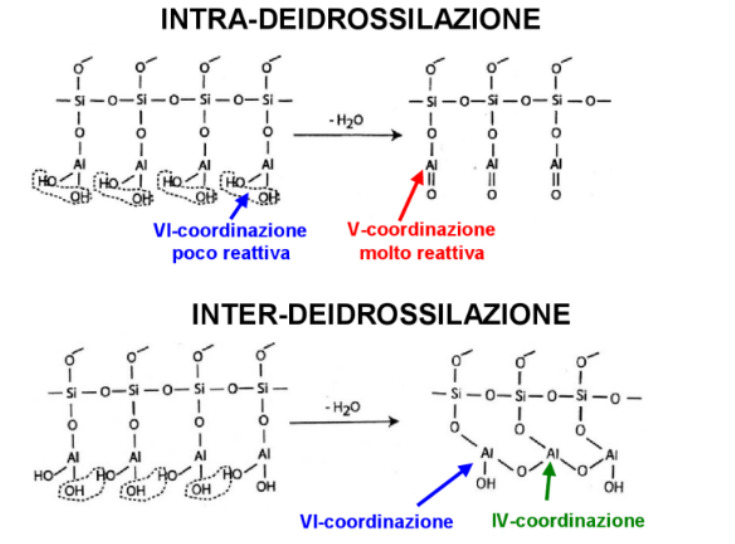


Fig. 10 – Deidrossilazione del caolino.

2.3.4. Cenere volante

Le ceneri volanti si presentano come una polvere di colore grigio, costituita da particelle sferiche vetrose il cui diametro è compreso tra 1 e 100 µm. si ottengono come sottoprodotto della combustione di carbone polverizzato nelle centrali termoelettriche. È costituita prevalentemente da silice, allumina e ossido di ferro; composti che generano reagendo con la calce prodotti di idratazione paragonabili a quelli ottenuti con l'idratazione del cemento

Portland. L'impiego della cenere volante garantisce un minor sviluppo di calore rispetto all'idratazione, maggiore impermeabilità e fluidità dell'impasto fresco, a confronto il cemento Portland.

2.3.5. Loppa d'altoforno

La loppa d'altoforno, detta anche scoria d'altoforno, è un sottoprodotto derivante dalla produzione della ghisa. Tale scoria assume un' attività idraulica se viene raffreddata in modo brusco, favorendo la formazione di silice amorfa. La sua composizione generalmente risulta essere per almeno due terzi da ossido di calcio, ossido di magnesio e biossido di silicio, la restante percentuale da ossido di alluminio.

2.3.6. Pozzolane

La pozzolana si presenta con una granulometria variabile tra limo e sabbia, presentando una struttura amorfa composta per lo più da silice. A contatto con l'acqua e in presenza di calce diventa un ottimo legante idraulico, ma da sola non indurisce e quindi possiede capacità idrauliche inferiori al cemento Portland. Ragione per cui in campo edile si trova generalmente accoppiata con quest'ultimo: durante il processo di idratazione del cemento si libera della calce che permette l'indurimento della pozzolana.

2.3.7. Attivatori alcalini

Tendenzialmente tra gli attivatori alcalini maggiormente impiegati troviamo NaOH, KOH, K_2SiO_3, Na_2SiO_3, Na_2CO_3, K_2CO_3, Na_2SO_4, K_2SO_4 o piccole quantità di cemento clinker; ossia gli idrossidi, i solfati, carbonati e silicati alcalini. Uno dei fattori da cui dipende la resistenza meccanica dei prodotti

geopolimerici è il pH. Con bassi valori di pH l'impasto rimane di una consistenza pressoché viscosa, viceversa con elevati valori si aumenta la sua lavorabilità.

I cationi degli attivatori alcalini incidono sul processo di geopolimerizzazione: i cationi di dimensioni maggiori favoriscono la polimerizzazione e l'indurimento e di conseguenza la resistenza meccanica, quelli di piccole dimensioni hanno una densità di carica maggiore, aiutano quindi la dissoluzione delle polveri di alluminio e di silicio nel processo di idrolisi alcalina.

Consigliabile è l'uso di attivatori alcalini solidi, poiché le soluzioni acquose fortemente alcaline risultano irritanti e corrosive, e potrebbero compromettere le prestazioni finali.

2.4. Tipologie di prove sperimentali

2.4.1. Prove per la caratterizzazione meccanica dei materiali compositi

Noti tutti i vantaggi derivanti dall'impiego dei sistemi FRCM, recentemente sono state fornite fondamentali informazioni derivanti da studi di ricerca sulla risposta a trazione, sulla durabilità e sulle prestazioni di adesione sia su muratura che su calcestruzzo. Le diverse applicazioni dei sistemi FRCM insieme al gran numero di malte e rinforzi disponibili conducono ad un'ampia variabilità in termini di comportamento meccanico. È dunque necessaria una procedura per caratterizzare i compositi FRCM, in grado di fornire parametri fondamentali per la progettazione del rinforzo e una qualificazione del composito nel suo complesso e non singolarmente dei suoi componenti.

Una procedura per la qualificazione degli FRCM combina i risultati delle prove dirette di trazione e prove di adesione**,** identificando il carico di rottura, la resistenza e le prestazioni di legame.

2.4.2. Prove di trazione diretta

Le prove di trazione diretta forniscono parametri fondamentali come il modulo di elasticità e la resistenza a trazione del composito. Possono essere determinanti per il confinamento di colonne, pilastri o nodi strutturali, nelle quali è possibile che si verifichi una rottura a trazione del rinforzo.
Queste prove vengono eseguite su provini di geometria prismatica, con uno spessore di 1 cm e di una larghezza corrispondente a un multiplo della distanza tra i fasci delle fibre. Per evitare lo scorrimento nelle sezioni di presa dovuto allo sforzo normale applicato, i campioni sono bloccati nei cunei di serraggio del macchinario. Per proteggere la malta dallo schiacciamento e avere una distribuzione omogenea delle sollecitazioni si possono applicare degli ulteriori rinforzi.
I risultati ottenuti possono considerarsi come una relazione tra la sollecitazione media e deformazione media, la prima riferita all'area della sezione trasversale, la seconda può essere stabilita dallo spostamento globale misurato tra i cunei di serraggio oppure usando estensimetri o trasduttori sulla matrice.
Un aspetto molto importante da considerare è che tali risultati possono differire non sono per via delle caratteristiche dei materiali componenti, ma bensì dai set up di prova. Non essendoci dei parametri che li standardizzino, ne sono stati sviluppati diversi in letteratura. I principali set-up si differenziano per:

- metodo di applicazione del carico;
- geometria dei provini;
- strumenti per misurare spostamenti e deformazioni.

2.4.2.1. Metodo di applicazione del carico

I principali metodi di applicazione del carico sono due. Il primo, denominato rigid load application, consiste nel fissare alle estremità del provino delle piastre metalliche, con il quale è possibile il trasferimento del carico tra il dispositivo di ancoraggio e il provino mediante lo sviluppo di tensioni di adesione e taglio. Il dispositivo di trasferimento in particolare deve essere più rigido del provino per evitare fessurazioni della matrice nella zona di ancoraggio.
Nel secondo (soft clamping), applicando forze di compressione all'estremità del composito si sviluppano delle forze di attrito che permettono il trasferimento di carico. L'irregolarità della superficie della malta può condurre a concentrazioni di tensioni, per ovviare tutto questo si possono predisporre lastre di alluminio, in gomma o FRP, in modo il carico applicato è per attrito.

2.4.2.2. Geometria dei provini

Le diverse forme geometriche in cui possiamo trovare i provini sono essenzialmente tre come riportato in letteratura. I più semplici da realizzare e i più utilizzati sono i provini rettangolari con sezione trasversale piana e costante. Meno diffusi sono quelli a sezione non costante e sagomata, nei quali rientrano provini con un allargamento nel piano di rinforzo, e altri dove è presente un incremento delle sezioni di estremità in direzione trasversale, nella quale è consentito l'inserimento di piastre metalliche perforate permettendo il trasferimento del carico al provino.

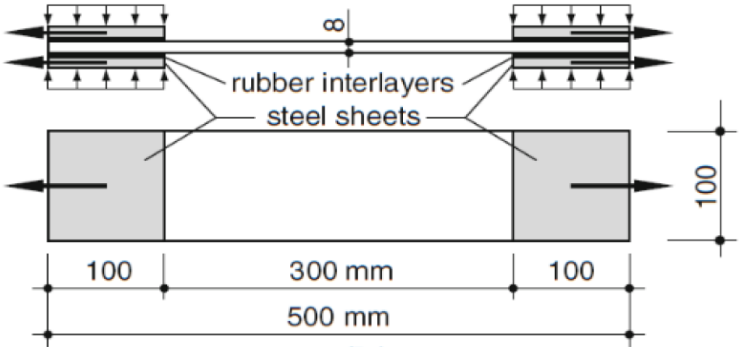


Fig. 11 – Provino rettangolare a sezione trasversale piana e costante.

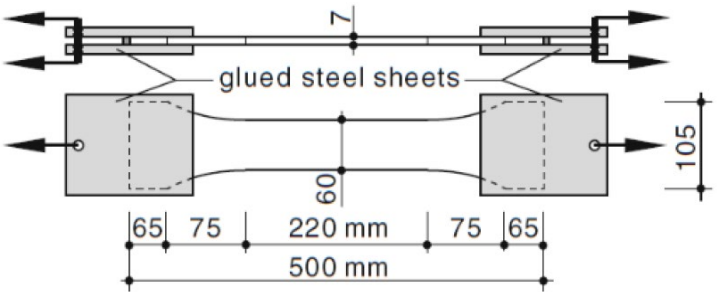


Fig. 12 – Provino a sezione sagomata con piano di rinforzo allargato.

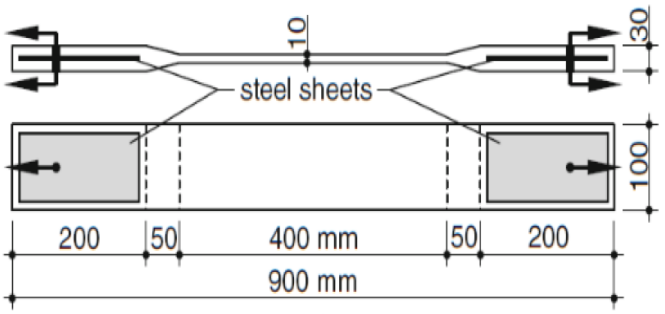


Fig. 13 – Provino a sezione non costante con incremento dello spessore alle estremità in direzione trasversale.

2.4.2.3. Strumenti di acquisizione di spostamenti e deformazioni

Gli strumenti utilizzabili rappresentano la terza variabile per le prove di trazione diretta. Un metodo molto usato si basa sul misurare gli spostamenti del sistema di presa del macchinario avvalendosi di trasduttori di spostamento. Le lesioni nelle zone periferiche dovute al pull-out, tuttavia, possono alterare il dato misurato , rendendo non sufficiente la descrizione del comportamento a rottura del materiale composito in esame.

Una procedura suggerita in RILEM 232-TDT consiste nell'impiego di estensimetri con determinati range di misura, metodologia rivelata essere la più idonea e conveniente.

Per un'analisi approfondita dell'avanzamento delle fessurazioni nella matrice sono particolarmente utili le immagini ottiche o digitali (Digital Image Correlation), di facile utilizzo e bassi costi. Come svantaggio presentano una sensibilità nella perdita di messa a fuoco, dovuta a spostamenti fuori dal piano del provino, e una parte analitica complessa e dispendiosa di tempo. Come descritto in "De Santis & De Felice 2015", molti autori ricorrono nei loro studi all'utilizzo contemporaneo di più metodologie di misura, ottenendo un controllo affidabile di disallineamenti, flessioni o slittamento dei provini in fase di sperimentazione.

