



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Edile

Comportamento alle alte temperature di sistemi FRCM con matrici ad attivazione alcalina

High temperatures behavior of FRCM systems with alkali-activated mortars

Relatore:

Prof. Ing. Jacopo Donnini

Laureando:

Aurora Bartozzi

Anno Accademico 2022/2023

INDICE

INTRODUZIONE	1
1. STATO DELL'ARTE	3
1.1 I materiali compositi.....	3
1.1.1 Classificazione dei materiali compositi.....	4
1.2 I sistemi FRCM.....	8
1.2.1 I rinforzi per i sistemi FRCM.....	9
1.2.2 I sistemi FRCM a base geopolimerica ad alte temperature.....	11
1.2.3 Geopolimeri.....	14
1.2.4 Qualificazione di un sistema FRCM	16
1.2.5 Quadro normativo	17
2. MATERIE PRIME E PREPARAZIONE	19
2.1 Matrici commerciali	19
2.2 Matrici Geopolimeriche	19
2.2.1 Polveri reattive allumino-silicate.....	20
2.2.2 Soluzione Alcalina.....	24
2.2.3 Inerte.....	26
2.2.4 Mix design	26
2.3 Rete di rinforzo in basalto.....	28
2.4 Preparazione	29
2.4.1 Tipologia Casseri	29
2.4.2 Rinforzi per i campioni	32
2.4.3 Getti	33
3. METODI DI PROVA.....	40
3.1 Esposizione ad alte temperature	40
.....	40
3.2 Prova Ultrasonica	44
3.3 Prova a flessione	46
3.4 Prova a compressione.....	47
3.5 Prova di trazione (Tensile Test)	48
4. RISULTATI E OSSERVAZIONI.....	51
4.1 Monitoraggio in forno elettrico a muffola.....	51
4.2 Modulo elastico dinamico	54
4.3 Resistenza a flessione.....	56
4.4 Resistenza a compressione	59

4.5	Resistenza a trazione (Tensile-Test).....	62
5.	CONCLUSIONI	69
5.1	Considerazioni finali.....	69
	INDICE DELLE FIGURE.....	71
	INDICE DELLE TABELLE	74
	BIBLIOGRAFIA	75

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, i materiali compositi per il rinforzo strutturale sono sempre più utilizzati e studiati per migliorare e garantire ancor di più la sicurezza degli edifici esistenti. I sistemi compositi a matrice inorganica (FRCM) stanno emergendo soprattutto per le loro elevate proprietà meccaniche e per la loro minima invasività nella messa in opera.

I sistemi FRCM oltre ad avere una buona resistenza a temperatura elevata, la possibile applicazione su superfici umide, permeabilità al vapore e reversibilità, hanno anche la caratteristica di rispettare i criteri di conservazione richiesti nelle applicazioni su edifici vincolati. Quest'ultimo è un tema molto importante vista la grande mole di edifici storici presenti in Italia.

Le prestazioni meccaniche di questi sistemi sono state ampiamente studiate in letteratura, mentre le loro proprietà di durabilità in ambienti aggressivi e l'esposizione a temperature elevate sono state ancora soltanto marginalmente investigate.

Con questo lavoro c'è la volontà di andar a studiare più nel dettaglio i sistemi FRCM, con malte geopolimeriche a base di cenere volante o metacaolino rinforzate con fibre in basalto, studiando le loro prestazioni meccaniche dopo esser stati esposti a differenti temperature fino a 600°C. I risultati ottenuti sono stati poi confrontati con quelli di sistemi FRCM costituiti da malte commerciali a base calce e base cemento.

Nel primo capitolo vengono descritti i materiali compositi a matrice inorganica, con particolare attenzione ai sistemi con matrici geopolimeriche.

Nel secondo capitolo viene fornita una descrizione dei materiali utilizzati, con le loro caratteristiche prestazionali. Vengono poi descritte le procedure di realizzazione dei casseri e dei campioni.

Nel terzo capitolo vengono riportati i metodi di prova.

Nel quarto capitolo vengono discussi i risultati ottenuti dalle prove sperimentali.

Nel quinto e ultimo capitolo vengono riportate le conclusioni e le considerazioni finali.

1. STATO DELL'ARTE

1.1 I materiali compositi

Un materiale composito è una miscela naturale o artificiale costituita da uno o più materiali, definiti fasi. Essi differiscono nella forma, nella composizione chimica e nelle proprietà fisiche e che sono insolubili l'uno nell'altro.

I materiali compositi sono costituiti da una fase continua detta “matrice”, da una fase discontinua chiamata “rinforzo”. Inoltre, i materiali che formano il composito finale, presentano una combinazione di proprietà che non si ottengono dai singoli materiali¹ ma bisogna determinare le proprietà del materiale stesso. Tuttavia, per ottenere un materiale con caratteristiche meccaniche elevate, oltre ad avere fibre resistenti bisogna garantire una buona adesione tra la matrice ed il rinforzo così da avere un'interfaccia (Fig. 1). Tale area può essere migliorata o modificata tramite agenti chimici.

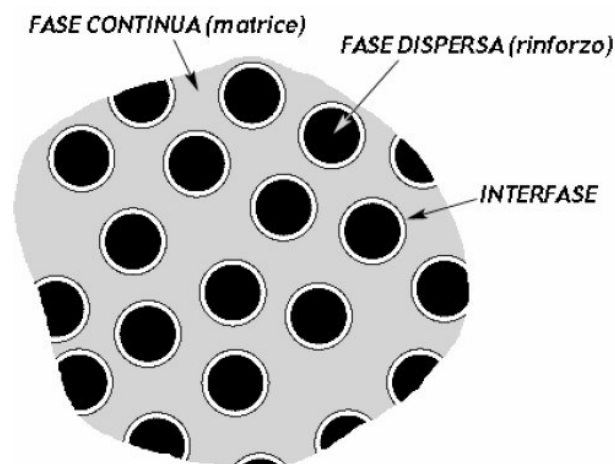


Fig. 1 - Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito.

1.1.1 Classificazione dei materiali compositi

Per i materiali compositi esistono differenti classificazioni, le più comuni sono in funzione della matrice o del tipo di rinforzo.

In base alla natura della matrice (Fig. 2), si distinguono in:

- PMC (Polymer-Matrix Composite), o chiamati anche FRP (Fiber Reinforced Polymer), la quale matrice organica è costituita da resine di varia natura (es. fenoliche, poliesteri)
- MMC (Metallic-Matrix Composite), costituiti una matrice inorganica a base di leghe metalliche (es. alluminio, titanio e i suoi derivati)
- BMC (Brittle-Matrix Composite), matrice sempre inorganica costituita da carburo di silicio o allumina, malte cementizie, materiali a base di calcio o malte geopolimeriche usate molto in ambito edilizio.

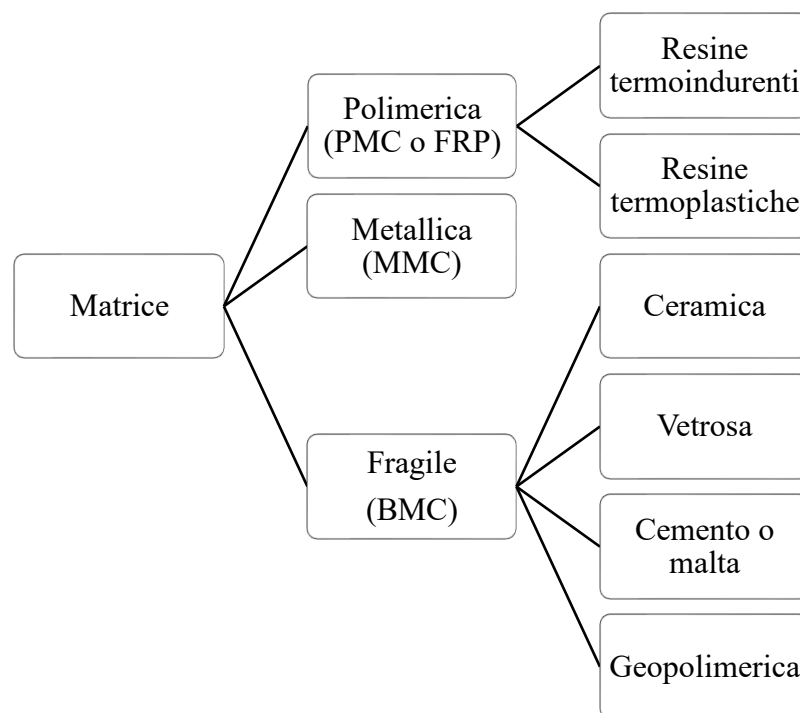


Fig. 2 - Schematizzazione materiali compositi in base alla tipologia di matrice.

In base al tipo di fibra impiegata per il rinforzo (Fig.3):

- Rinforzati con particelle: vengono aggiunte particelle alla matrice con lo scopo di migliorarne le caratteristiche elettriche, termiche, magnetiche, di resistenza all'abrasione, all'usura o all'urto. Di solito queste non portano ad un sostanziale aumento della resistenza meccanica.
- Rinforzati con fibre: queste possono essere continue (lunghe, fra cui FRCCM) o discontinue (corte) e possono essere a sua volta allineate o con orientamento casuale.
- Strutturali: come i laminati e i pannelli sandwich (due facce sottili ma rigide e resistenti sono incollate ad un'anima centrale più leggera con caratteristiche meccaniche più scarse).

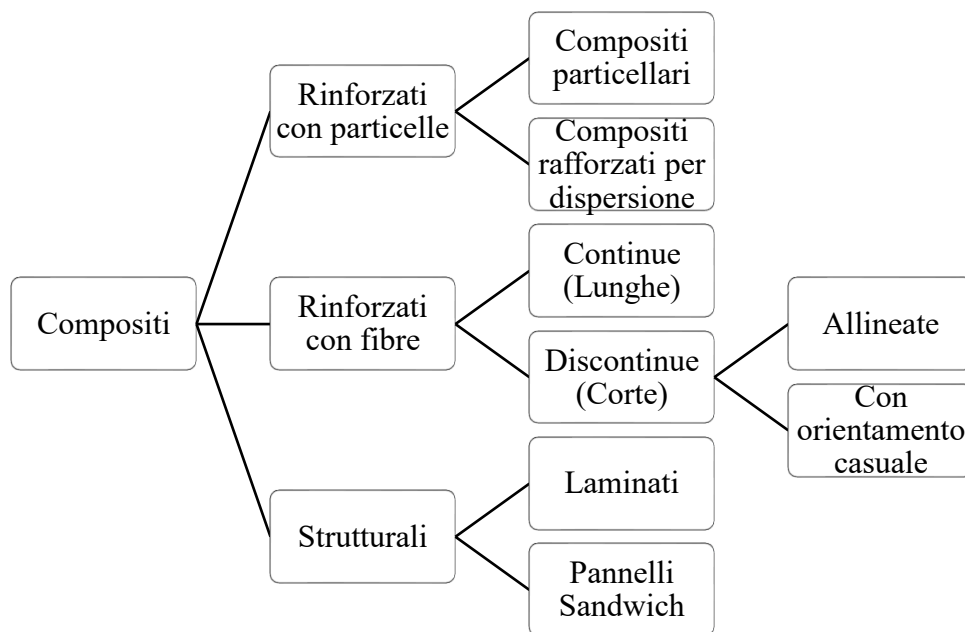


Fig. 3 - Schematizzazione materiali compositi in funzione della tipologia di rinforzo

1.1.1.1 I sistemi compositi a base inorganica

Nel mondo dell'ingegneria civile hanno avuto grande successo i sistemi basati sull'impiego di matrici inorganiche a base minerale, cementizia o di calce rinforzati con fibre. Tuttavia, dalla combinazione del tipo di matrice e dei rinforzi fibrosi, si possono ottenere tipologie diverse di sistemi di rinforzo.