Un ulteriore complicazione nel sistema di misurazione consiste nel fatto che gli strumenti di misurazione sono progettati per essere applicati esternamente al provino, tralasciando informazioni sui fenomeni di scorrimento delle fasi componenti.

2.4.2.4. Risposta dei compositi FRCM

La risposta dei provini FRCM sottoposti a prova di trazione viene caratterizzata in tre stadi:

- stadio I, non fessurato;
- stadio II, sviluppo della fessura;
- stadio III, fessurazione.

Le proprietà meccaniche della malta e del tessuto e il trasferimento delle sollecitazioni tra le fasi determina il comportamento nei primi due stadi. Sono parametri che possono influire sulla durabilità del sistema e sull'ampiezza e propagazione delle fessurazioni. Proprio quest'ultime definiscono infatti la fine e l'inizio dello stadio successivo. Nello stadio I o anche detta fase I abbiamo il provino integro e la sua risposta alle sollecitazioni è lineare. La comparsa della prima cricca identifica convenzionalmente il passaggio allo stadio 2. Una volta stabilizzato il numero di fessure si ha l'inizio della fase 3, caratterizzato da un incremento di rigidità e una risposta non lineare con conseguente allargamento delle fessure esistenti.

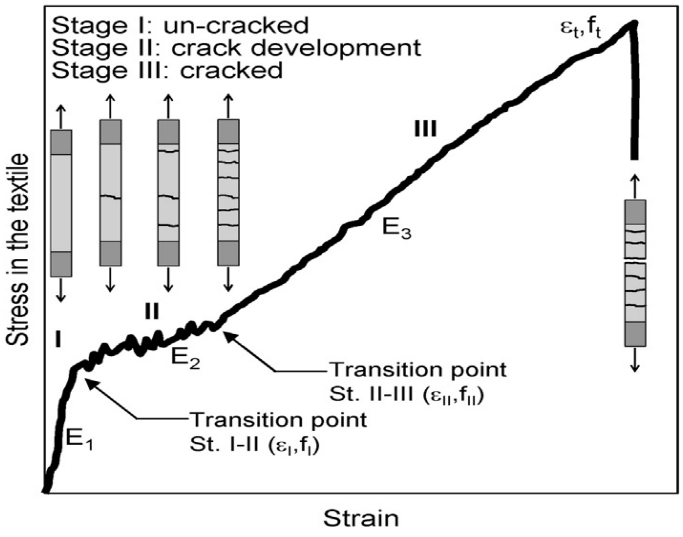


Fig. 14 – Tipica curva di risposta sforzo-deformazione dei sistemi FRCM sotto carico di trazione (L. Ascione et al. / composites part (2015)).

2.4.3. Prove di adesione

Determinare le proprietà di adesione dei materiali compositi fibrorinforzati è uno degli aspetti fondamentali. È proprio l'adesione tra il rinforzo e la matrice che consente un'opportuna e omogenea dissipazione delle tensioni in atto, inoltre una sua perdita comporta a fenomeni di crisi e di delaminazione interlaminare. Le diverse modalità di crisi in realtà cambiano in base al tipo di compositi in esame.

Per quanto riguarda gli FRP possiamo suddividere, secondo il CNR-DT 200 R1 2013, le modalità di crisi in quattro tipologie:

- distacco di estremità;
- distacco dovuto a fessure per flessione;
- distacco dovuto a fessure diagonali da taglio;
- distacco per la superficie irregolare del calcestruzzo.

L'aspetto che accomuna tutte è la relazione linearmente proporzionale alla resistenza a trazione del supporto.

Negli FRCM l'adesione tra le fasi rappresenta un fenomeno più complesso in cui fattori intrinseci sono per esempio la densità delle fibre, la compatibilità chimica e proprietà meccaniche dei materiali componenti.

Nelle prove di adesione di tali provini possono verificarsi sei differenti tipologie di crisi:

- rottura a trazione della fibra esterna alla matrice;
- rottura a trazione della fibra interna alla matrice e fessurazioni nello strato esterno della matrice;
- perdita di adesione con crisi nel supporto;
- perdita di adesione nell'interfaccia substrato-matrice;
- perdita di adesione all'interfaccia matrice-fibra;
- scorrimento della fibra interno alla matrice.

Generalmente le modalità più frequenti riguardano proprio lo scorrimento della fibra nella matrice.

3. Programma sperimentale

In questo capitolo verrà descritta l'attività sperimentale svolta nel Laboratorio Materiali del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica, consistente nella conduzione di prove per la caratterizzazione meccanica dei sistemi FRCM.
Sarà illustrata la procedura di produzione dei provini con la descrizione dei materiali, degli strumenti e macchinari in fase di sperimentazione, nonché i risultati e le osservazioni che derivano dal confronto tra i provini con matrice geopolimerica e matrice cementizia.

3.1. I provini

I differenti provini FRCM prodotti si basano sull'unione di differenti componenti. I rinforzi utilizzati sono le fibre di vetro (Glasstex Struktura 320) e le fibre di basalto (Glasstex Struktura BA 420). Le matrici utilizzate sono in totale 6:

- n°2 geomalte (la GeoCalce Kerakoll e la GeoLite Kerakoll);
- n°2 matrici geopolimeriche a base di metacaolino (MetaStar 501) con due classi di resistenza differenti;
- n°2 matrici geopolimeriche a base di cenere volante con due classi di resistenza differenti.

Sono stati realizzati in totale 32 provini:

- n°4 provini con fibre di vetro e matrice in metacaolino;
- n°4 con fibre di basalto e matrice in metacaolino;

- n°4 con fibre di vetro e cenere volante;
- n°4 con cenere volante e fibre di basalto;
- n°4 provini in fibre di basalto e matrice a base di geolite;
- n°4 in fibre di vetro e geolite;
- n°4 sistemi in fibre di basalto e geocalce;
- n°4 provini impiegando fibre di vetro e geocalce.

3.1.1. Glasstex Struktura 320

La fibra di vetro impiegata come rinforzo è una rete in fibra AR GLASS con contenuto di zirconio > 16% costruita a giro inglese apprettata. Adatta per il rinforzo strutturale e il consolidamento di murature, solai, massetti, volte, calcestruzzo e pavimentazioni. Idonea per l'antisfondellamento di solai e per l' antiribaltamento delle partizioni primarie e secondarie.

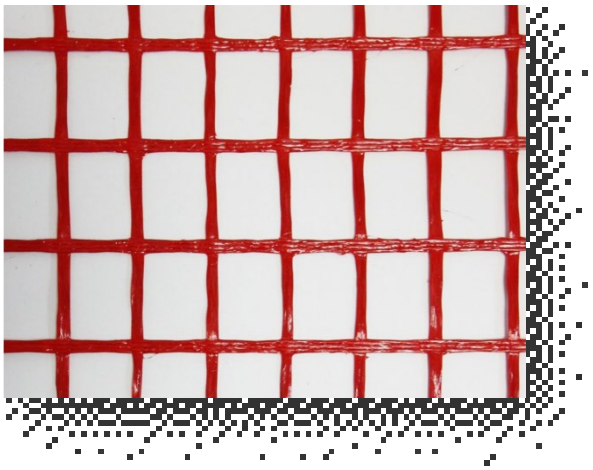


Fig. 15 – Fibra di vetro Glasstex Struktura 320

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE	VALORE NOMINALE	TOLLERANZE	NORMATIVA
PESO TESSUTO APPRETTATO	**320 g/m²**	+/- 5 %	ISO 3374:2000
PESO TESSUTO GREGGIO	**240 g/m²**	+/- 5 %	ISO 3374:2000
CONTENUTO di BIOSSIDO DI ZIRCONIO	> 16 %	-	-
SPESSORE MEDIO TESSUTO APPRETTATO	1,15 mm	+/- 5 %	VIM JCGM 200:2012
DIMENSIONE MAGLIE	20x20 mm	+/- 5 %	VIM JCGM 200:2012
AREA NOMINALE SINGOLO FILO	0,9981 mm²	-	CERTIFICATO 2018/0915 POLIMI
COLORE	ROSSO	-	-
SPESSORE EQUIVALENTE (ordito)	0,0597 mm	+/- 5%	CNR-DT 200 R1/2013
SPESSORE EQUIVALENTE (trama)	0,0597 mm	+/- 5%	CNR-DT 200 R1/2013
ALLUNGAMENTO A ROTTURA	1,80 %	-	CERTIFICATO 2018/0915 POLIMI
LARGHEZZA MEDIA DEL FILO	2,00 mm	-	-
NUMERO FILI IN ORDITO	50	-	-
NUMERO FILI IN TRAMA	50	-	-
ALTEZZA ROTOLO	100/200 cm	-	UNI 9311/2
LUNGHEZZA ROTOLO	50/50 m	-	UNI 9311/2

CARATTERISTICHE DI PROGETTO	VALORE NOMINALE	TOLLERANZE	NORMATIVA
DENSITA' VETRO	2,68 g/cm³	+/- 5 %	-
MODULO ELASTICO VETRO	72.000 N/mm²	+/- 5%	-
RESISTENZA A TRAZIONE SINGOLO FILO (ordito) velocità di trazione 1 mm/min	**1,116 kN**		CERTIFICATO 2018/0915 POLIMI
RESISTENZA A TRAZIONE SINGOLO FILO (ordito) velocità di trazione 10 mm/min	**1,270 kN**	+/- 5%	SECONDO NORMA ISO 527-4,5 : 1997
RESISTENZA A TRAZIONE SINGOLO FILO (ordito) velocità di trazione 100 mm/min	**1,450 kN**		SECONDO NORMA ISO 10406-1:2015 STS-17/0013
RESISTENZA A TRAZIONE SINGOLO FILO (trama) velocità di trazione 1 mm/min	**1,122 kN**		CERTIFICATO 2018/0915 POLIMI
RESISTENZA A TRAZIONE SINGOLO FILO (trama) velocità di trazione 10 mm/min	**1,370 kN**	+/- 5%	SECONDO NORMA ISO 527-4,5 : 1997
RESISTENZA A TRAZIONE SINGOLO FILO (trama) velocità di trazione 100 mm/min	**1,380 kN**		SECONDO NORMA ISO 10406-1:2015 STS-17/0013
RESISTENZA A TRAZIONE (ordito) velocità di trazione 1 mm/min	**55 kN/m**		
RESISTENZA A TRAZIONE (ordito) velocità di trazione 10 mm/min	**63,5 kN/m**	+/- 5%	-
RESISTENZA A TRAZIONE (ordito) velocità di trazione 100 mm/min	**72,5 kN/m**		
RESISTENZA A TRAZIONE (trama) velocità di trazione 1 mm/min	**55 kN/m**		
RESISTENZA A TRAZIONE (trama) velocità di trazione 10 mm/min	**68,5 kN/m**	+/- 5%	-
RESISTENZA A TRAZIONE (trama) velocità di trazione 100 mm/min	**69 kN/m**		
SEZIONE RESISTENTE (ordito)	49,905 mm²/m	+/- 5%	CNR-DT 200 R1/2013
SEZIONE RESISTENTE (trama)	49,905 mm²/m	+/- 5%	CNR-DT 200 R1/2013
TENSIONE DI ROTTURA (ordito)	1118.33 N/mm²	+/- 5%	CERTIFICATO 2018/0915 POLIMI
TENSIONE DI ROTTURA (trama)	1124.20 N/mm²	+/- 5%	CERTIFICATO 2018/0915 POLIMI
MODULO ELASTICO RETE (ordito)	**66.750 N/mm²**	+/- 5%	CERTIFICATO 2018/0915 POLIMI
MODULO ELASTICO RETE (trama)	**61.680 N/mm²**	+/- 5%	CERTIFICATO 2018/0915 POLIMI

Sono riportati i valori presenti nella scheda tecnica del prodotto, relativi alle caratteristiche geometriche e alle caratteristiche di progetto riguardanti le resistenze a trazione specifiche e modulo elastico.