Di seguito sono riportati i sistemi rilevati in letteratura, che si differenziano per la tipologia del rinforzo fibroso e le tecniche di applicazione². Nell'ambito edilizio si distinguono:

- TRC (Textile Reinforced Concrete): consiste in una matrice cementizia a grana fine ad alta resistenza, rinforzata da un tessuto in fibre. Solitamente vengono impiegate fibre di vetro o di carbonio in combinazione con le prime.^{3 4 5 6}
- TRM (Textile Reinforced Mortars): analogo al sistema TRC, vengono impiegati tessuti in fibra di carbonio e la matrice è costituita da una malta a grana fine additivata con polimeri.^{7 8}
- FRC (Fiber Reinforced Cement): Il sistema è costituito da un foglio o tessuto fibroso, il quale viene impregnato attraverso l'immersione completa in una boiaccia. Terminata la fase di impregnazione, il tessuto viene estratto e applicato immediatamente alla superficie dell'elemento da rinforzare⁹;
- MBC (Mineral Based Composite): si differenzia dai precedenti in quanto il rinforzo è costituito da una rete in CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). Il rinforzo viene applicato all'elemento strutturale previa preparazione della superficie e applicazione di uno strato di primer.
- FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix): descrive un sistema composito costituito da una matrice inorganica, tipicamente costituita da combinazioni di cemento Portland, fumo di silice e ceneri volanti come legante e con un contenuto massimo del 5% di frazioni organiche, con un rinforzo a rete. L'efficacia meccanica dei sistemi FRCM è fortemente influenzata dalla capacità della matrice di bagnare le fibre, dal legame che si crea tra matrice e fibre e

dall'adesione della matrice al substrato da rinforzare (vedi *figura 1.1*). Nel caso di rinforzo di murature, in particolare di carattere storico e monumentale, le matrici impiegate sono spesso a base di calce.

Quest'ultimo sistema sarà l'oggetto di studio di questa tesi.

1.2 I sistemi FRCM

I sistemi FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) sono un sistema composito costituiti da una matrice inorganica, tipicamente costituiti da cemento Portland, fumo di silice e ceneri volanti e con un 5% di frazioni organiche, con un rinforzo in rete a maglia larga (0.6-1.5 cm) a bassa densità (0.6-1.8 kg/m²). Essi hanno la caratteristica di avere una resistenza meccanica fortemente influenzata dall'aderenza fra matrice e fibra e dall'adesione della matrice al substrato da rinforzare. Nel caso di rinforzo in strutture in muratura, viene utilizzata una matrice a base di calce.

Per quanto riguarda le strutture in c.a. le prime fibre utilizzate erano quelle in acciaio, in seguito però l'utilizzo di FRCM con rinforzo in carbonio ha portato alla formazione di malte con caratteristiche finalizzate a migliorare le proprietà adesive e meccaniche. Le malte cementizie possiedono minore capacità di impregnare le fibre rispetto alle malte polimeriche e rispetto a quest'ultime si fanno preferire per la resistenza all'umidità, alle medio-alte temperature, al fuoco e agli agenti aggressivi. Una soluzione per ridurre l'aderenza fra la fibra e la matrice è quella di utilizzare tessuti unidirezionali e reti a maglia larga, favorendo il grado di penetrazione della matrice all'interno della rete¹¹.

I principali vantaggi dei sistemi FRCM includono:

- 1) Migliorano la resistenza meccanica e la capacità di carico delle strutture in calcestruzzo armato e muratura.
- 2) Flessibilità: sono altamente adattabili, permettendo una maggiore aderenza nei punti critici della struttura, come gli angoli o le curve.
- 3) Sono molto resistenti agli agenti atmosferici, come aloni, esposizione al sole, freddo, pioggia, e umidità, aiutando a preservare la robustezza della struttura.
- 4) Sono resistenti al fuoco, offrendo una protezione supplementare contro eventuali danni causati

dal calore e dalle fiamme.

- 5) Economicità: sono una soluzione molto economica per il rinforzo e la riparazione di strutture in cemento e muratura rispetto ai costi di demolizione e ricostruzione.
- 6) Affidabilità: sono considerati molto affidabili e sicuri, offrendo una lunga durata e una maggiore protezione in caso di eventi sismici.
- 7) Facilità di installazione: sono relativamente facili da installare e richiedono un tempo minimo di inattività della struttura, offrendo una soluzione rapida e conveniente per il rinforzo delle strutture.

1.2.1 I rinforzi per i sistemi FRCM

Esistono differenti tipi di rinforzi per i sistemi FRCM, ma in ambito edilizio i più utilizzati sono quelli a fibra continua a rete. Le fibre sono dotate di un'elevata rigidità e resistenza a trazione; pertanto, hanno il compito di assorbire la maggior parte del carico esterno applicato al materiale. Inoltre, esistono varie forme di fibre in quanto sono costituite da filamenti molto sottili e quindi difficili da manipolare singolarmente (Fig.4).

Le fibre più comunemente usate sono in carbonio, aramide, acciaio, PBO (poliparafenilenzobisossazolo), vetro e basalto. Le loro principali caratteristiche sono: la geometria (forma e dimensione), la densità, la massa, l'orientamento e la frazione volumetrica.

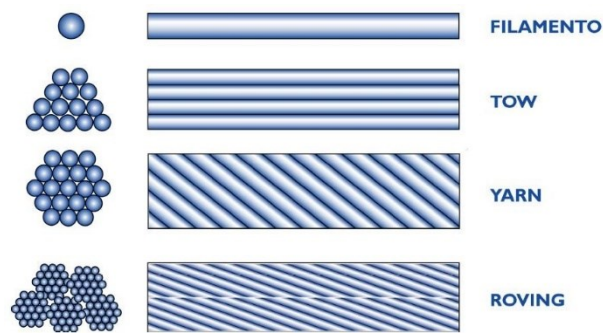


Fig. 4 - Tipologie di fibre. Immagine tratta da CNR-DT 200/2004, P.11

- Filamento: elemento base con dimensioni di circa 10 μm di diametro;
- Cavo di filatura (*Tow*): è il prodotto della macchina di filatura ed è costituito da un fascio formato da un gran numero di filamenti, destinato ad essere filato, ritorto o strappato per essere utilizzato sotto forma di fibra discontinua;
- Filo o filato (*Yarn*): filo formato da fibre tenute insieme da torsione;
- Filo assemblato (*Roving*): fascio costituito da filati assemblati parallelamente e senza torsione intenzionale¹².

Le fibre in commercio sono costituite di differenti varietà di tessuti nelle quali si distingue una direzione principale detta “ordito” (*warp*) e una trasversale ortogonale alla prima detta “trama” (*weft*) (Fig.5).

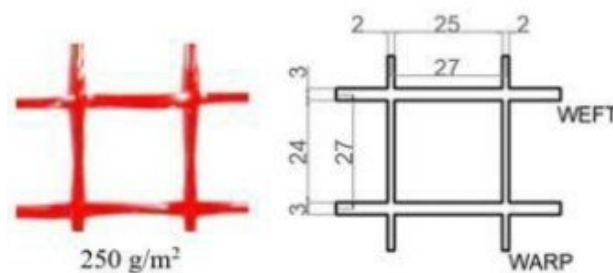


Fig. 5 - Tessuto in fibra di vetro in cui sono visibili le due direzioni.

1.2.2 I sistemi FRCM a base geopolimerica ad alte temperature

Oggi giorno si stanno studiando malte a base di geopolimeri da utilizzare con fibre di rinforzo FRCM. I risultati che si stanno ottenendo dalle ricerche sono ottimi e promettenti per garantire un'ottima resistenza meccanica simile a quella degli analoghi sistemi realizzati con malte tradizionali e con un incremento di temperatura non indifferente.

1.2.2.1 Studi scientifici di FRCM a temperature elevate

I risultati che seguono sono stati oggetti di ricerca dell'UniBo e UniCam, analizzando e studiando il comportamento FRCM dopo esser stato sottoposto ad alte temperature.

Francesca Ferretti et al.¹³ hanno valutato il comportamento a trazione di vari sistemi FRCM sottoposti ad un aumento di temperatura. Sono state eseguite 90 prove di trazione su 6 diversi sistemi compositi, realizzati con matrice a base di calce o cemento accoppiati con fibre di acciaio o fibre in basalto. Hanno creato tre tipi di malte: CEM, NHL1 e NHL2, con 5 tipi di fibre: acciaio inossidabile(S), basalto con tre diverse densità (B1,B2,Be) e vetro(AG).

Sono state create poi differenti combinazioni, e per ogni combinazione sono stati creati 15 provini di lunghezza 500mm e spessi 10mm, mentre la larghezza dell'intero provino di (60-64mm) funzione del numero di yarm.

Le proprietà meccaniche sono state determinate su provini di ogni matrice, 160 x 40 x 40 mm³, lasciati maturare 28 giorni e sottoposti a flessione su 3 differenti punti a 22°C. Successivamente sono state svolte prove di flessione a 50°C e 80°C. I campioni poi sono stati messi in una camera termica con una velocità di 30°C/h. Si è notato che le malte a base NHL1 e NHL2 sono caratterizzate da una progressiva riduzione di resistenza a flessione all'aumentare della temperatura, effetto meno evolvente nei CEM.

Per le prove di trazione è stato imposto un carico termico di 30°C/h, ma in questo caso le temperature studiate sono state 4: temperatura ambiente (22°C), 40°C, 50°C e 80°C. Raggiunta la temperatura target, il carico termico lo hanno mantenuto costante per 5 o 360 minuti e quindi hanno svolto la prova di trazione.

In tutti i casi hanno osservato un tipico comportamento trilineare (Fig. 9), caratterizzato da una fase iniziale non fessurata, una fase fessurativa ed una fase completamente fessurata in cui prevaleva il ruolo della fibra.

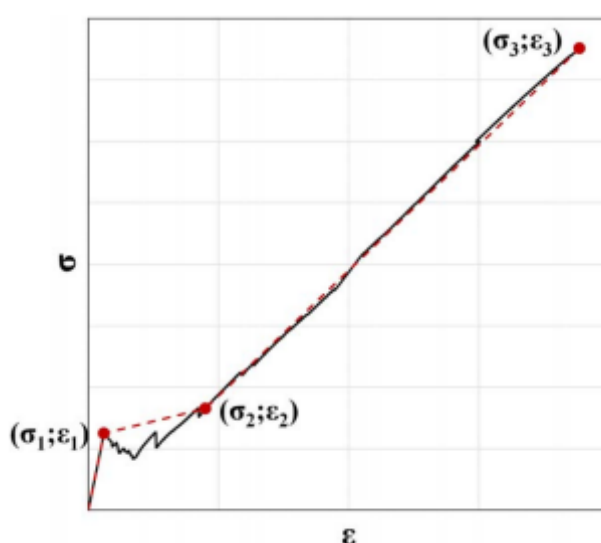


Fig. 6– Comportamento trilineare della prova di trazione – UniBo.

Si può affermare che il periodo di esposizione non ha influenzato in modo apprezzabile i risultati ma ha avuto un grande impatto sulla durata totale del test che, secondo loro, potrebbe essere significativamente ridotta rispetto ai 360 minuti raccomandati dalle linee guida italiane (CSLP 2018).

Dai risultati si è evidenziato che un aumento della temperatura fino a 80°C non ha influenzato significativamente le prestazioni meccaniche delle fibre, ma che la temperatura possa determinare una variazione della resistenza a trazione della matrice, come è stato dimostrato dalle prove di flessione.

Inoltre, sono state svolte prove sull'adesione fra FRCM e murature esposti sempre ad elevate temperature da Luciano Ombres et al¹⁴. I provini sono stati sottoposti a 20°C, 100°C, 150°C e 200°C per tre ore e poi fatti raffreddare fino a che non sono ritornati a temperatura ambiente.

Durante il test, la muratura è stata trattenuta mentre le fibre sono state tirate in controllo di spostamento da una macchina di prova universale così da misurare lo scorrimento globale (Fig.10).

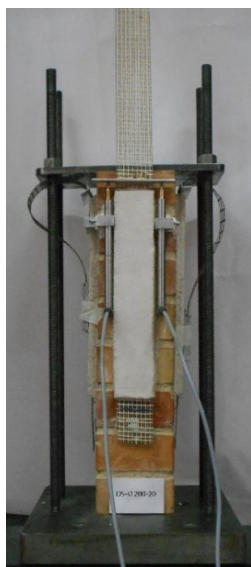


Fig. 7– Setup di prova single shear test – UniCal.

Dai risultati ottenuti si evince che:

- All'aumentare della temperatura i sistemi rispondevano con valori minori di carico di picco.
- I valori di scorrimento aumentano per i sistemi con fibre in basalto e PBO mentre diminuiscono per i sistemi con rinforzo in acciaio.
- Il comportamento dei sistemi con fibra in acciaio diventa fragile per valori di temperature elevate.

Nei prossimi capitoli verrà spiegato il processo di geopolimerizzazione.

1.2.3 Geopolimeri

I geopolimeri sono leganti idraulici costituiti da polveri inorganiche, allumino-silicatiche disciolte in un ambiente basico¹⁵. Le proprietà chimico-fisiche e meccaniche di questi materiali sono confrontabili con quelle tipiche delle ceramiche¹⁶; infatti, è un prodotto confrontabile con rocce naturali anche per la durezza, longevità e stabilità chimica, mentre rispetto ai cementi possiedono strutture più reticolate e complesse. Una qualità molto importante e sostenibile di questi materiali è la notevole riduzione di emissione di gas serra rispetto ai cementi tradizionali.

Una proposta di classificazione (avanzata da J.S.J van Deventer e J.L Provis) (Fig6), prende in considerazione il contenuto di calcio e alluminio.

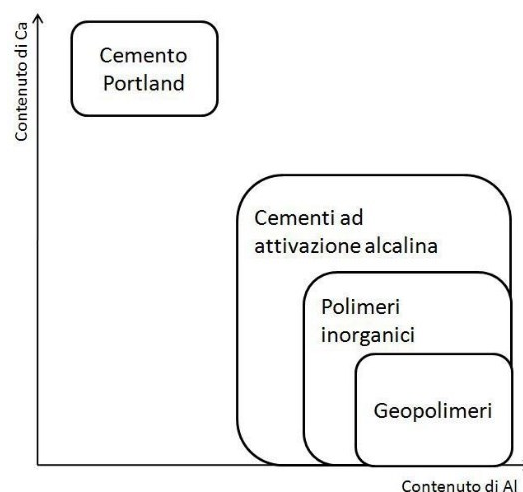


*Fig. 8 - Classificazione di “materiali attivati con alcali”
secondo J.S.J. Van Deventer e J.L. Provis.*

I cementi ad attivazione alcalina sono leganti inorganici dati dalla reazione fra sale di un metallo alcalino con polvere di silicati.

I polimeri inorganici rispetto ai precedenti si differiscono per la microstruttura disordinata e maggior grado di reticolazione, inoltre hanno un maggior contenuto di alluminio e sodio.

I geopolimeri sono un sottoinsieme di polimeri inorganici, hanno un altissimo contenuto di sodio e un basso contenuto di calcio. Una loro caratteristica è quella di non avere fasi cristalline idrate o carbonate. I geopolimeri hanno una struttura tri- o bi- dimensionale in funzione del rapporto atomico Si/Al aventi catene con legami covalenti. Una loro caratteristica, come anticipato prima, è la sostenibilità. Emettono circa l'80% in meno di emissione di CO₂ in quanto non necessitano di alte temperature per la calcinazione. Inoltre, si possono utilizzare ceneri volanti o loppa d'altoforno, quindi materie prime di scarto industriale. Per questi motivi trovano grande impiego nelle costruzioni come materiali sostenibili.

Produrre un materiale geopolimerico bisogna avere due materie prime (Fig.7):

- La polvere allumino-silicato (reattiva al processo di geopolimerizzazione) che determina il tipo di applicazione in base alla sua morfologia
- La soluzione acquosa di idrossidi e/o di silicati alcalini



Fig. 9- Materie prime nella produzione del materiale geopolimerico.

La geopolimerizzazione si può suddividere in:

- Dissoluzione di Al e Si in una soluzione altamente alcalina (idrolisi alcalina)
- Diffusione delle specie dissolte nella soluzione;
- Policondensazione dei complessi di Al e Si con la soluzione alcalina attivatrice e formazione del gel
- Indurimento del gel e formazione del prodotto geopolimerico¹⁷

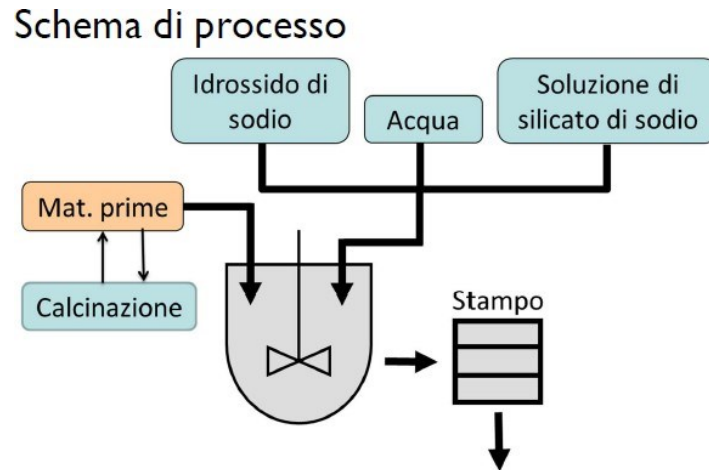


Fig. 10 - Schema di processo per ottenere materiale geopolimerico.

1.2.4 Qualificazione di un sistema FRCM

Seguendo la Normativa Tecnica per le Costruzioni del 2018, i materiali da costruzione impiegati per uso strutturale, devono essere certificati, identificati o in possesso di un documento di validità affinché venga accettato dal Direttore dei Lavori. Tali elementi devono avere il marchio CE o devono avere un certificato di Valutazione Tecnica (CVT) rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale (STC), basandosi sulle linee guida approvate dal Consiglio dei Lavori Pubblici.

Le prove da eseguire per l'accettazione dei materiali FRCM sono:

- Prove di caratterizzazione meccanica:
 - prove di trazione sulla rete senza matrice inorganica;
 - prove di trazione sui provini di FRCM
 - prove di distacco dal supporto
 - prove di trazione in presenza di sovrapposizione delle reti
- Prove di durabilità ambientale su provini di FRCM:

- prove cicliche di gelo e disgelo
- prove di invecchiamento artificiale
- prove di comportamento alle sollecitazioni termiche¹⁸.

1.2.5 Quadro normativo

I sistemi FRCM inizialmente non avevano codici normativi o linee guida sulla messa in opera e progettazione su cui fare riferimento. La Commissione di Studio sulle norme tecniche con la diffusione di molteplici prodotti FRCM, hanno redatto documenti tecnici a cui possono riferirsi codici e normative nazionali. Paesi come Stati Uniti e Giappone sono stati i primi ad inserire codici e documenti sulla messa in opera.

A differenza dell'Italia in cui nella normativa vigente (NTC2018), non è né espresso e né analizzato l'utilizzo di FRCM o FRP. Viene solamente citato nel Capitolo 12 "...possono altresì essere utilizzati materiali non tradizionali, purché nel rispetto di normative e documenti di comprovata validità"¹⁹.

Nel Capitolo 12 sono presenti:

- Istruzioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
- Linee Guida del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
- Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale e successive modificazioni del Ministero per i Beni e le Attività Culturali, previo parere del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici sul documento stesso;
- Istruzioni e documenti tecnici del Consiglio Nazionale delle Ricerche (C.N.R.)²⁰.

Inoltre, qui sotto riportate le linee guida del CNR che descrivono l'utilizzo dei sistemi FRCM:

- Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati (CNR-DT 200/2013);
- Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di compositi Fibrorinforzati a matrice inorganica (CNR-DT 215/2018).
- Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di strutture di calcestruzzo fibrorinforzato (CNR-DT 204/2006).

2. MATERIE PRIME E PREPARAZIONE

Per questo lavoro sono state studiate quattro matrici: due sono le matrici geopolimeriche create in laboratorio (R1 FAK, R1 MKK), le altre due sono matrici commerciali (Geolite 40, Geocalce Multiuso). Metteremo a confronto le quattro malte in termini meccanici e deformativi.