3.1.2. Glasstex Struktura BA 420

L'altro sistema di rinforzo utilizzato è la Glasstex Struktura BA 420, è una rete strutturale biassiale e bilanciata in fibra di basalto e acciaio apprettata con un coating a base di poliestere alcali resistente, prodotto adatto per il rinforzo e consolidamento strutturale di volte e murature. In generale sulle fibre di basalto si può dire che sono fibre inorganiche di origine naturale, quindi eco-sostenibili. Presentano proprietà meccaniche confrontabili con le fibre di vetro, costo inferiore rispetto a quelle di carbonio, mantengono le loro proprietà a basse temperature e buona resistenza alla corrosione e agli acidi. Hanno elevata resistenza al taglio, all'impatto e all'abrasione dovuto al basalto in fibre e ai microfili di acciaio Inox ed eccellenti prestazioni meccaniche per il trattamento con resina all'acqua. Per i rinforzi strutturali risulta essere specifica accoppiata con molteplici tipologie di matrice inorganiche, tra cui le GeoCalce e la GeoLite.

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE	VALORE NOMINALE	TOLLERANZE	NORMATIVA
PESO TESSUTO APPRETTATO	**420 g/m^2**	+/- 5 %	EN 12127:1997
PESO TESSUTO GREGGIO	**365 g/m^2**	+/- 5 %	EN 12127:1997
SPESSORE MEDIO TESSUTO APPRETTATO	1,15 mm	-	-
COLORE	BRONZO	-	-
ALLUNGAMENTO A ROTTURA	< 5 %	-	-
NUMERO FILI IN ORDITO	50	0,5	-
NUMERO FILI IN TRAMA	50	0,5	-
ALTEZZA ROTOLO	100 cm	-	-
LUNGHEZZA ROTOLO	50 m	-	-
RESISTENZA A TRAZIONE (ordito)	132 kN/m	-	-
RESISTENZA A TRAZIONE (trama)	120 kN/m	-	-
PESO DEL ROTOLO	10,5 Kg	-	-

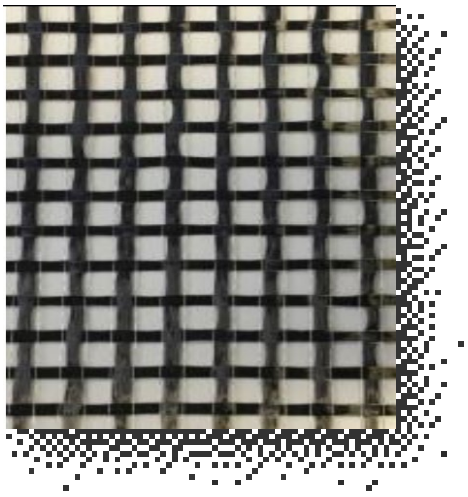


Fig. 16 – Rete in fibra di basalto.

3.1.3. Malta GeoLite – Kerakoll S.p.A.

La malta GeoLite prodotta dalla Kerakoll è una geomalta tixotropica ed ecocompatibile, adibita principalmente per ripristino, rasature e protezione di strutture in calcestruzzo armato. Risulta particolarmente idonea come matrice inorganica minerale per la realizzazione di sistemi di rinforzo strutturale.

Dati tecnici secondo Norma di Qualità Kerakoll		
Aspetto	polvere	
Massa volumica apparente	≈ 1260 kg/m³	UEAtc
Natura mineralogica aggregato	silicatica-carbonatica	
Intervallo granulometrico	0 – 0,5 mm	EN 12192-1
Conservazione	≈ 12 mesi dalla data di produzione in confezione originale e integra; teme l'umidità	
Confezione	sacchi 25 kg	
Acqua d'impasto	≈ 5,1 l / 1 sacco 25 kg	
Spandimento dell'impasto	160 – 180 mm	EN 13395-1
Massa volumica dell'impasto	≈ 2050 kg/m3	
pH dell'impasto	≥ 12,5	
Inizio / Fine presa	> 70 – 80 min. (> 200 – 220 min. a +5 °C) – (> 50 – 60 min. a +30 °C)	
Temperature limite di applicazione	da +5 °C a +40 °C	
Spessore minimo	2 mm	
Spessore massimo per strato	40 mm	
Resa	≈ 17 kg/m² per cm di spessore	

Caratteristica prestazionale	**Metodo di prova**	**Requisiti richiesti EN 1504-7**	**Prestazione GeoLite**
Protezione dalla corrosione	EN 15183	nessuna corrosione	specifica superata
Adesione per taglio	EN 15184	≥ 80% del valore della barra nuda	specifica superata
	Metodo di prova	**Requisiti richiesti EN 1504-3 classe R4**	**GeoLite Prestazione in condizioni CC e PCC**
Resistenza a compressione	EN 12190	≥ 45 MPa (28 gg)	> 20 MPa (24 h)
			> 35 MPa (7 gg)
			> 50 MPa (28 gg)
Resistenza a trazione per flessione	EN 196/1	nessuno	> 5 MPa (24 h)
			> 7 MPa (7 gg)
			> 8 MPa (28 gg)
Legame di aderenza	EN 1542	≥ 2 MPa (28 gg)	> 2 MPa (28 gg)
Resistenza alla carbonatazione	EN 13295	profondità di carbonatazione ≤ calcestruzzo di riferimento [MC (0,45)]	specifica superata
Modulo elastico a compressione	EN 13412	≥ 20 GPa (28 gg)	21 GPa in CC - 20 GPa in PCC (28 gg)
Compatibilità termica ai cicli di gelo-disgelo con sali disgelanti	EN 13687-1	forza di legame dopo 50 cicli ≥ 2 MPa	> 2 MPa
Assorbimento capillare	EN 13057	≤ 0,5 kg·m^{-2}·h$^{-0,5}$	< 0,5 kg·m^{-2}·h$^{-0,5}$
Contenuto ioni cloruro (Determinato sul prodotto in polvere)	EN 1015-17	≤ 0,05%	< 0,05%
Reazione al fuoco	EN 13501-1	Euroclasse	A1
	Metodo di prova	**Requisiti richiesti EN 1504-2 (C)**	**Prestazione GeoLite**
Permeabilità al vapore acqueo	EN ISO 7783-2	classe di riferimento	Classe I: s_D < 5 m
Assorbimento capillare e permeabilità all'acqua	EN 1062-3	w < 0,1 kg·m^{-2}·h$^{-0,5}$	w < 0,1 kg·m^{-2}·h$^{-0,5}$
Forza di aderenza per trazione diretta	EN 1542	≥ 2 MPa	> 2 MPa
Ritiro lineare	EN 12617-1	≤ 0,3%	< 0,3%
Coefficiente di espansione termica	EN 1770	α_T ≤ 30·10^{-6}·K^{-1}	α_T < 30·10^{-6}·K^{-1}
Resistenza all'abrasione	EN ISO 5470-1	perdita di peso < 3000 mg	specifica superata
Aderenza in seguito a shock termico	EN 13687-2	≥ 2 MPa	> 2 MPa
Resistenza all'urto	EN ISO 6272-1	classe di riferimento	Class III : ≥ 20 Nm
Sostanze pericolose		conformi al punto 5.4	

Caratteristica prestazionale aggregato	Metodo di prova	Requisiti richiesti UNI 8520-22	Prestazione aggregato GeoLite
Reazione alcali-aggregati	UNI 11504	classe di reattività	NR (non reattivo)
Qualità dell'aria interna (IAQ) VOC - Emissioni sostanze organiche volatili			
Conformità	EC 1 plus GEV-Emicode		Cert. GEV 3539/11.01.02

3.1.4. Malta GeoCalce – Kerakoll S.p.A.

È una geomalta di colore bianco, con classe di resistenza a compressione CS IV secondo EN 998-1 e Classe R1 secondo EN 1504-3, ideale nel GreenBuilding e nel Restauro storico. Composta solo da materie prime di origine naturali e minerali riciclati. Risulta una malta con elevata permeabilità al vapore, in modo da garantire un elevata efficacia nella diluizione degli inquinanti indoor per una migliore qualità dell'aria interna, e un basso modulo elastico, creando equilibrio tra le resistenze caratteristiche delle murature esistenti e quelle della malta stessa.

PERFORMANCE

QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA (IAQ) VOC - EMISSIONI SOSTANZE ORGANICHE VOLATILI			
Conformità	EC 1 plus GEV-Emicode		Cert. GEV 7829/11.01.02
QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA (IAQ) ACTIVE - DILUIZIONE INQUINANTI INDOOR *			
	Flusso	Diluizione	
Toluene	234 µg m²/h	+57%	metodo JRC
Pinene	137 µg m²/h	test non superato	metodo JRC
Formaldeide	3886 µg m²/h	+25%	metodo JRC
Biossido di Carbonio (CO_2)	135 mg m²/h	+93%	metodo JRC
Umidità (Aria Umida)	26 mg m²/h	+21%	metodo JRC
QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA (IAQ) BIOACTIVE - AZIONE BATTERIOSTATICA **			
Enterococcus faecalis	Classe B+ proliferazione assente		metodo CSTB
QUALITÀ DELL'ARIA INTERNA (IAQ) BIOACTIVE - AZIONE FUNGISTATICA **			
Penicillum brevicompactum	Classe F+ proliferazione assente		metodo CSTB
Cladosporium sphaerospermum	Classe F+ proliferazione assente		metodo CSTB
Aspergillus niger	Classe F+ proliferazione assente		metodo CSTB
HIGH-TECH EN 998-1			
Coefficiente di resistenza alla diffusione del vapore acqueo (µ)	13		EN 1015-19
Assorbimento d'acqua per capillarità	categoria W1		EN 998-1
Porosità	≥ 40%		WTA 2-2-91/D
Reazione al fuoco	classe A1		EN 13501-1
Resistenza a compressione a 28 gg	Categoria CS IV		EN 998-1
Aderenza al supporto (laterizio)	≥ 1 N/mm² - FP : B		EN 1015-12
Conducibilità termica ($\lambda_{10, dry}$)	0,54 W/(m K) (valore tabulato)		EN 1745
Durabilità (al gelo-disgelo)	valutazione basata sulle disposizioni valide nel luogo di utilizzo previsto della malta		EN 998-1
HIGH-TECH EN 1504-3			
Resistenza a compressione	≥ 10 MPa (28 gg)		EN 12190
Resistenza a trazione per flessione	≥ 4 MPa (28 gg)		EN 196/1
Legame di aderenza	≥ 1 MPa (28 gg)		EN 1542
Compatibilità termica ai cicli di gelo-disgelo con sali disgelanti	ispezione visiva superata		EN 13687-1
Contenuto ioni cloruro (determinato sul prodotto in polvere)	≤ 0,05%		EN 1015-17
Reazione al fuoco	Euroclasse A1		EN 13501-1
LEED®			
LEED® Contributo Punti ***	Punti LEED®		
MR Credito 4 Contenuto di Riciclati	fino a 2		GBC Italia
MR Credito 5 Materiali Regionali	fino a 2		GBC Italia
QI Credito 4.1 Materiali Basso Emissivi	fino a 1		GBC Italia

3.1.5. Mix design dei provini

Per mix design si intende le attività di studio e laboratorio per definire la composizione di una miscela, rispettando le prescrizioni di capitolato e delle prestazioni attese in sede progettuale. Per produrre le matrici a base di cenere volante (FAK) sono stati impiegati silicato di sodio, idrossido di potassio e acqua in proporzioni differenti in relazione alla classe di resistenza. Si possono classificare le malte nelle seguenti classi di resistenza:

- R1, per una Rc compresa tra 10-15 MPa;
- R2, per una Rc compresa tra 15-25 MPa;
- R3, per una Rc compresa tra 25-45 MPa;
- R4, per una Rc maggiore ai 45 Mpa.