2.1 Matrici commerciali

Le matrici commerciali utilizzate sono: Geolite e Geocalce di marca Kerakoll (Fig.11). Sono delle malte premiscelate, di conseguenza è stata aggiunta acqua alle polveri (0.9 l per 5kg la Geolite40, 1.1 l per 5 kg di Geocalce). Successivamente denominate CEM e CAL.



Fig. 6 – Geolite 40 a sinistra, Geocalce Multiuso a destra, Kerakoll.

2.2 Matrici Geopolimeriche

Come introdotto precedentemente, le materie prime utilizzate per le matrici geopolimeriche sono: polveri reattive allumino-silicatiche e la soluzione attivante alcalina.

2.2.1 Polveri reattive allumino-silicate

2.2.1.1 Metacaolino

Il metacaolino è una roccia pozzolanica naturale ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$) derivante dalla cottura di argille contenenti caolino in un intervallo di temperatura compreso fra 600-900°C.

È per eccellenza la materia prima nella produzione dei geopolimeri e risulta essere altamente reattivo. La sua reattività dipende dalle caratteristiche morfologiche, composizionali e mineralogiche del materiale e infine dal suo grado di deidrossilazione. Quest'ultima è funzione del processo di produzione del metacaolino, ossia dipende dalla temperatura di calcinazione e dalla tipologia di forno. La deidrossilazione inizia alla temperatura di 500°C formando metacaolino (il suo processo chimico $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (caolinite) $\rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ (metacaolino)).

Il metacaolino utilizzato per questa sperimentazione è MetaStar 501 (Fig.12 e Tab1), il quale non scurisce le applicazioni a base di cemento bianco o grigio.

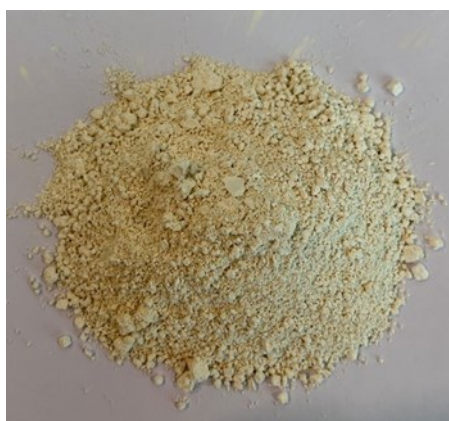


Fig. 7 – Polvere di metacaolino usato nella sperimentazione.

METACAOLINO	
COMPONENTE	CONTENUTO IN MASSA [%]
SiO_2	55
Al_2O_3	40
Fe_2O_3	0.6
K_2O	2.4
MgO	0.4
CaO	< 0.1
Na_2O	< 0.1

Tab. 1 –Costituenti metacaolino MetaStar 501.

2.2.1.2 Cenere volante

Le ceneri volanti si ottengono dalla combustione di carbone in centrali termoelettriche, separando il solido dai fumi attraverso appositi filtri elettrostatici o meccanici. Si formano ad una temperatura di 1400°C circa e la loro struttura chimica è composta da silice, allumina e ossido di ferro Fe_2O_3 (tutti composti che reagiscono a temperatura ambiente).

Le ceneri volanti hanno un colore grigio scuro, con un diametro particellare compreso fra 1 e 100 μm ; le particelle inoltre possono esser piene o porose e se hanno una forma sferica favoriscono una migliore lavorabilità del materiale.

I vantaggi nell'utilizzare la cenere volante sono:

- Minor sviluppo di calore in fase di idratazione
- Maggior impermeabilità
- Maggior fluidità dell'impasto
- Minor impatto ambientale come materiale da costruzione¹²

Esistono due tipi di ceneri volanti:

- Ceneri volanti di natura calcica, o di classe C, sono formati dalla combustione di carboni sub bituminosi e lignite
- Ceneri volanti di natura silicea, o di classe F, formati dalla combustione di carboni bituminosi o dell'antracite (attualmente l'unica tipologia di cenere disponibile in Italia) (Fig13 e Tab2)



Fig. 8 - Polvere di cenere volante silico-alluminosa usata nella sperimentazione.

CENERE VOLANTE	
COMPONENTE	CONTENUTO IN MASSA [%]
SiO ₂	36 - 52
Al ₂ O ₃	22 - 36
Fe ₂ O ₃	2 - 10
K ₂ O	0.2 - 2
MgO	0.3 - 3
CaO	1 - 10
Na ₂ O	0.1 - 0.6
TiO ₂	0.1 - 1.7
SiO ₃	0.2 - 2

Tab. 2 – Costituenti cenere volante silicea

2.2.1.3 Cemento alluminoso

Il cemento alluminoso viene utilizzato per definire cementi principalmente costituiti da alluminati idraulici di calcio, per la produzione di calcestruzzi altamente performanti a breve stagionatura e resistenti alle basse e alte temperature e agli attacchi chimici (Fig 14).

Si realizza fondendo materiale calcifero e materiale alluminoso alla temperatura di circa 1600°C, una volta raffreddato viene macinato così da ottenere il materiale finito.



Fig. 9 - Polvere di cemento alluminoso usato per ridurre i fenomeni di efflorescenza.

Il cemento fuso offre elevati valori di resistenza meccanica a breve termine, per via del rapido indurimento, ottime proprietà refrattarie, elevata resistenza all'attacco solfatico e all'azione dilavante dell'acqua. Grazie al notevole contenuto di allumina e silice nella polvere di cemento fuso, essa può fungere da alluminosilicato per la produzione di geopolimeri.

La composizione in macro-componenti del prodotto utilizzato durante la sperimentazione è descritta nella seguente tabella (Tab. 3).

CEMENTO ALLUMINOSO	
COMPONENTE	CONTENUTO IN MASSA [%]
SiO ₂	3.5 - 5.5
Al ₂ O ₃	37.5 - 41
Fe ₂ O ₃	13 - 17.5
K ₂ O	< 0.4
MgO	< 1.5
CaO	1 - 10
Na ₂ O	< 0,4
TiO ₂	< 4

Tab. 3 – Componenti cemento alluminoso (Ciment Fondu Imerys).

2.2.2 Soluzione Alcalina

La soluzione alcalina è un attivatore utilizzato per innescare la reazione geopolimerica e il processo di indurimento. Ne esistono di vario genere (idrossidi, solfati, silicati alcalini) e differiscono sia per tipologia che per quantità, influenzando sul pH, sul livello di reattività del mix e sulla resistenza meccanica. Si è dimostrato che aumentando il pH della soluzione alcalina, gli impasti geopolimeri sono più lavorabili e sono più performanti meccanicamente^{13 14}.

Se nell'impasto viene aggiunto un quantitativo di acqua maggiore, la resistenza meccanica diminuisce e aumenta la porosità del materiale.

Nella nostra sperimentazione sono state utilizzate soluzioni alcaline composte da silicato di sodio e idrossido di potassio.

2.2.2.1 Silicato di sodio

Il silicato di sodio (Na_2SiO_3) è un composto chimico che, grazie alla sua elevata solubilità viene utilizzato per la produzione di soluzioni alcaline. Esso si presenta stabile in soluzioni basiche o neutre mentre nelle soluzioni acide reagisce fino a formare l'acido silicico.

Le caratteristiche del silicato di sodio, utilizzato nella nostra sperimentazione, sono descritte in seguito (Tab. 4).

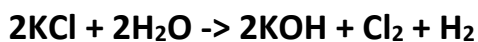
SILICATO DI SODIO	
PROPRIETA' CHIMICO-FISICHE	DATI
Formula bruta	Na_2SiO_3
Densità a 20°C [g/cm ³]	1,54
Rapporto ponderale $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	2,04
Rapporto molare $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	2,10
SiO_2 [%]	29,86
Na_2O [%]	14,64
H_2O [%]	55,50
Densità equivalente di Baumè	50,60
pH (soluzione all'1%, 20°C)	12,80
Titolo in sodio silicato [%]	44,50

Tab. 4 - Proprietà chimico-fisiche del silicato di sodio

2.2.2.2 Idrossido di potassio

L'idrossido di potassio (KOH), è un elemento corrosivo dotato di una minore solubilità in acqua.

Viene prodotto tramite il processo di cloro-alcali, ovvero tramite il processo cloro-potassio. La sua sintesi è la seguente:



Per la nostra sperimentazione è stata utilizzata una soluzione con il 50% massa di solidi KOH e il restante 50% acqua (opportunitamente diluita con maggior acqua a seconda della concentrazione dell'idrossido). Nella tabella seguente sono riportate le caratteristiche dell'idrossido di potassio utilizzato (Tab. 5).

IDROSSIDO DI POTASSIO	
PROPRIETA' CHIMICO-FISICHE	DATI
Formula bruta	KOH
Massa molare [u]	56,11
Densità a 20°C [g/cm ³]	2,04
Solubilità in acqua 20°C [g/l]	1130
Stato a 20°C	Solido

Tab. 5 – Proprietà chimico-fisiche dell'idrossido di potassio

2.2.3 Inerte

L'inerte utilizzato nelle seguenti sperimentazioni è la sabbia Esincalce 0/3, una sabbia calcarea, esclusivamente macinata, di granulometria fino a 3 millimetri ideale per la preparazione di malte da muratura o da intonaco. E' stata utilizzata in condizioni di sabbia satura a superficie asciutta (SSA), ovvero alla sabbia secca è stato aggiunto il 3.4% in peso di acqua.



Fig. 10 – Sabbia usata nella sperimentazione.

2.2.4 Mix design

Per mix design si intende il “progetto della miscela”, studiando i giusti dosaggi dell’impasto che si vuole andar ad ottenere. Si parte da una precisa richiesta prestazionale: lavorabilità, resistenza meccanica, durabilità, ecc. e dalle caratteristiche delle materie prime disponibili.

Il mix design non si basa su una legge specifica o su un calcolo esatto, ma su tabelle e correlazioni sperimentali.

L’UNI1504-2006 classifica le malte, dopo 28 giorni di stagionatura, in base alle loro caratteristiche meccaniche:

- Classe R1, per $10 \text{ MPa} \leq R_c \leq 15 \text{ MPa}$

- Classe R2, per $15 \text{ MPa} \leq R_c \leq 25 \text{ MPa}$
- Classe R3, per $25 \text{ MPa} \leq R_c \leq 45 \text{ MPa}$
- Classe R4, per $R_c \geq 45 \text{ MPa}$

Per la nostra sperimentazione, è stato necessario determinare i giusti dosaggi per la realizzazione di malte geopolimeriche. Sono stati effettuati due tipi di miscele per la realizzazione di due tipi di malte geopolimeriche (Tab. 6). Lo studio dei giusti dosaggi deve essere un procedimento accurato ed attento, dove il comportamento della malta è sicuramente influenzato dalla quantità delle materie prime e dalla differenza di dosaggio all'interno dell'impasto. In seguito, è riportata la miscela per 1 litro di impasto.