R1 FAK:

Mix per 1 L (g)	Sabbia	FA (cenere volante)	CAC (cemento alluminoso)	MKK (metacaolino)	SS (silicato di sodio)	KOH (idorssido di potassio)	H_2O (acqua)	H_2O (acqua aggiunta nel mix)
R1 FAK	1350	460	40	-	150	60	90	-
R3 FAK	1350	460	40	-	170	170	-	8
R1 MKK	1350	-	-	500	300	80	220	55
R3 MKK	1350	-	-	500	300	150	150	63

Per la classe R1 FAK sono stati utilizzati:

- 90 g di acqua;
- 150 g di silicato di sodio;
- 60 g di idrossido di potassio.

R3 FAK:

Mix per 1 L (g)	Sabbia	FA (cenere volante)	CAC (cemento alluminoso)	MKK (metacaolino)	SS (silicato di sodio)	KOH (idorssido di potassio)	H_2O (acqua)	H_2O (acqua aggiunta nel mix)
R1 FAK	1350	460	40	-	150	60	90	-
R3 FAK	1350	460	40	-	170	170	-	8
R1 MKK	1350	-	-	500	300	80	220	55
R3 MKK	1350	-	-	500	300	150	150	63

Per i provini classificati con nomenclatura R3 FAK sono stati prodotti con 170 g di silicato di sodio e altrettanti di idrossido di potassio.

La cenere volante o Fly-Ash si ottiene dalla combustione del carbone nelle centrali termoelettriche. Il processo di formazione è chimicamente instabile, creando un legante geopolimerico senza macro-componenti noti in modo distinto. La granulometria stessa può variare e influenzare la resistenza meccanica del prodotto, la granulometria inferiore è infatti responsabile di un prodotto più performante.

La cenere volante impiegata è composta da polveri di classe F miscelate insieme in quantità come sotto riportato.

Fig. 17 – Cenere volante

COMPONENTE	CONTENUTO IN MASSA %
SiO_2	36 - 52
Al_2O_3	22 - 36
Fe_2O_3	2 - 10
CaO	1 - 10
MgO	0,2 - 3
K_2O	0,2 - 2
Na_2O	0,1 - 0,6
TiO_2	0,1 - 1,7
SiO_3	0,2 - 2

Tabella 3 – contenuto percentuale dei componenti.

Le matrici realizzate in metacaolino, con lo stesso criterio, sono classificabili in due miscele con resistenze differenti.

R1 MKK:

Mix per 1 L (g)	Sabbia	FA (cenere volante)	CAC (cemento alluminoso)	MKK (metacaolino)	SS (silicato di sodio)	KOH (idorssido di potassio)	H_2O (acqua)	H_2O (acqua aggiunta nel mix)
R1 FAK	1350	460	40	-	150	60	90	-
R3 FAK	1350	460	40	-	170	170	-	8
R1 MKK	1350	-	-	500	300	80	220	55
R3 MKK	1350	-	-	500	300	150	150	63

La miscela R1 MKK è composta da:

- 300 g di silicato di sodio;
- 220 g di acqua;
- 80 g di idrossido di potassio.

R3 MKK:

Mix per 1 L (g)	Sabbia	FA (cenere volante)	CAC (cemento alluminoso)	MKK (metacaolino)	SS (silicato di sodio)	KOH (idorssido di potassio)	H_2O (acqua)	H_2O (acqua aggiunta nel mix)
R1 FAK	1350	460	40	-	150	60	90	-
R3 FAK	1350	460	40	-	170	170	-	8
R1 MKK	1350	-	-	500	300	80	220	55
R3 MKK	1350	-	-	500	300	150	150	63

Per gli R3 MKK più o meno le stesse proporzioni:

- 300 g di silicato di sodio;
- 150 g di acqua e altrettanti di idrossido di potassio.

Nel mix-design è stato utilizzato inoltre il metacaolino MetaStar 501, prodotto mediante calcinazione controllata. Come progettato dalla casa produttrice, presenta un alto livello di reattività in combinazione con calcestruzzo, intonaco o cemento Portland.

La sua caratteristica peculiare è che reagendo con il sottoprodotto della calce liberata dall'idratazione del Portland aumenta l'impermeabilità, durabilità e le resistenze meccaniche del prodotto finale.

PROPIETA' TIPICHE		
Fonte	Sandersville, GA	
Colore	Bianco	
Luminosità	(GE % MgO)	86
Dimensioni particelle	(Media, µm)	1,2
Densità specifica	(g/cm3)	2,5
pH		04-giu
Umidità	(wt.%)	1

COMPONENTE	% IN MASSA
SiO2	55
Al2O3	40
Fe2O3	0,6
K2O	2,4
MgO	0,4
CaO	0,1
Na2O	0,1

Tabella 4 – Proprietà e percentuali dei componenti del MetaStar 501.

L'impiego di idrossido di potassio e silicato di sodio è dovuto al fatto che, come descritto nel capitolo 2.3.7., per innescare la reazione geopolimerica si ha bisogno delle soluzioni alcaline, in genere soluzioni acquose di idrossidi e silicati alcalini. Fondamentale è la quantità di questi impiegati, ma soprattutto anche il valore del pH. All'aumentare di quest'ultimo si ottiene una lavorabilità maggiore del composto finale e viceversa.

Per quanto riguarda il mix design dei provini con matrice in GeoCalce e GeoLite, ci si è avvalsi di un quantitativo di geomalta di 6 kg e 1 kg di acqua, in accordo ai dati presenti sulle schede tecniche e linee guida per la messa in opera dei prodotti.

3.2. Realizzazione dei provini

Il procedimento per la realizzazione di tutti i provini è comune e segue la stessa procedura, l'unica cosa che li differenzia come detto nel capitolo precedente è la combinazione dei diversi materiali componenti.
La prima fase consiste nel realizzare delle casseforme con dimensioni idonee e specifiche per le successive prove sperimentali che verranno eseguite. Avvalendosi di una tavola in legno, si procederà col fissaggio di diversi listelli dello stesso materiale (con spessore 10 mm e lunghezza 390 mm) in direzione parallela l'uno con l'altro. Successiva sarà la preparazione del rinforzo da introdurre nel provino. Le fibre di vetro e basalto utilizzate (Glasstex Struktura 320 e Glasstex Struktura BA 420) sono fornite sottoforma di rotoli di lunghezze variabili. Dunque, è necessario tagliarle per poterle adattare alle caratteristiche dimensionali dei provini. In accordo a tutto ciò la dimensione in larghezza dei rinforzi è di tre yarn (all'incirca 6 cm) e in lunghezza 39 cm.

Fig. 18 – Predisposizione delle casseformi per i provini.

Una volta predisposta la cassaforma, si procede con una leggera applicazione di disarmante per non danneggiare la superficie e di conseguenza il provino stesso durante la fase del disarmo.

Come descritto nei capitoli precedenti, la matrice funge da involucro alle fibre; perciò, si cercherà di posizionarle in una zona intermedia. In relazione allo spessore di 10 mm, si predispone un primo strato di 0,5 mm del componente a base di GeoCalce, GeoLite, metacaolino e cenere volante. Al di sopra verranno posizionate le fibre di vetro e basalto prima preparate, e poi ricoperte da un ulteriore strato per poter raggiungere lo spessore prefissato di 10 mm.

Fig. 19 – Applicazione delle fibre di basalto e vetro nei provini in esame.

Una volta eseguito il tutto è necessario attendere il completamento della fase di presa e di indurimento dei provini. In genere il tempo di attesa è di tre o quattro giorni per poter disarmare i provini, rimuovendoli dalle casseformi. Per poterli sottoporre a prove sperimentali e valutare il loro comportamento in esercizio devono trascorrere 28 giorni dalla loro realizzazione o messa in opera.

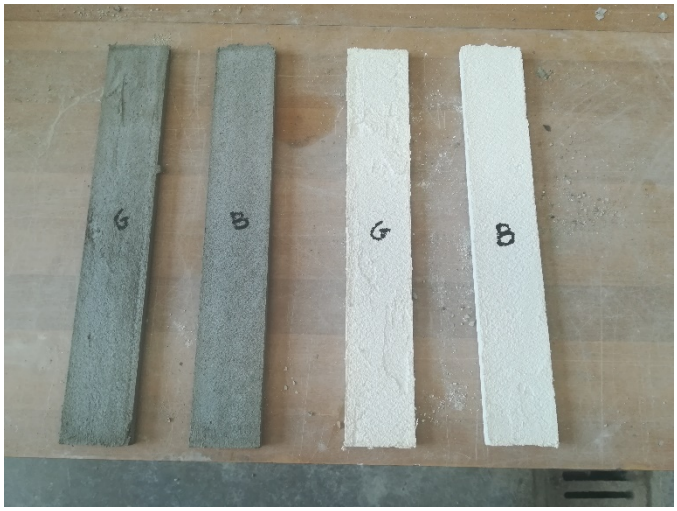


Fig. 20 – Provini ottenuti con denominazione delle fibre presenti all'interno, "G" per quelle in vetro e "B" per quelle in basalto.

3.3. Prove sperimentali eseguite

Una volta compiuta la fase di preparazione dei diversi provini come prima illustrato, successiva è la parte di sperimentazione a cui vengono sottoposti. In questo capitolo verranno descritte:

- Prova di trazione (tensile test);
- Prova di flessione;
- Prova di compressione;
- Prova pull-off.

3.3.1. Prova di flessione e compressione

Sono due prove concomitanti (UNI EN 1015-11), la prima ad essere eseguita è la prova di flessione condotta per tre punti. Denominata così in quanto si esegue su provini non fibrorinforzati, ma composti solamente dalla miscela di cui è fatta la matrice. Il provino di forma parallelepipeda sarà posizionato sopra due appoggi cilindrici distanti 10 cm l'uno dall'altro. Per sollecitarlo a flessione il macchinario presenta una piccola incudine che agirà superiormente al provino, in mezzeria tra i due appoggi, con velocità costante.

Fig. 23 – Provino sottoposto a prova di flessione.

Una volta raggiunta la rottura del provino, le due parti generate vengono sottoposte alla prova di compressione. Questa consiste nel posizionarle tra le due piastre metalliche del macchinario, che porterà le porterà a rottura per schiacciamento con carichi crescenti a velocità costante. Si otterranno dati

relativi alla resistenza e deformazione del provino in esame, rendendo un'idea della qualità finale del prodotto.

Fig. 24 – Provino sottoposto a prova di compressione.

3.3.2. Prova di trazione (tensile test)

In accordo con gli standard UNI EN ISO 527-4, la prova di trazione consiste nel sollecitare lungo l'asse longitudinale un provino tramite una macchina di trazione da 50 kN, in controllo di spostamento (1.5mm/min), fino a raggiungere la rottura. Si determina così la loro resistenza se sottoposti a sollecitazioni, osservando le loro proprietà fisiche e meccaniche quali lo sforzo, allungamento percentuale a fessurazione e a rottura di una sezione costante.

Una fase preliminare consiste nel predisporre delle fibre di vetro alle estremità del provino. Tali fibre predisposte in rotoli vengono tagliate a forme rettangolari, seguendo le dimensioni geometriche richieste, ossia 6 cm in larghezza e circa 8 cm in lunghezza. Saranno poi applicate per incollaggio usando una resina bicomponente in entrambe le facce del provino.