MIX PER 1 LITRO [g]								
Miscela	Sabbia s.s.a.	Cenere volante FA	Cemento Alluminoso CAC	Metacaolino MKK	Soluzione attivatrice			Acqua durante il mix H ₂ O
					Silicato di Sodio SS	Idrossido di Potassio KOH 50%	Acqua H ₂ O	
FAK	1350	460	40	0	150	60	90	20
MKK	1350	0	0	500	300	80	220	60

Tab. 6 – Mix di sostanze utilizzate per la formazione di malte geopolimeriche

2.3 Rete di rinforzo in basalto

La rete di rinforzo utilizzata è la Glasstex Struktura BA 420 (Fig. 16), rete composta da fibre di basalto e acciaio apprettata con un coating a base di poliestere alcali resistente. Il tipo di rete utilizzata è a fibre inorganiche, nota positiva per la sostenibilità. Un ulteriore vantaggio è la loro resistenza a basse temperature e una buona resistenza alla corrosione agli acidi. Le fibre in basalto hanno un'elevata resistenza a taglio e ottime prestazioni meccaniche per il trattamento con resina a base acquosa.

Di seguito viene riportata una tabella con le caratteristiche meccaniche delle fibre utilizzate (Tab.7) e un'immagine rappresentativa delle caratteristiche geometriche (Fig16).

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
Densità basalto	2.7 g/cm ³	-	-
Spessore medio tessuto apprettato	1.15 mm	-	-
Colore	Bronzo	-	-
Allungamento a rottura	< 5%	-	-
Numero di fili in ordito	50	0.5	-
Numero di fili in trama	50	0.5	-
Altezza rotolo	100 cm	-	-
Lunghezza rotolo	50 m	-	-
Sezione resistente	66.67 mm ² /m	-	-
Resistenza a trazione (ordito)	132 kN/m	-	-
Resistenza a trazione (trama)	120 kN/m	-	-
Peso del rotolo	10.5 kg	-	-

Tab. 7 – Caratteristiche tecniche del sistema di rinforzo in basalto.

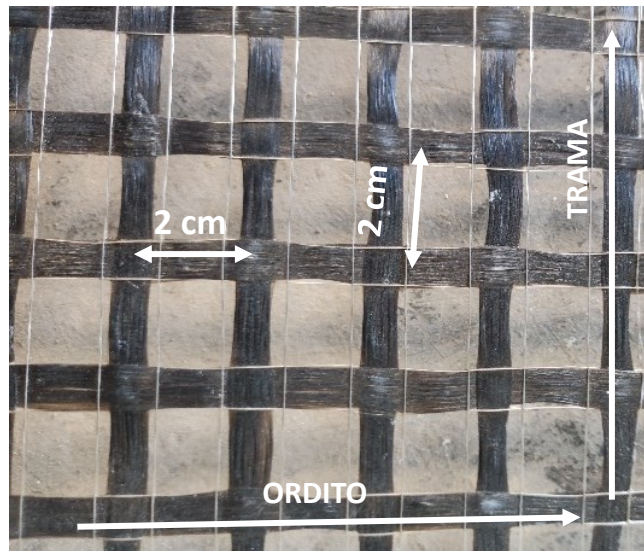


Fig. 11 – Rinforzo in basalto usato nella sperimentazione

2.4 Preparazione

Di seguito verrà fornita una descrizione della realizzazione dei casseri, della preparazione dei getti; quindi, della realizzazione dei campioni e delle differenti prove eseguite sui provini per determinare le loro caratteristiche meccaniche e prestazionali.

2.4.1 Tipologia Casseri

Sono state utilizzate varie tipologie di casseri, che si differenziano per materiale e misura.

2.4.1.1 Casseri 16 x 4 x 4 cm³ (da normativa)

I casseri 16 x 4 x 4 cm³ non sono stati realizzati in laboratorio ma, sono casseri prefabbricati in metallo secondo la normativa NTC18.

Per le matrici commerciali, le pareti dei casseri sono state ricoperte da un disarmo liquido (Fig.17), mentre per le matrici geopolimeriche, le pareti delle casserature sono state ricoperte con lo scotch da pacchi (Fig.18). Questo per facilitare la scasseratura in seguito.



Fig. 12 – Casseri in metallo $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ con disarmante per provini di malta commerciale.



Fig. 13 – Casseri in metallo $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ con scotch per provini di malta geopolimerica.

2.4.1.2 Casseri $38 \times 6 \times 1 \text{ cm}^3$

I casseri con questa dimensione sono stati realizzati con listelli in legno, fissati fra loro con viti ad una lastra anch'essa in legno. Anche per questa tipologia, la cassetatura per le malte commerciali è stata trattata con disarmante (Fig.19), mentre per le malte geopolimeriche, le pareti sono state protette dallo scotch da pacchi (Fig.20).



Fig. 19– Casseri in legno 38 x 6 x 1 cm³ con scotch per provini in composito con malta geopolimerica



Fig. 14 – Casseri in legno 38 x 6 x 1 cm³ con scotch per provini in composito con malta geopolimerica

1.4.1.3 Casseri 19 x 4 x 1 cm³

Questa tipologia di casseri è stata realizzata come la precedente 38 x 6 x 1 cm³, utilizzati per la realizzazione di provini con le termocoppie K immerse durante il getto del materiale (Fig.21).



*Fig. 15 – Casseri in legno $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$
per malta commerciale a sinistra, per malta geopolimerica a destra.*

2.4.2 Rinforzi per i campioni

Prima del getto è stata tagliata la rete in basalto delle dimensioni dei casseri $38 \times 6 \times 1 \text{ cm}^3$ e per i casseri $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ affinché ci fossero tre yarn in direzione longitudinale nei primi e due yarn nei secondi (Fig. 22 e 23).

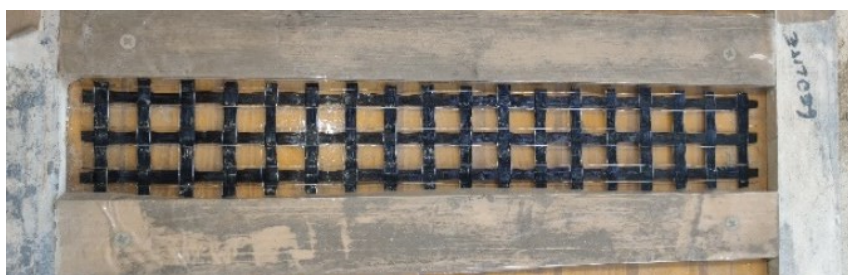


Fig. 16 - Rete in basalto per provini $38 \times 6 \times 1 \text{ cm}^3$ (3 yarn).



Fig. 17 – Rete in basalto per provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ con termocoppia (2 yarn).

2.4.3 Getti

Per la realizzazione sono state predisposte le soluzioni attivatrici composte da silicato di sodio, idrossido di potassio e acqua per le matrici geopolimeriche (Fig.24). È stato necessario pesare in una bilancia 10^{-2} g in quattro contenitori differenti (Fig.25) per avere un controllo e anche una maggiore manovrabilità in fase di mescolamento. (Vedi Tab.6 paragrafo 2.2.4 Mix design).



Fig. 18 – Silicato di sodio (a sinistra) e idrossido di potassio (a destra) usati nella sperimentazione.



Fig. 19 – Bilancia di precisione usata nella sperimentazione;

Successivamente si è calcolato il dosaggio delle polveri:

- Cenere volante e cemento alluminoso per la miscela FAK
- Metacaolino per la miscela MKK
- Geolite per la miscela rinominata CEM
- Geocalce per la miscela rinominata CAL

Per quanto riguarda le matrici FAK e MKK, nella fase di mescolamento è stata aggiunta sabbia in condizioni sature e asciutte (sempre con riferimento al mix design).

Una volta definite le quantità dei materiali sia liquidi che solidi, sono state mescolate fra loro le soluzioni liquide con i materiali in polvere, in un apposito contenitore, con un miscelatore elettrico (Fig.26) per rendere la malta il più omogenea possibile.



Fig. 20 – Miscelatore elettrico usato nella sperimentazione.

Per i provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$, il getto è stato relativamente semplice. Una volta pronta la miscela, si è eseguito il getto ponendo la cassetta sopra una tavola vibrante (Fig.27), per eliminare il più possibile le bolle d'aria create durante la miscelazione e/o durante il getto.



Fig. 27– Tavola vibrante usata nella sperimentazione.

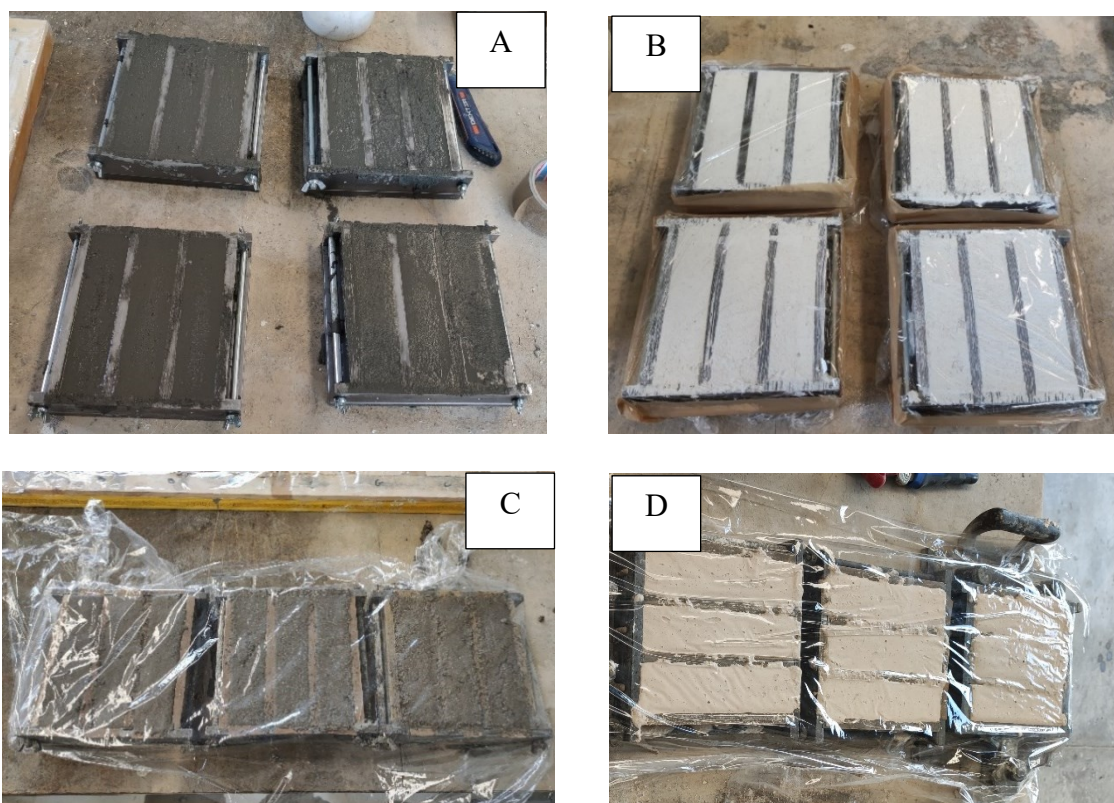


Fig.28:

- (A) Provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ in geolite 40 (CEM);*
- (B) Provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ in geocalce multiuso (CAL);*
- (C) Provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ in cenere volante e cemento alluminoso (FAK);*
- (D) Provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ in metacaolino (MKK).*

Successivamente sono stati coperti con una pellicola trasparente per limitare al massimo l'evaporizzazione di acqua e la formazione di efflorescenze. Sono rimasti coperti due giorni, poi sono stati scassati e lasciati maturare a temperatura ambiente, sempre ricoperti dalla pellicola, per 28 giorni.

Stesso procedimento, ma con una difficoltà maggiore, è stato eseguito per i provini $38 \times 6 \times 1 \text{ cm}^3$. L'unica differenza è che il getto è stato suddiviso in due fasi (Fig. 29 e 30): la prima fase è la stesura del getto con uno spessore di mezzo centimetro, poi si pone la rete in fibra di rinforzo in basalto e infine la seconda fase è di nuovo il getto fino a bordo cassero sopra la tavola vibrante.

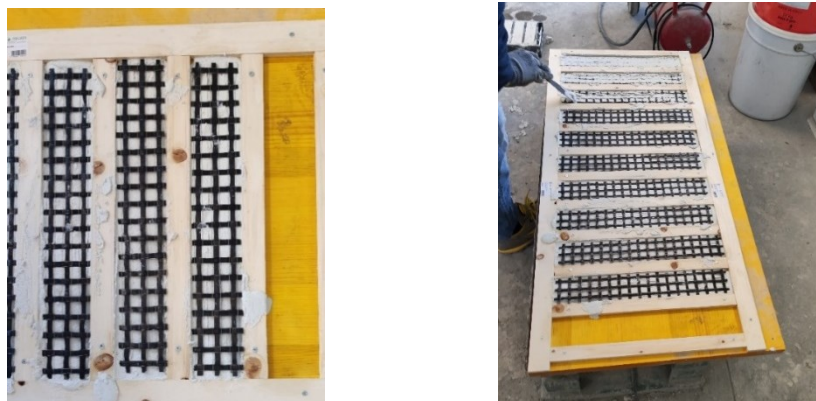


Fig. 29 – Fase di stesura del primo strato di malta e successiva posa della rete di rinforzo.

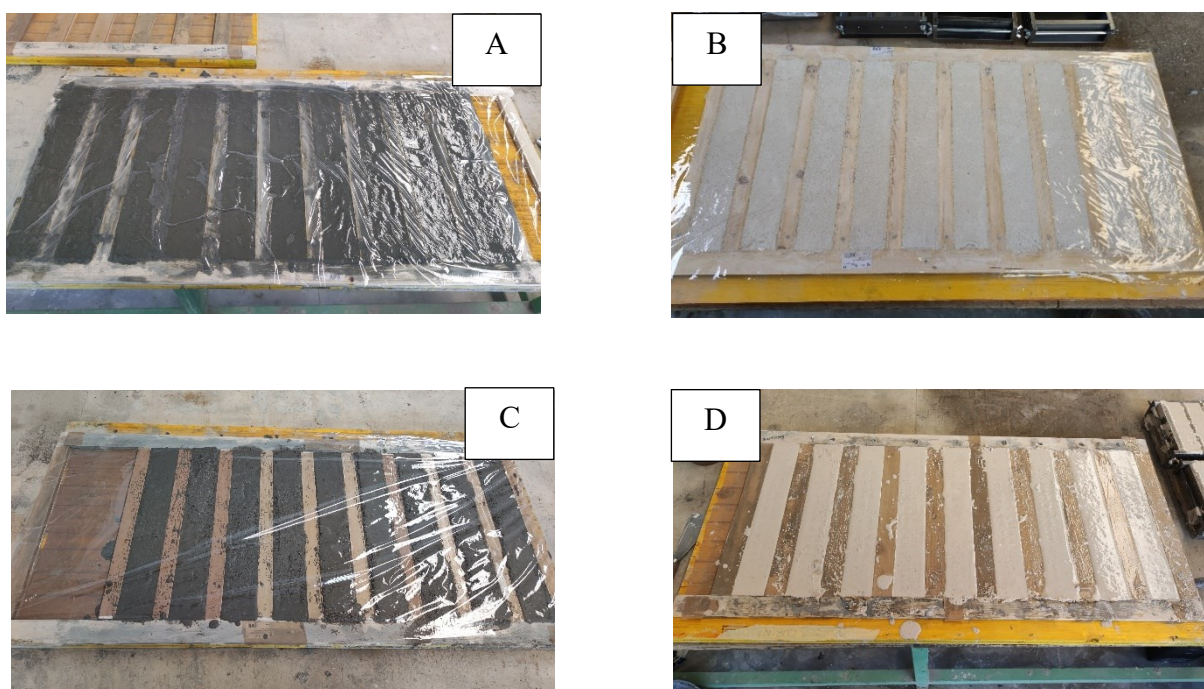


Fig. 30:

- (A) Provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ in geolite 40 (CEM);*
- (B) Provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ in geocalce multiuso (CAL);*
- (C) Provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ in cenere volante e cemento alluminoso (FAK);*
- (D) Provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ in metacaolino (MKK).*

Quest'ultimi provini, però, hanno avuto un ulteriore passaggio: sono stati tagliati con una sega circolare (fig.31) per ottenere le stesse dimensioni dei provini $19 \times 44 \times 1 \text{ cm}^3$. Quindi da ogni provino di dimensione $38 \times 6 \times 1 \text{ cm}^3$ si sono ottenuti quattro elementi: due elementi di dimensioni $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ contenenti due yarn di fibra di basalto in direzione longitudinale e 2 elementi $19 \times 2 \times 1 \text{ cm}^3$ contenenti un solo yarn in direzione longitudinale (Fig. 32). Quest'ultimi verranno usati per future analisi al microscopio che non verranno trattate in questa tesi.



Fig. 31– Sega circolare per il taglio dei provini $38 \times 6 \times 1 \text{ cm}^3$.

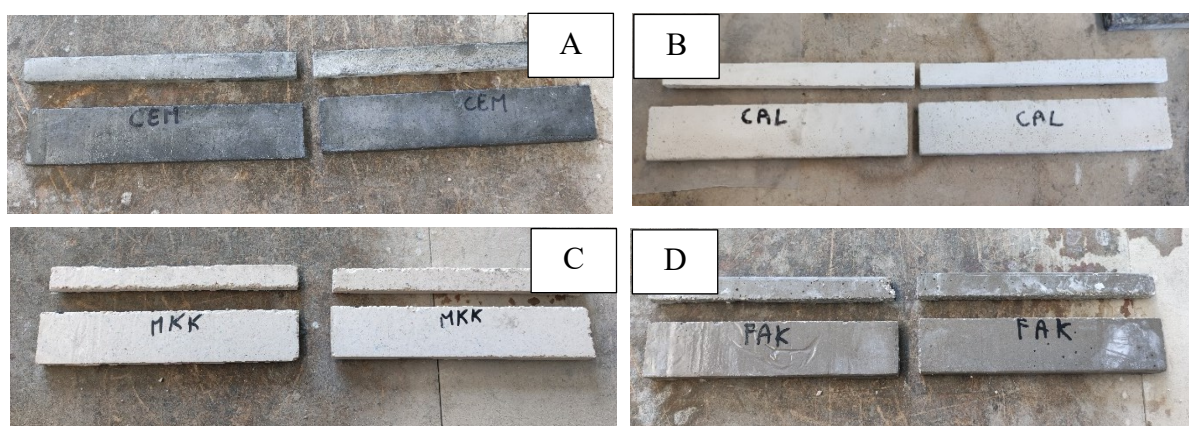


Fig.32:

- (A) Provini $38 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ in geolite 40 (CEM) dopo il taglio con sega circolare;*
- (B) Provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ in geocalce multiuso (CAL) dopo il taglio con sega circolare;*
- (C) Provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ in cenere volante e cemento alluminoso (FAK) dopo il taglio con sega circolare;*
- (D) Provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ in metacaolino (MKK) dopo il taglio con sega circolare.*

Infine, gli stessi procedimenti sono stati utilizzati per i provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ e $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ a cui però è stata aggiunta una termocoppia (Fig. 33 e 34). Sono stati fatti 4 provini (uno per ogni matrice per la casseratura $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$) e 12 provini (tre per ogni matrice per la casseratura $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$). Questo per monitorare il loro comportamento ai valori di temperatura del forno di 200°C , 400°C e 600°C .

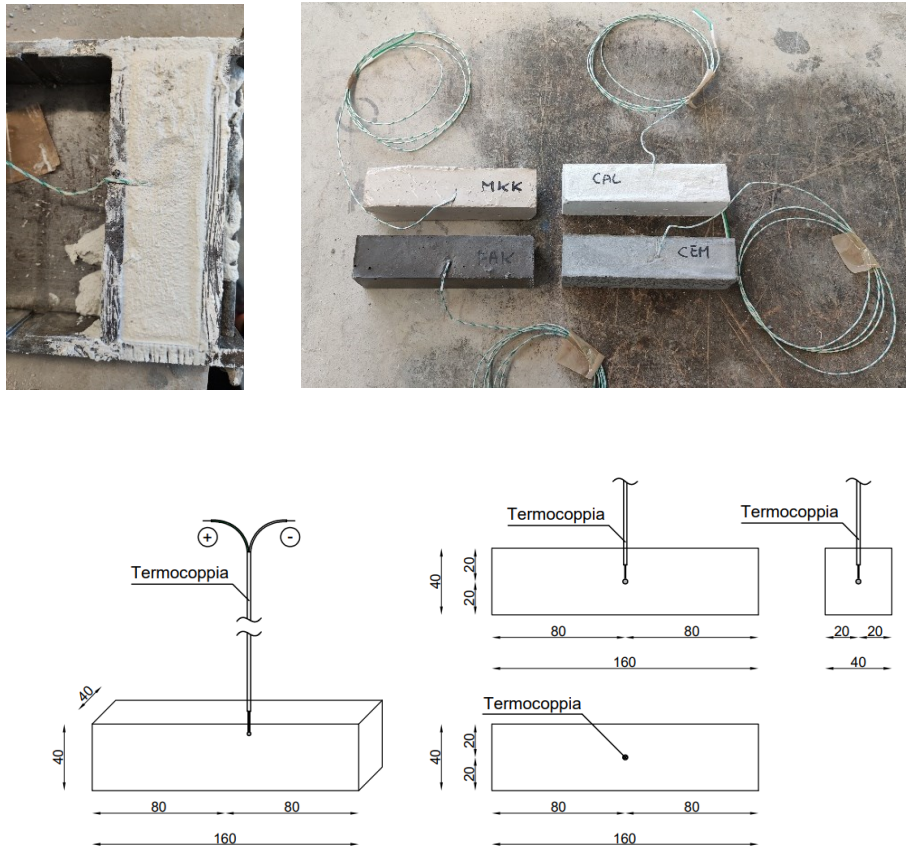


Fig.33– Provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ (in figura in mm^3) con termocoppia.