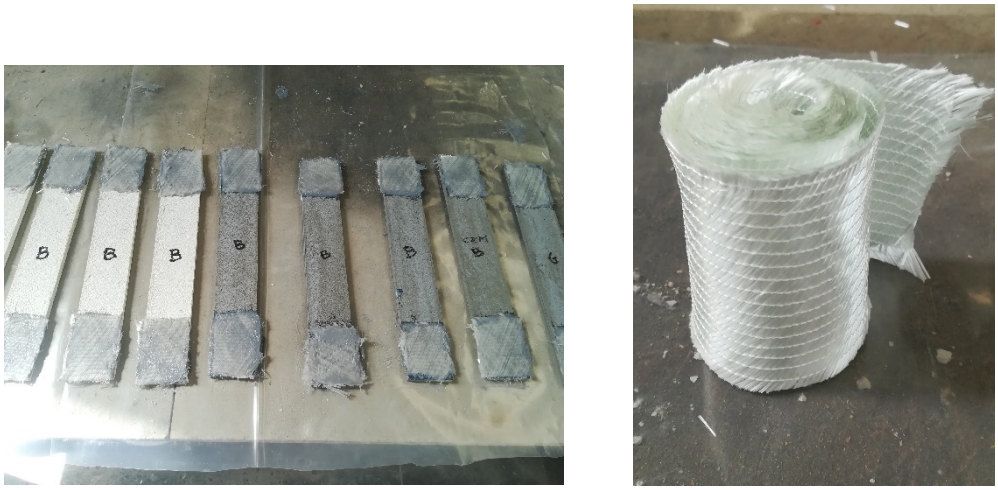


Fig. 21 – Fibra di vetro e applicazione per incollaggio con resina ai provini.

Si applicano queste fibre alle estremità per favorire la presa del macchinario sul provino, in modo da evitare eventuali fessurazioni che potrebbero compromettere i risultati della prova.

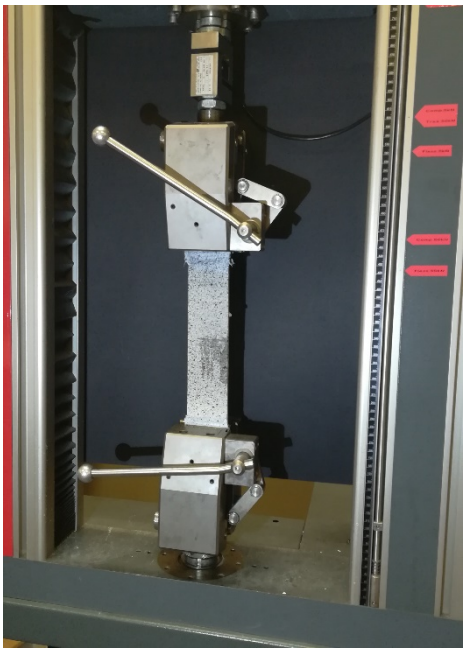


Fig. 22 – Provino sottoposto a tensile test.

Grazie a questa prova si possono determinare gli allungamenti percentuali, carico di rottura e il carico limite di proporzionalità.

3.3.3. Prova pull-off

La prova pull-off (UNI EN 1015-12; ASTM C1583 2004) eseguita consente di determinare la capacità di adesione tra il supporto e la miscela della matrice in esame, nonché la resistenza a trazione del materiale. Questa prova è stata condotta considerando come supporto mattoni pieni o blocchi di calcestruzzo. Sulle loro superfici vengono posizionati degli stampini circolari di spessore circa 1 cm, riempiti con il componente della matrice.

Fig. 25 – Applicazione del componente della matrice.

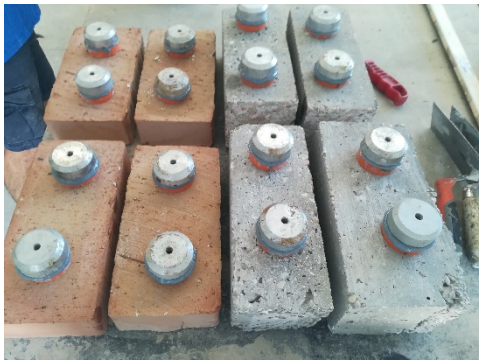


Fig. 26 – dolly applicati ai cilindri in malta.

Successivamente, si incolleranno i “dolly” (cilindri metallici) sempre con resine bicomponenti. Una volta incollati si utilizza un estrattore idraulico:

permette di determinare la forza di trazione necessaria per staccare dal supporto la porzione di matrice dapprima predisposta sulla superficie.
Si dovrà valutare le diverse modalità di distacco, al fine di decretare la validità o meno della prova e per localizzare la crisi:

- Distacco di tipo A, crisi che si verifica tra il dolly e superficie testata, che comporta la non validità della prova;
- Distacco di tipo B, crisi che si verifica nel rivestimento;
- Distacco di tipo C, tipologia di crisi migliore che fornisce il reale valore della forza di adesione tra matrice e supporto.

Fig. 27 – Prova di pull-off.

4. Risultati e conclusioni

4.1. Elaborazione dei dati

In questo capitolo vengono esposti i risultati delle diverse prove sperimentali prima descritte a cui sono stati sottoposti i provini. Sulla base di questi dati a 28 giorni di maturazione saranno poi tratte considerazioni finali confrontando tra loro i diversi sistemi FRCM realizzati in laboratorio.

4.2. Prove di flessione e compressione

Per le prove di flessione iniziali sono stati analizzati quattro provini con matrice in cenere volante (FAK), quattro con matrice in metacaolino (MKK), tre provini in Geocalce e altrettanti in Geolite.
Il macchinario sfrutta una cella di carico collegata ad una centralina di acquisizione dei dati che ci fornisce le forze esercitate (Ff_{max}) in Newton, poi riportate nelle tabelle seguenti in KN. Successivamente si dovrà convertire la forza in MPa. Il valore della resistenza a flessione di ogni singolo provino si ottiene con la formula di Navier:

$$Rf = \frac{3}{2}\frac{\mathrm{F\,l}}{\mathrm{b\,h\,h}}$$

dove F è il carico massimo espresso in N, b e h sono le dimensioni del provino in mm, l pari a 100 mm e ci esprime la distanza dagli assi dei supporti.
Una volta esaminati a flessione e quindi portati a rottura, i due spezzoni generati verranno sottoposti alla prova di compressione, sempre usando lo stesso macchinario ma cambiando la presa. La resistenza a compressione è stata determinata dividendo la forza Fc_{max} convertita in N per la superficie, ovvero 40x40 mm:

$$Rc = \frac{\mathrm{F}}{A}$$

Risultati a 28 giorni:

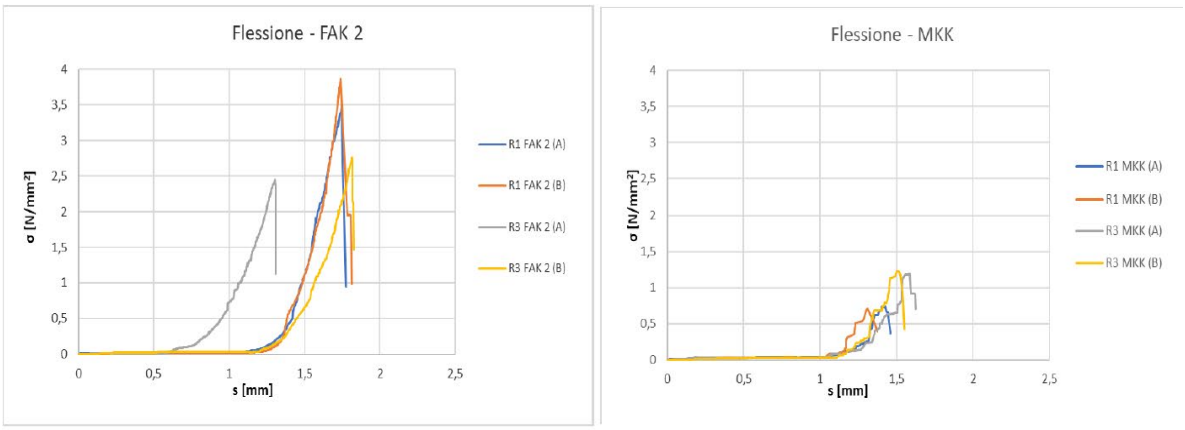


Fig. 28 – Diagramma sforzo-spostamento a flessione

Provino n°		A (mm^2)	Ff_{max} (kN)	Rf (MPa)	Rf_{media} (MPa)	Dev. Standard	Dev. Standard (%)
R1 FAK 2	1	1600	2,9	6,8	6,75	0,066	0,982
	2	1600	2,86	6,7			
R3 FAK 2	1	1600	2,59	6,07	5,94	0,182	3,068
	2	1600	2,48	5,81			

Provino n°		A (mm^2)	Ff_{max} (kN)	Rf (MPa)	Rf_{media} (MPa)	Dev. Standard	Dev. Standard (%)
R1 MKK	1	1600	0,66	1,55	1,68	0,182	10,879
	2	1600	0,77	1,8			
R3 MKK	1	1600	1,44	3,38	3,45	0,099	2,886
	2	1600	1,5	3,52			

Tabella 5 – Risultati prova a flessione

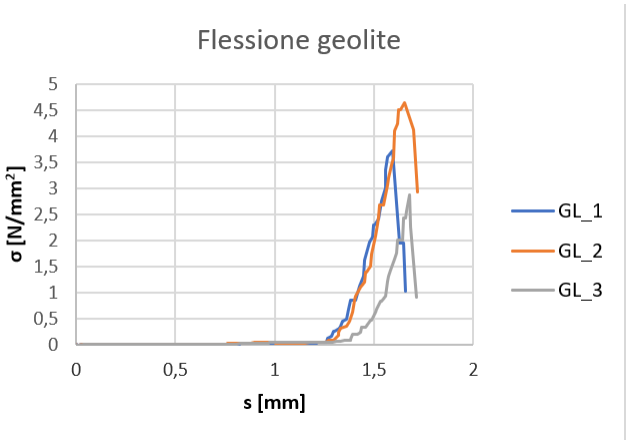
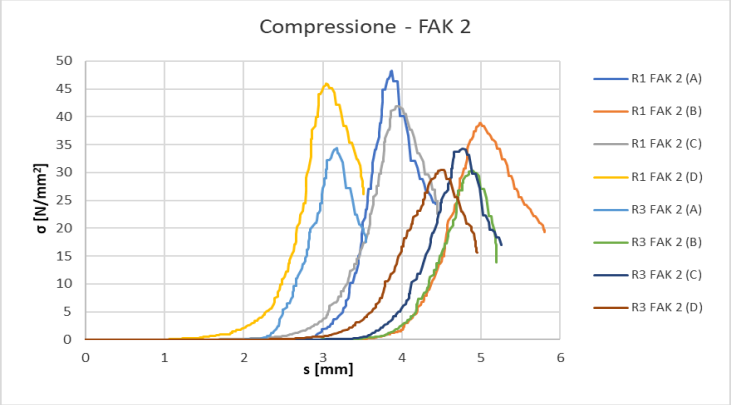


Fig. 29 – Diagramma sforzo-spostamento a flessione

Provino n°		A (mm^2)	Ff_{max} (kN)	Rf (MPa)	Rf_{media} (MPa)	Dev. Standard	Dev. Standard (%)
GeoCalce	1	1600	1,92	4,50	4,31	0,285	6,597
	2	1600	1,7	3,99			
	3	1600	1,9	4,46			
GeoLite	1	1600	3,72	8,72	8,78	2,075	23,645
	2	1600	4,64	10,88			
	3	1600	2,87	6,73			