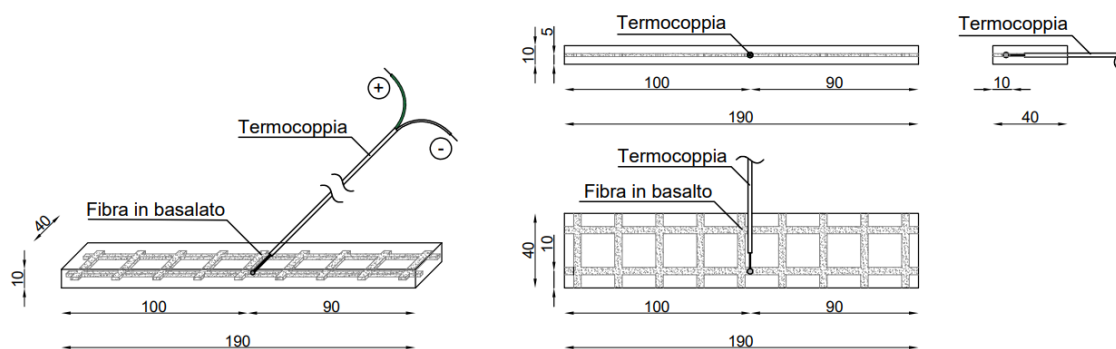
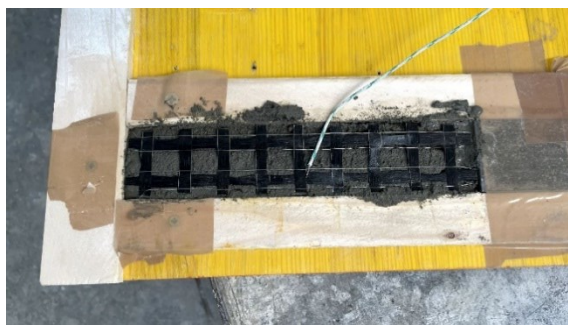


Fig. 34 Provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ (in figura in mm^3) con termocoppia.

Riassumendo:

Sono stati realizzati 8 provini per 4 matrici, in totale 32 provini di dimensioni $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$, da testare a flessione, compressione e sonda ultrasonica. Mentre, 12 provini per 4 matrici, ossia 48 provini di dimensione $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ contenenti fibra di rinforzo in basalto, da testare a trazione.

3. METODI DI PROVA

3.1 Esposizione ad alte temperature

Una volta finiti i 28 giorni di maturazione dei provini, sono stati esposti ad alte temperature: 200°C, 400°C e 600°C. L'esposizione ad alte temperature è avvenuto nel forno elettrico a muffola (Fig.35), programmando l'aumentare della temperatura a 10°C/min.

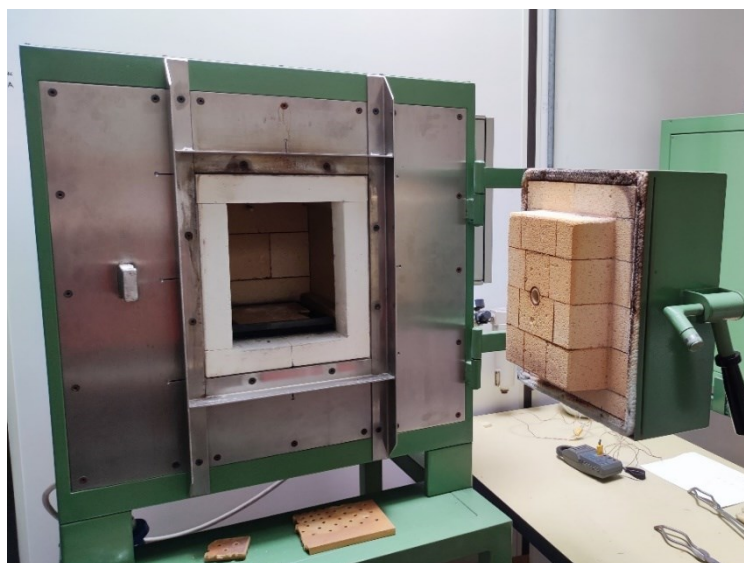


Fig. 35 – Forno elettrico a muffola usato nella sperimentazione.

I provini, dopo esser stati esposti ad alte temperature, sono stati testati a flessione, compressione e trazione. Per ogni cottura, sono stati inseriti nel forno 4 provini della stessa malta (2 16 x 4 x 4 cm³ e 2 19 x 4 x 1 cm³).

Per differenti temperature si è proceduto in vario modo:

- Temperatura ambiente: i provini non hanno subito alcun aumento di temperatura
- Temperatura di 200°C: i campioni sono stati messi all'interno del forno spento (Fig.37) e successivamente si è programmato il forno con un andamento della temperatura 10°C/min fino al raggiungimento di 200°C in 20 min. Il forno poi ha mantenuto 200°C per due ore.

Passate le due ore il forno si è spento e lasciato raffreddare con lo sportello chiuso e i campioni dentro fino a temperatura ambiente, solo allora sono stati ripresi i campioni.

- Temperatura di 400°C: medesimo procedimento dei 200°C ma la temperatura target è stata raggiunta a 40 min.
- Temperatura di 600°C: analogo a 200°C e 400°C ma la temperatura target è stata raggiunta dopo 1 ora.



Fig. 36 – Disposizione dei provini in forno per la cottura a 200°C (medesima disposizione per le cotture a 400°C e 600°C).

Durante la cottura, abbiamo monitorato la temperatura dei provini attraverso le termocoppie di tipo K immerse all'interno della matrice. I dati sono stati raccolti tramite l'utilizzo di un registratore a cui sono state collegate le termocoppie (Fig.38).



*Fig. 37– Registratore di dati a sinistra;
Esempio di collegamento di due termocoppie a destra.*

Avremmo a fine cottura:

- 2 campioni $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ per ogni temperatura.
- 3 campioni $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ per ogni matrice e per ogni temperatura.
- 1 Campione $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ con termocoppia di tipo K per ogni matrice testato a 200°C , 400°C , 600°C .
- 1 campione $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ con termocoppia di tipo K per ogni matrice testato a 200°C , 400°C e 600°C .

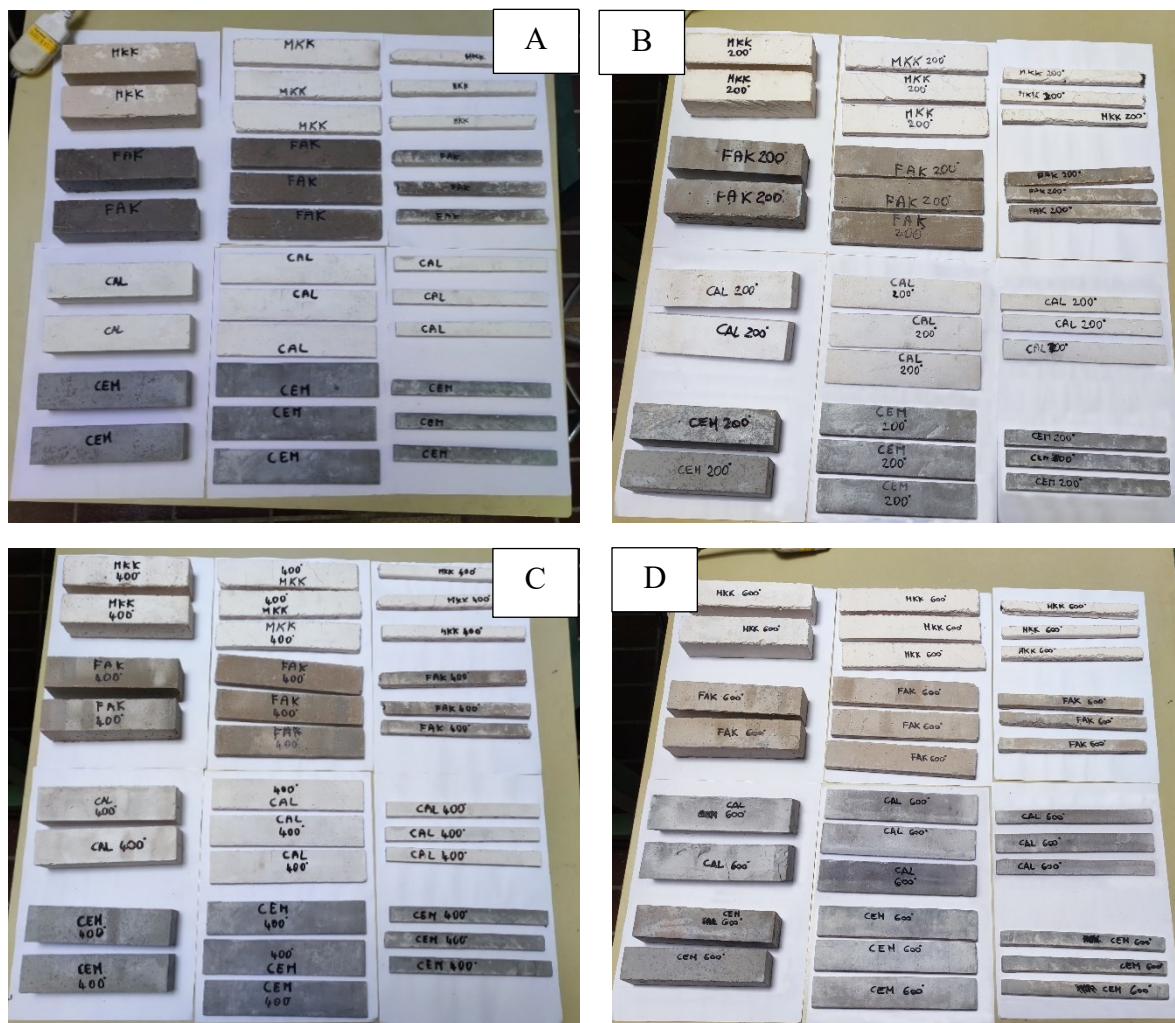


*Fig. 38– Campioni alle varie temperature studiate:
 (A) Campioni a temperatura ambiente;
 (B) Dopo il trattamento termico a 200°C;
 (C) Dopo il trattamento termico a 400°C;
 (D) Dopo il trattamento termico a 600°C*

I provini posti in (Fig.39) nel lato destro sono le restanti parti dei provini tagliati in precedenza, ma per la nostra prova non sono stati utilizzati. Sono stati cotti per esser osservati in laboratorio per un altro tipo di sperimentazione.