Tabella 6 – Risultati prova a flessione



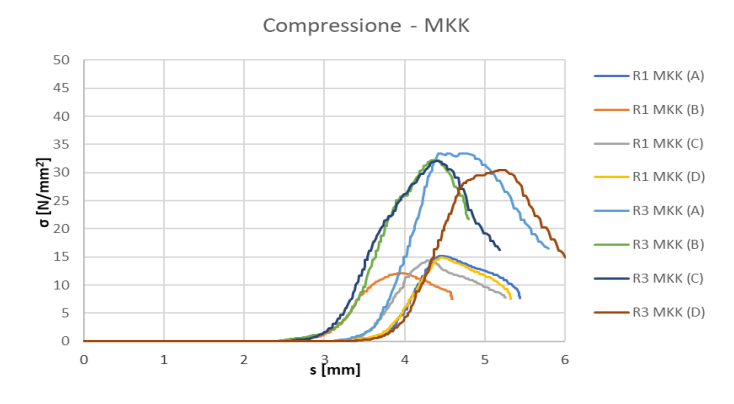


Fig. 30 – Diagramma sforzo-spostamento a compressione

Provino n°		A (mm^2)	Fc_{max} (kN)	Rc (MPa)	Rc_{media} (MPa)	Dev. Standard	Dev. Standard (%)
R1 FAK 2	1	1600	36,64	22,9	21,83	1,348	6,175
	2	1600	34,88	21,8			
	3	1600	36,29	22,68			
	4	1600	31,9	19,94			
R3 FAK 2	1	1600	23,93	14,96	15,12	0,749	4,954
	2	1600	25,54	15,96			
	3	1600	24,6	15,38			
	4	1600	22,69	14,18			

Provino n°		A (mm^2)	Fc_{max} (kN)	Rc (MPa)	Rc_{media} (MPa)	Dev. Standard	Dev. Standard (%)
R1 MKK	1	1600	13,94	8,71	8,78	0,113	1,29
	2	1600	13,88	8,68			
	3	1600	14,06	8,79			
	4	1600	14,29	8,93			
R3 MKK	1	1600	34,46	21,54	21,44	1,016	4,738
	2	1600	33,1	20,69			
	3	1600	33,1	20,69			
	4	1600	36,54	22,84			

Tabella 7 – Risultati prova a compressione

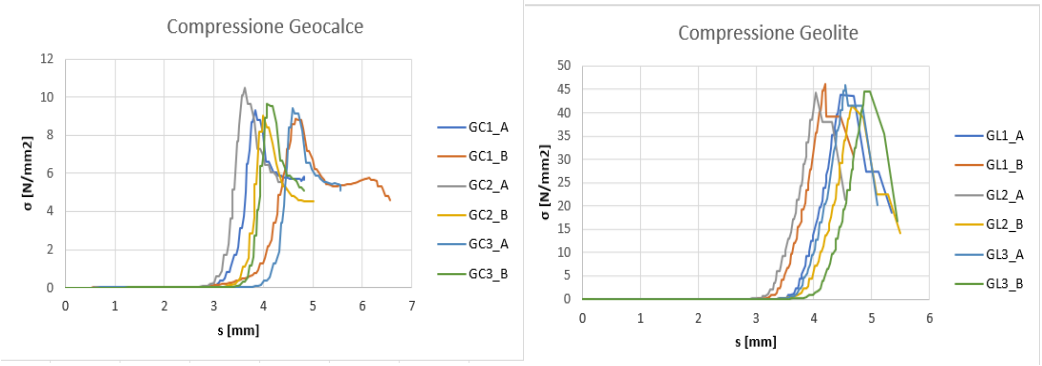


Fig. 31 – Diagramma sforzo-spostamento a compressione

Provino n°		A (mm^2)	Fc_{max} (kN)	Rc (MPa)	Rc_{media} (MPa)	Dev. Standard	Dev. Standard (%)
GeoCalce	1	1600	14,91	9,32	9,476	0,572	6,034
	2	1600	14,22	8,89			
	3	1600	16,79	10,49			
	4	1600	14,47	9,04			
	5	1600	15,1	9,44			
	6	1600	15,48	9,68			
GeoLite	1	1600	70,17	43,86	44,997	2,318	5,151
	2	1600	73,86	46,16			
	3	1600	70,78	44,24			
	4	1600	66,43	41,52			
	5	1600	73,52	45,95			
	6	1600	77,21	48,26			

Tabella 8 – Risultati prova a compressione

Considerazioni

Per quanto riguarda le prove di flessione, si può notare dai grafici ottenuti e anche dai valori riportati nelle tabelle che i provini realizzati in cenere volante (FAK) e in Geolite (GL) presentano valori di resistenza molto più alti, rispettivamente 9,07 MPa e 10,88 MPa. Per i provini in metacaolino (MKK) e Geocalce si registrano valori inferiori, 2,88 MPa e 4,50 MPa. In seguito alla prova di compressione i valori di resistenza maggiori sono in corrispondenza dei provini in Geolite (48,26 MPa), seguiti da quelli R1 FAK 2 (30,21 MPa), R3 FAK 2 (21,46 MPa), R3 MKK (20,88 MPa), Geocalce (10,49 MPa) e R1 MKK (9,49 MPa). Una particolarità riscontrata è riguardante i provini FAK dove sono state registrate resistenze maggiori nei provini R1 rispetto a quelli con resistenze R3, in quanto questi ultimi dovrebbero essere più performanti. La resistenza di compressione media dei provini in Geocalce e Geolite coincide con i valori riportati nelle schede tecniche, rispettivamente ≥ 6 MPa e ≥ 45 MPa (28 gg). Allo stesso modo sono stati raggiunti i valori di resistenza a flessione sempre nelle stesse schede tecniche, ≥ 4 MPa (28 gg) per i provini in Geocalce e ≥ 9 MPa (28 gg) per quelli in Geolite.

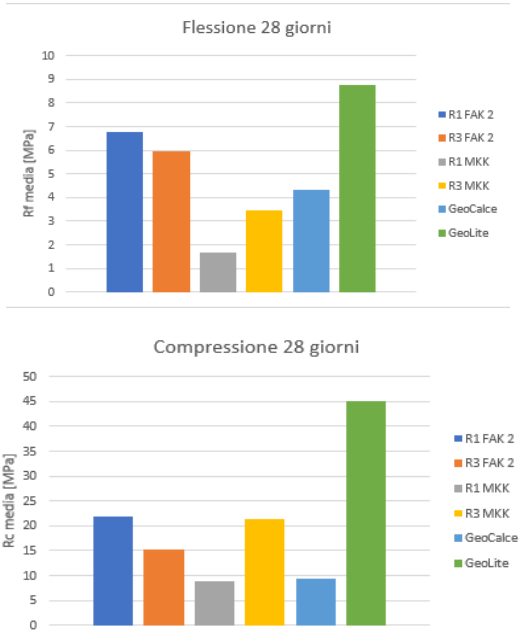


Fig. 32 – Istogramma di confronto dei risultati delle prove a compressione e flessione

4.3. Prove di pull-off

In questa prova si valuta la capacità adesiva dei provini su due diversi tipi di supporto: mattone pieno e mattone pieno in cls. Per calcolare la resistenza di pull-off si deve dividere la forza applicata in N per l'area di strappo sul provino:

$$R = \frac{\mathrm{F}}{\mathrm{A}}$$

Risultati a 28 giorni:

Provino n°		F (kN)	F (N)	A (mm^2)	R (MPa)	R_{media} (MPa)	Dev. Standard	Dev. Standard %
R1 FAK	1	1,286	1286	1519	0,847	1,039	0,289	27,812
	2	1,601	1601	1519	1,054			
	3	1,234	1234	1519	0,812			
	4	2,189	2189	1519	1,441			
R1 MKK	1	0,167	167	1519	0,11	0,147	0,035	23,699
	2	-	-	1519	-			
	3	0,203	203	1519	0,151			
	4	0,272	272	1519	0,179			
R3 FAK	1	0,954	954	1519	0,628	0,854	0,207	24,276
	2	1,67	1670	1519	1,099			
	3	1,14	1140	1519	0,75			
	4	1,423	1423	1519	0,937			
R3 FAK 2	1	0,906	906	1519	0,596	0,397	0,167	41,909
	2	0,632	632	1519	0,416			
	3	0,589	589	1519	0,388			
	4	0,288	288	1519	0,19			
R3 MKK	1	0,305	305	1519	0,201	0,169	0,097	57,606
	2	0,237	237	1519	0,156			
	3	0,42	420	1519	0,276			
	4	0,066	66	1519	0,043			

Tabella 9 – Risultati prova pull-off

Provino n°		F (kN)	F (N)	A (mm^2)	R (MPa)	R_{media} (MPa)	Dev. Standard	Dev. Standard %
GC supporto mattone	1	0,381	381	1519	0,251	0,410	0,173	17,267
	2	0,861	861	1519	0,567			
	3	0,41	410	1519	0,270			
	4	0,837	837	1519	0,551			
GL supporto mattone	1	-	-	1519	-	0,201	-	-
	2	0,305	305	1519	0,201			
	3	-	-	1519	-			
	4	-	-	1519	-			
GC supporto mattone in cls	1	1,25	1250	1519	0,823	0,514	0,269	26,857
	2	0,994	994	1519	0,654			
	3	0,442	442	1519	0,291			
	4	0,436	436	1519	0,287			
GL supporto mattone in cls	1	-	-	1519	-	0,241	0,109	10,880
	2	0,348	348	1519	0,229			
	3	0,211	211	1519	0,139			
	4	0,54	540	1519	0,355			

Tabella 10 – Risultati prova pull-off

Considerazioni

Possiamo notare che i valori di resistenza massima sono relativi ai provini FAK seguiti da quelli in geocalce con supporto mattone in cls. Una particolarità riscontrata riguarda i provini in Geolite che in alcuni casi non presentavano alcuna capacità di resistenza quando invece erano attesi valori molto superiori alla Geocalce, probabilmente dovuto a un errore involontario durante la fase di lavorazione e messa in opera sul supporto.

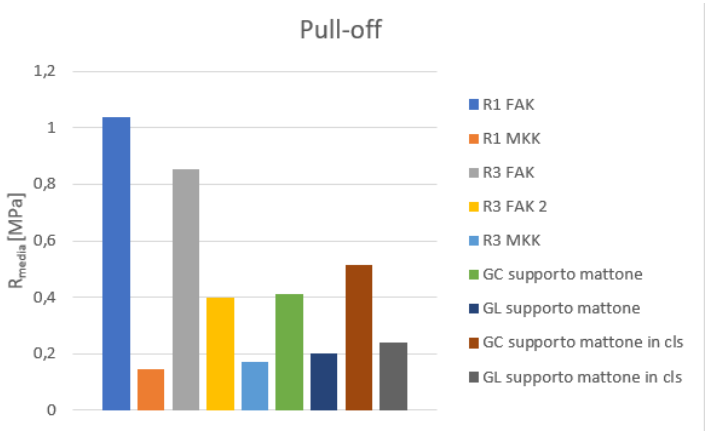


Fig. 33 – Istogramma di confronto dei risultati delle prove pull-off

4.4. Prove di trazione

La prima fase della rielaborazione dei dati è di definire la σ in N/mm^2, ottenuta dal rapporto tra la forza di trazione esercitata, fornita dalla macchina, e l'area della sezione trasversale delle reti in fibra di basalto (1,33 mm^2 x 3) e fibre di vetro (0,998 mm^2 x 3). Di seguito sono riportati i grafici sforzo-spostamento raggruppati in FAK, MKK, Geocalce e Geolite.

Risultati a 28 giorni:

FAK:

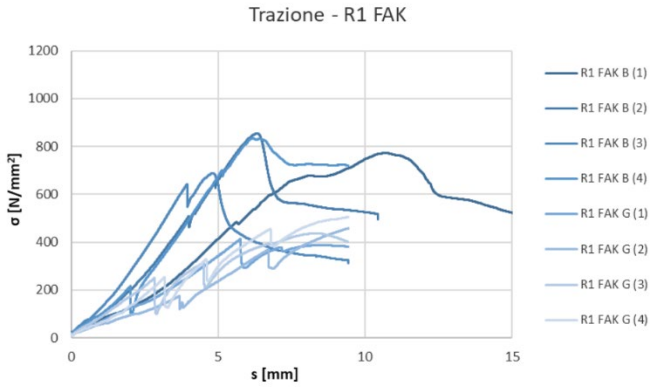


Fig. 34 – Diagramma tensione-spostamento a trazione

Provino n°		F_{max} (N)	σ_t (MPa)	σ_u (MPa)	s_t (mm)	s_u (mm)
R1 FAK B	1	1737,9	481,45	772,44	5,74	16,06
	2	1921,66	516,77	854,11	4,14	10,3
	3	1548,16	640,37	688,11	3,92	9,44
	4	1881,72	208,46	836,36	1,95	9,43
Media		1772,36	461,76	787,76	3,94	11,34
Dev. Standard		169,02	182,095	75,12	1,554	3,181
Dev. Standard %		9,536	39,435	9,536	39,455	28,055

Provino n°		F_{max} (N)	σ_t (MPa)	σ_u (MPa)	s_t (mm)	s_u (mm)
R1 FAK G	1	1383,82	135,75	413,08	2,25	9,44
	2	1543,39	171,59	458,02	3,63	9,43
	3	1463,73	246,99	436,93	2,79	9,41
	4	1692,77	245,05	505,3	3,09	9,42
Media		1520,93	199,85	453,33	2,94	9,4
Dev. Standard		131,788	55,295	39,208	0,577	0,013
Dev. Standard %		8,665	27,669	8,649	19,61	0,137

Tabella 11 – Risultati prova a trazione

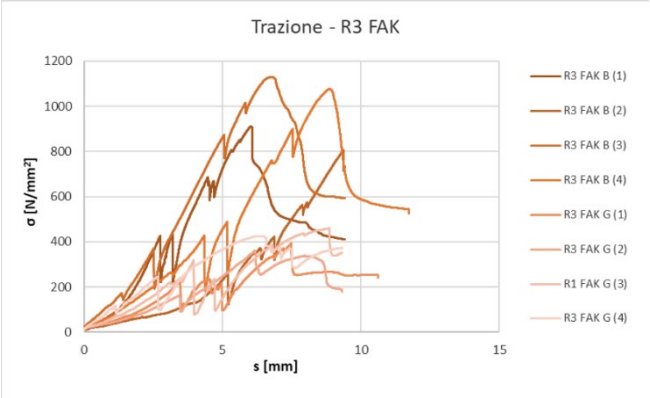


Fig. 35 – Diagramma tensione-spostamento a trazione

Provino n°		F_{max} (N)	σ_t (MPa)	σ_u (MPa)	s_t (mm)	s_u (mm)
R3 FAK B	1	2051,21	407,2	911,69	2,67	9,43
	2	1810,56	250,92	804,73	5,13	9,42
	3	2542,03	158,92	1129,85	1,38	9,43
	4	2422,98	258,02	1076,93	3,04	11,73
Media		2206,7	268,77	980,8	3,06	10
Dev. Standard		336,812	102,736	149,704	1,556	1,152
Dev. Standard %		15,263	38,225	15,263	50,92	11,514

Provino n°		F_{max} (N)	σ_t (MPa)	σ_u (MPa)	s_t (mm)	s_u (mm)
R3 FAK G	1	1321,13	216,93	394,37	3,41	10,62
	2	1215,09	161,02	362,71	3,4	9,31
	3	1536,75	218,79	458,73	3,12	9,32
	4	1424,95	100,39	425,36	1,14	9,32
Media		1374,48	174,28	410,29	2,77	9,64
Dev. Standard		137,998	56,082	41,194	1,093	0,652
Dev. Standard %		10,04	32,179	10,04	39,505	6,758

Tabella 12 – Risultati prova a trazione

MKK:

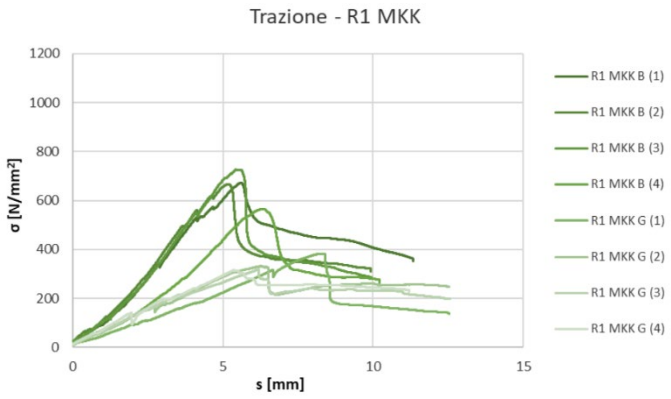


Fig. 36 – Diagramma tensione-spostamento a trazione

Provino n°		F_{max} (N)	σ_t (MPa)	σ_u (MPa)	s_t (mm)	s_u (mm)
R1 MKK B	1	1512,11	340,71	672,08	2,95	11,32
	2	1500,79	478,76	667,05	3,54	9,92
	3	1635,14	543,92	726,76	4,05	9,94
	4	1280	50,85	564,91	0,58	10,2
Media		1482,01	353,56	657,7	2,78	10,35
Dev. Standard		147,779	218,869	67,512	1,534	0,662
Dev. Standard %		9,971	61,904	10,265	55,18	6,403

Provino n°		F_{max} (N)	σ_t (MPa)	σ_u (MPa)	s_t (mm)	s_u (mm)
R1 MKK G	1	1280,52	311,1	382,24	6,8	12,53
	2	1112,62	178,22	332,12	2,71	12,53
	3	1066,68	156,35	318,41	2,58	12,55
	4	1053,95	140,53	314,61	1,96	11,2
Media		1128,44	196,55	336,85	3,51	12,2
Dev. Standard		104,47	77,914	31,184	2,216	0,668
Dev. Standard %		9,258	39,641	9,258	63,088	5,478

Tabella 13 – Risultati prova a trazione

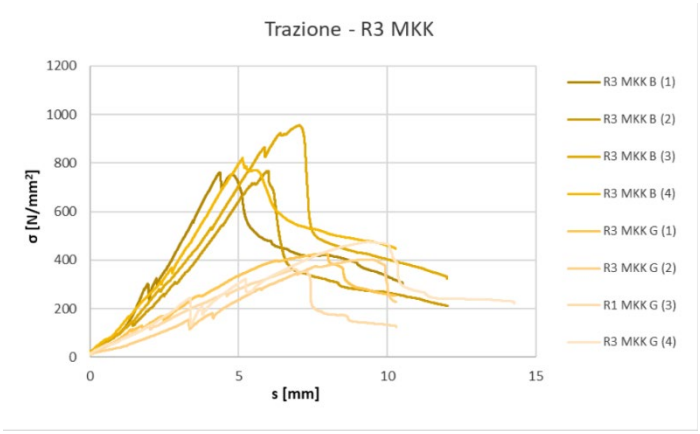


Fig. 37 – Diagramma tensione-spostamento a trazione

Provino n°		F_{max} (N)	σ_t (MPa)	σ_u (MPa)	s_t (mm)	s_u (mm)
R3 MKK B	1	1713,56	293,27	761,62	1,9	10,51
	2	1728,38	147,67	768,21	1,58	12,02
	3	2147,57	278,82	954,52	2,41	12,01
	4	1847,92	159,85	821,34	1,31	10,29
Media		1859,36	219,88	826,42	1,8	11,21
Dev. Standard		201,337	76,738	89,485	0,473	0,937
Dev. Standard %		10,828	34,9	10,828	26,266	8,358

Provino n°		F_{max} (N)	σ_t (MPa)	σ_u (MPa)	s_t (mm)	s_u (mm)
R3 MKK G	1	1429,87	110,58	426,83	1,36	10,27
	2	1346,55	152,08	401,95	3,34	10,31
	3	1216,9	102,15	363,25	1,51	10,29
	4	1595,09	239,3	476,14	3,31	14,26
Media		1397,1	151,1	417,04	2,38	11,28
Dev. Standard		158,431	62,7	47,292	1,093	1,985
Dev. Standard %		11,34	41,495	11,34	45,923	17,594

Tabella 14 – Risultati prova a trazione

Geocalce:

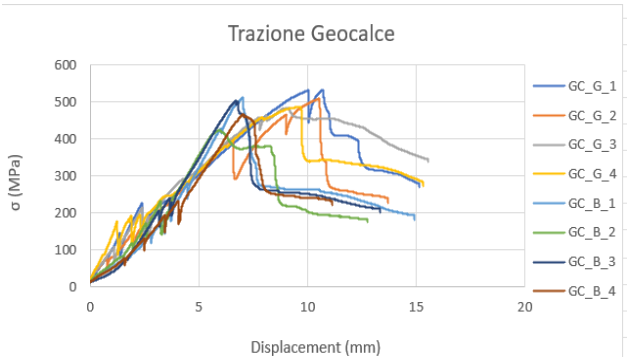


Fig. 38 – Diagramma tensione-spostamento a trazione

Provino n°		F_{max} (N)	σ_t (MPa)	σ_u (MPa)	s_t (mm)	s_u (mm)
GC G	1	1597,82	152,8	538,45	1,2	10,73
	2	1522,49	82,61	518,79	0,79	10,5
	3	1446,83	115,2	492,56	1,15	9,26
	4	1460,48	192,46	495,82	1,36	9,74
Media		1506,91	135,77	511,41	1,13	10,06
Dev. Standard		68,98	47,44	21,48	0,24	0,68
Dev. Standard %		4,58	34,95	4,20	21,39	6,76

Provino n°		F_{max} (N)	σ_t (MPa)	σ_u (MPa)	s_t (mm)	s_u (mm)
GC B	1	2047,82	141,29	518,94	2,78	7,12
	2	1691,24	138,96	428,26	1,93	5,87
	3	2009,78	215,2	508,36	3,17	6,65
	4	1860,57	81,09	472,89	1,86	7,08
Media		1902,35	144,14	482,11	2,44	6,68
Dev. Standard		162,29	54,95	40,95	0,64	0,58
Dev. Standard %		8,53	38,13	8,49	26,45	8,69

Tabella 15 – Risultati prova a trazione

Geolite:

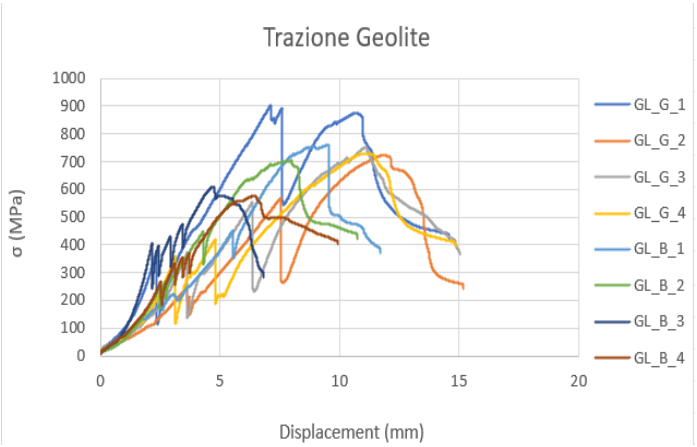


Fig. 39 – Diagramma tensione-spostamento a trazione

Provino n°		F_{max} (N)	σ_t (MPa)	σ_u (MPa)	s_t (mm)	s_u (mm)
GL G	1	2701,12	385,38	887,29	2,31	10,63
	2	2169,64	266,21	722,65	3,7	12,88
	3	2249,57	378,55	758,18	3,23	11,05
	4	2182,64	362,03	737,89	3,41	11,33
Media		2325,74	348,04	776,50	3,16	11,47
Dev. Standard		252,69	55,43	75,28	0,60	0,98
Dev. Standard %		10,86	15,93	9,69	18,99	8,55

Provino n°		F_{max} (N)	σ_t (MPa)	σ_u (MPa)	s_t (mm)	s_u (mm)
GL B	1	3038,22	117,56	760,12	2,49	9,51
	2	2802,55	243,15	708,62	2,17	8,02
	3	2425,41	412,58	619,11	2,25	4,86
	4	2298,63	267,31	586,93	2,63	6,29
Media		2641,20	260,15	668,70	2,39	7,17
Dev. Standard		340,38	120,98	79,78	0,21	2,03
Dev. Standard %		12,89	46,50	11,93	8,91	28,25

Tabella 16 – Risultati prova a trazione

Considerazioni

Nei seguenti istogrammi sono riportati i valori relativi alla forza massima, tensione di prima fessurazione e tensioni ultime con i relativi spostamenti registrati.

I valori maggiori riguardanti la forza massima sono in corrispondenza dei provini in cenere volante con resistenza R3 con fibre di basalto (R3 FAK B) e quelli in Geolite sia con fibre di vetro che basalto.

Confrontando le tensioni di prima fessurazione σ_t si evidenzia la comparsa di fessure prima nei provini in geocalce rispetto a tutti gli altri. Inoltre, questa comparsa si verifica nei sistemi in cui sono incluse le fibre di vetro rispetto a quelle in basalto, da cui possiamo concludere che queste ultime siano più performanti rispetto a quelle in vetro. La tensione ultima raggiunge valore massimo con i provini R3 FAK B e valori minimi sempre in corrispondenza dei provini con fibra di vetro R3 FAK G e R3 MKK G.

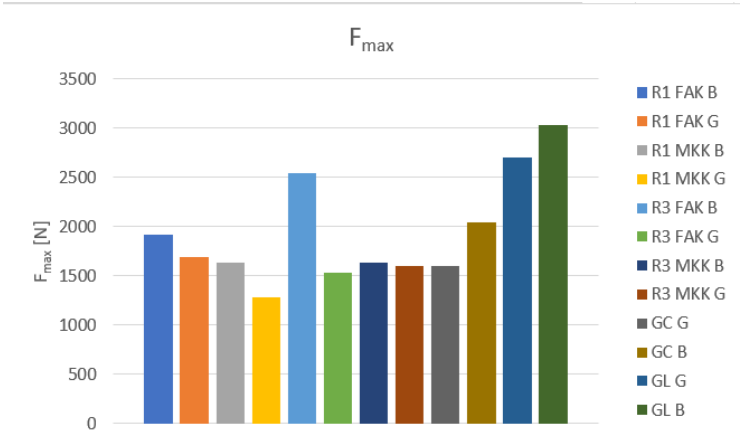


Fig. 40 – Confronto delle F_{max} dei diversi provini.

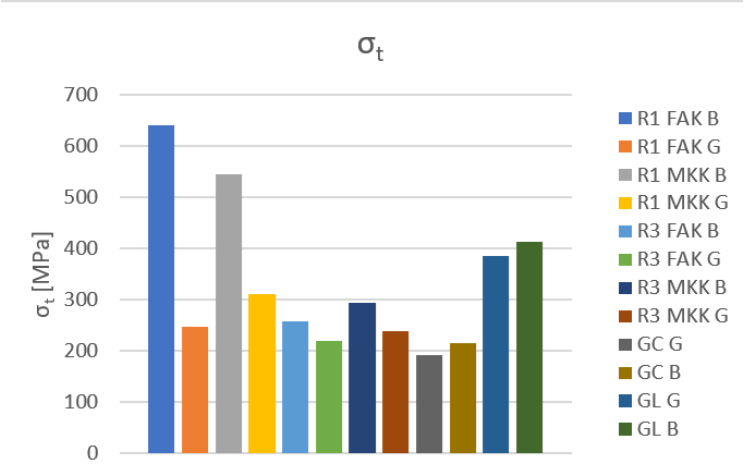


Fig. 41 – Confronto delle σ_t dei diversi provini.

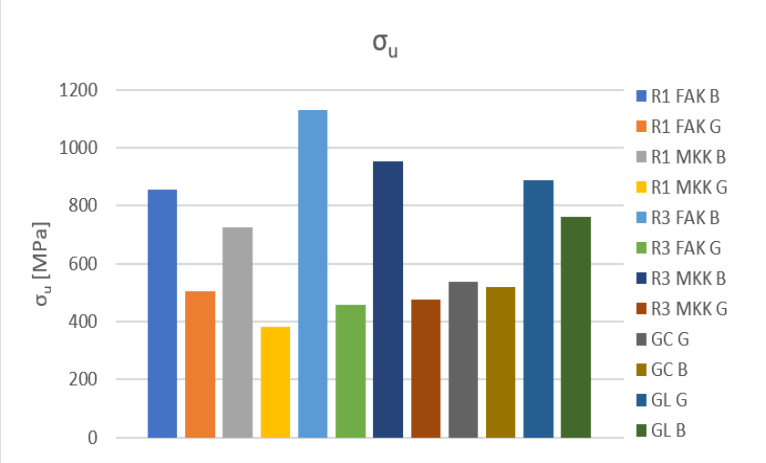


Fig. 42 – Confronto delle σ_u dei diversi provini.

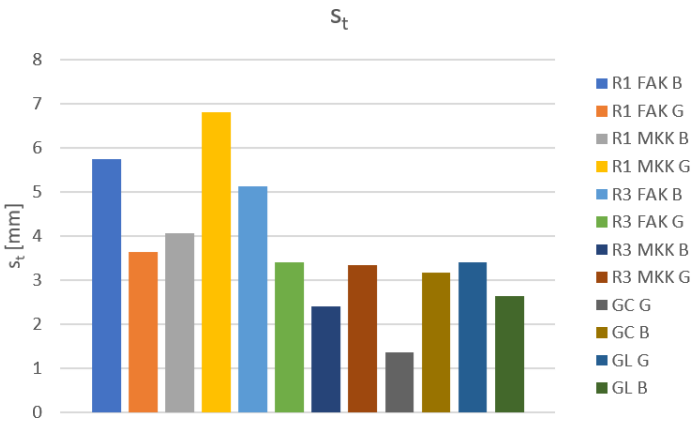


Fig. 43 – Confronto delle s_t dei diversi provini.

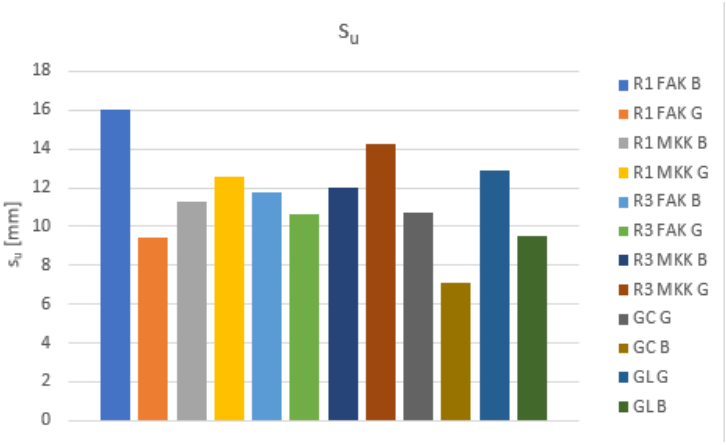


Fig. 44 – Confronto delle s_u dei diversi provini.

5. Conclusioni

Il presente studio ha riguardato la preparazione e l'analisi del comportamento meccanico dei sistemi FRCM con rinforzo costituito da fibre di vetro e basalto e con matrici in metacaolino, cenere volante, Geocalce e Geolite. Una volta eseguite le prove, sono stati analizzati ed elaborati i dati ottenuti.

Nelle prove di flessione i provini R1 FAK 2 hanno una resistenza media (8,61 MPa) maggiore rispetto agli stessi R3 FAK 2 (6,12 MPa), particolarità sottolineata anche nel capitolo 4.2., seguiti da quelli in Geolite (8,78 MPa), Geocalce (4,31 MPa) e MKK, 2,84 MPa e 1,71 MPa rispettivamente per gli R3 e R1.

Nelle prove di compressione sono i provini in Geolite a registrare una resistenza a compressione media maggiore (44,997 MPa) rispetto agli R1 FAK 2 (27,36 MPa), R3 FAK 2 (20,22 MPa), R3 MKK (20,04 MPa), Geocalce (9,476 MPa) e R1 MKK (8,84 MPa).

In seguito alle prove di pull-off i provini con resistenza media maggiore sono gli R1 FAK 2 con 1,039 MPa. Risultati inferiori riguardano invece tutti gli altri, non superando i 0,514 MPa. Come riportato nel capitolo 4.3. i provini in Geolite hanno presentato una scarsa capacità di adesione al supporto dovuto probabilmente ad un errore in fase di messa in opera sul supporto. Infatti, i valori ottenuti non raggiungono i requisiti richiesti nella normativa EN 1015-12 relativa all'aderenza al supporto delle malte, che fissa un valore minimo ≥ 1 MPa.

Dalle prove di trazione risultano valori più alti della forza massima con i provini R3 FAK B (2542,03 N) e in Geolite con fibre di basalto (3038,22 N). Si nota un evidente incremento delle prestazioni nei provini con fibre di basalto rispetto a quelli in cui sono presenti le fibre di vetro. Come conseguenza alle migliori proprietà fisico-meccaniche si evince che tali fibre possono considerarsi un'ottima alternativa in ambito di rinforzo strutturale alle fibre di vetro e arammidiche.

BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

-CNR-DT 200/2004

-Bellomo e D'Ambrosio 2009, Fibrorinforzati in architettura: le tecnologie FRP e FRCM nel recupero delle strutture in c.a.

-Sebastiano Candamano , Fortunato Crea and Antonio Iorfida, Mechanical Characterization of Basalt Fabric-Reinforced Alkali-Activated Matrix Composite: A Preliminary Investigation

-De Santis e De Felice 2015, Un metodo di qualificazione per sistemi di rinforzo a matrice cementizia rinforzata con fibre (FRCM) incollati esternamente.

-CNR-DT-215/2008

-Aiello e Cascardi, I sistemi FRGM e CRGM per il miglioramento delle prestazioni meccaniche ed energetiche di strutture esistenti.

-https://www.ingenio-web.it/25358-frcm-ottimizzati-per-il-rinforzo-di-strutture-esistenti

-https://www.aquilaprem.it/2018/10/28/i-sistemi-frcm-prima-parte/

-https://www.infobuild.it/approfondimenti/materiali-compositi/#

-Alessandra Mobili, Alberto Belli, Chiara Giosuè, Tiziano Bellezze, Francesca Tittarelli, Metakaolin and fly ash alkali-activated mortars compared with cementitious mortars at the same strength class.

RINGRAZIAMENTI

Il primo ringraziamento va al prof. Ing. Donnini per avermi seguito nel periodo di tirocinio ed essere stato sempre disponibile a chiarire ogni dubbio e chiarimento.

Ringrazio la mia famiglia per il sostegno economico e per essermi stati vicino con pazienza e affetto nei momenti di difficoltà incontrati lungo il percorso.

Ultimo ringraziamento, ma non per ordine di importanza, va a tutti i miei amici e conoscenti con cui ho condiviso momenti di gioia e spensieratezza, sperando che in futuro ce ne siano ancor di più.

Grazie