3.2 Prova Ultrasonica

Dopo la maturazione dei provini a 28 giorni e il trattamento termico, tutti i provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$, sono stati sottoposti alla prova ultrasonica per determinare il modulo elastico dinamico.

Lo strumento è composto da due sonde, una che emette l'onda ultrasonica e l'altra che la riceve proiettando il segnale al lettore dati. La prova consiste nel:

- Mettere del grasso nelle facce dei trasduttori e del provino da tarate, per avere un contatto migliore
- Tarare lo strumento a $25 \mu\text{s}$ (Fig.40) tramite un cilindro centrale con funzione di calibro
- Testare tutti i provini e inserire i dati in una tabella Excel.



Fig. 39– Calibrazione dello strumento e misura delle onde ultrasoniche su un provino $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$.

Per tale prova si sfrutta il modulo elastico dinamico E_d del materiale e la velocità V con la quale le onde ultrasoniche, applicate una frequenza di 50Hz, lo attraversano.

La velocità V è stata ricavata dividendo la lunghezza del percorso compiuto dalle onde ultrasoniche, in questo caso 16 cm, per il tempo impiegato misurato dallo strumento in μs .

La massa volumica ρ è stata valutata dividendo il peso P di ogni provino per il proprio volume apparente (256 cm^3).

$$V = k * \sqrt{\frac{E_d}{\rho}} \quad \text{con} \quad k = \sqrt{\frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu) * (1 - 2\nu)}}$$

- V è la velocità delle onde espressa in m/s
- E_d indica il modulo di elasticità dinamico in N/m^2 ;
- ρ è la massa volumica del materiale espressa in kg/m^3 ;
- ν è il modulo di Poisson supposto pari a 0,30 per tutti i provini;
- k è una costante dipendente dal modulo di Poisson ν , supposto pari a 0,30 per tutti i provini.

3.3 Prova a flessione

La prova viene effettuata in una cella di carico collegata ad una centralina di acquisizione e rielaborazione dei dati provenienti dalla macchina di prova che ci ha permesso di ottenere i valori relativi alle forze esercitate. La forza è stata poi trasformata in una tensione. Il valore della resistenza a flessione del singolo provino si calcola con la seguente formula:

$$6f = \frac{3 F l}{2 b h^2}$$

Dove:

- σ_f è la resistenza a flessione in MPa;
- F è il valore del carico massimo applicato in N;
- l indica la distanza tra gli assi dei supporti, pari a 100 mm nel caso specifico;
- b è il lato della sezione quadrata del provino in mm, nel nostro caso 40 mm;
- h indica l'altezza del provino che nel nostro caso è uguale a b .



*Fig. 40– Macchina di compressione Galbadini usata nella sperimentazione a sinistra;
Setup di prova a flessione a destra prima e dopo la rottura*

3.4 Prova a compressione

I due spezzoni ricavati dalla prova a flessione sono stati sottoposti alla prova di compressione semplice. La resistenza a compressione è stata determinata secondo la formula:

$$\sigma_c = \frac{F}{A}$$

Dove:

- σ_c è la resistenza di compressione in MPa
- F è la forza di compressione in N
- A è la superficie di applicazione della forza F in mm^2 , in questo caso pari a 40 mm^2 .



Fig.41 – Setup di prova a compressione.

3.5 Prova di trazione (Tensile Test)

La prova di trazione viene effettuata sui provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$, ossia nei provini composti da matrice e rete rinforzante in basalto. Prima di effettuare la prova, nelle estremità dei provini sono state incollate, su entrambi i lati, delle resine in fibra di vetro tramite una resina biocomponente. Queste fasce sono state tagliate con le stesse dimensioni di larghezza del provino (Fig. 43 e 44).



Fig. 42 – Resina Bicomponente e fibra di vetro usata nella sperimentazione.



Fig. 43 – Esempio dei provini con estremità in fibra di vetro.

Il provino è stato fissato sulle due estremità alle ganasce del macchinario, mentre nella zona centrale rimane scoperto. La prova consiste nel sottoporre un provino ad uno sforzo continuo crescente fino alla rottura, con una velocità di spostamento di 1,5 mm/min. La tipologia di configurazione utilizzata è a cerniera (clevis grip), in questo modo il carico a trazione viene trasferito ai provini solo attraverso sforzi di taglio, evitando di applicare forze normali alle estremità dei provini stessi. In figura (Fig. 48) è riportato il setup di prova.

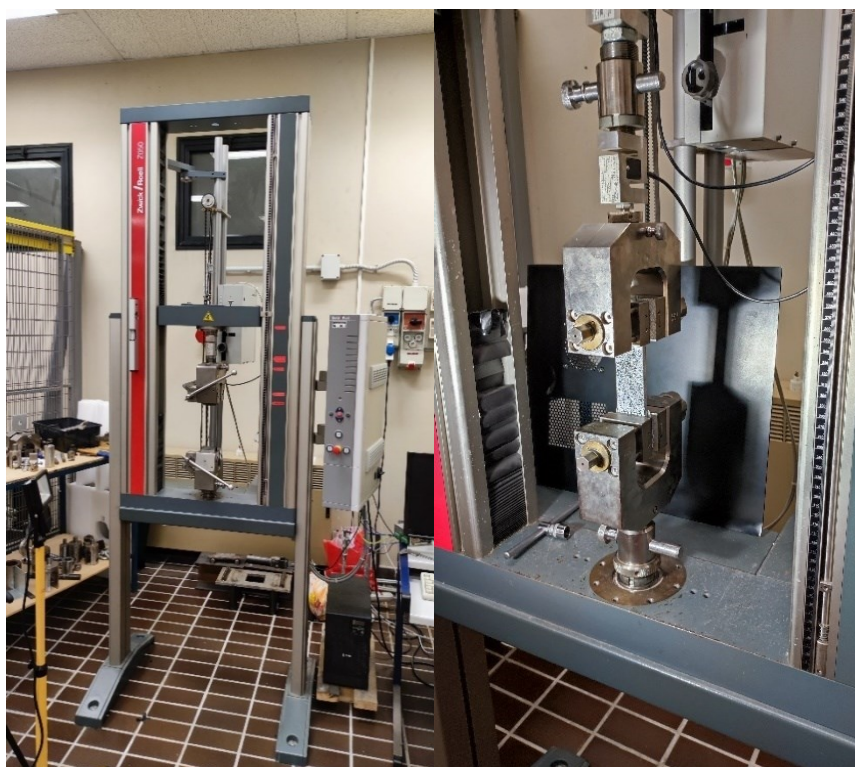


Fig. 44 – Setup di prova a trazione eseguito con la macchina Zwick/Roell Z050

Il macchinario è collegato ad un computer con un programma in grado di registrare tutti i valori che si ottengono. Una volta che visivamente si è ottenuta sia la rottura del provino, ma anche una netta scala decrescente di tensione, si stoppa manualmente il macchinario. Durante l'allungamento nella zona centrale si formano delle fratture, le quali forniscono indicazioni sulle proprietà tecnologiche del materiale.

Per la costruzione dei grafici sforzo - deformazione rappresentativi del comportamento dei provini 19x4x1 cm² è necessario eseguire la rielaborazione dei dati restituiti dal macchinario di prova. Lo sforzo di trazione è stato calcolato mediante la formula:

$$\sigma_t = \frac{F}{A} = \frac{F}{2 A_y}$$

Dove:

- σ_t è la resistenza di trazione in Mpa
- F è la forza di trazione in N
- A è l'area della sezione trasversale della rete di rinforzo in mm², nel nostro caso abbiamo 2 fili di rinforzo in direzione longitudinale (2 A_y)
- A_y è l'area nominale del singolo filo di rinforzo in mm² pari a 1.33 mm² come calcolato al Paragrafo 2.3 “Rete di rinforzo in basalto”

Per calcolare la deformazione invece abbiamo usato la formula:

$$\epsilon_t = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

Dove:

- ϵ_t è la deformazione di trazione adimensionale mm/mm
- l₀ è la lunghezza iniziale del provino in mm, nel caso specifico pari a 190 mm
- l è la lunghezza finale del provino in mm dopo lo svolgimento della prova
- Δl è l'allungamento del provino in mm dopo lo svolgimento della prova.

Quindi, calcolato lo sforzo e la deformazione è stato possibile costruire i grafici delle varie prove effettuate.

4. RISULTATI E OSSERVAZIONI

A seguito delle prove eseguite precedentemente, i dati ottenuti sono stati elaborati e raggruppati in tabelle e grafici, per avere una lettura più chiara e immediata della differenza fra le varie malte, temperature e provini. Una volta ottenuti i risultati, si è cercato di dare una considerazione finale sul lavoro svolto e sulle caratteristiche dei materiali.

4.1 Monitoraggio in forno elettrico a muffola

Il monitoraggio in forno non è stato del tutto soddisfacente come prova. Per quanto riguarda la prova a 600°C e 400°C, i valori ricavati sono prossimi a quelli del forno il ciò significa che la temperatura recepita era quella dell'ambiente all'interno del forno e non del provino stesso al suo interno. Inoltre, a queste temperature, la termocoppia ha avuto una reazione di combustione del rivestimento che ha portato alla formazione di fumi. Differente invece è stato il monitoraggio del comportamento dei provini a 200°C, il quale non ha riscontrato problemi. Di seguito sono riportati i test svolti e i dati raccolti (Tab.11-12, Fig.49-50):

Provini con termocoppia	Materiale	Target 200°C	Target 400°C	Target 600°C
		T massima raggiunta [°C]	T massima raggiunta [°C]	T massima raggiunta [°C]
16 x 4 x4	CEM	149.56	435.13	635.25
	CAL	125.95	424.03	635.64
	FAK	142.61	421.23	625.38
	MKK	112.47	420.65	628.67
Termocoppia libera per monitorare il forno		219.37	418.82	614.49

Tab. 8– Temperature massime raggiunte dai diversi provini 16 x 4 x 4 cm³ con termocoppia che hanno ricevuto il trattamento a tutte le temperature.

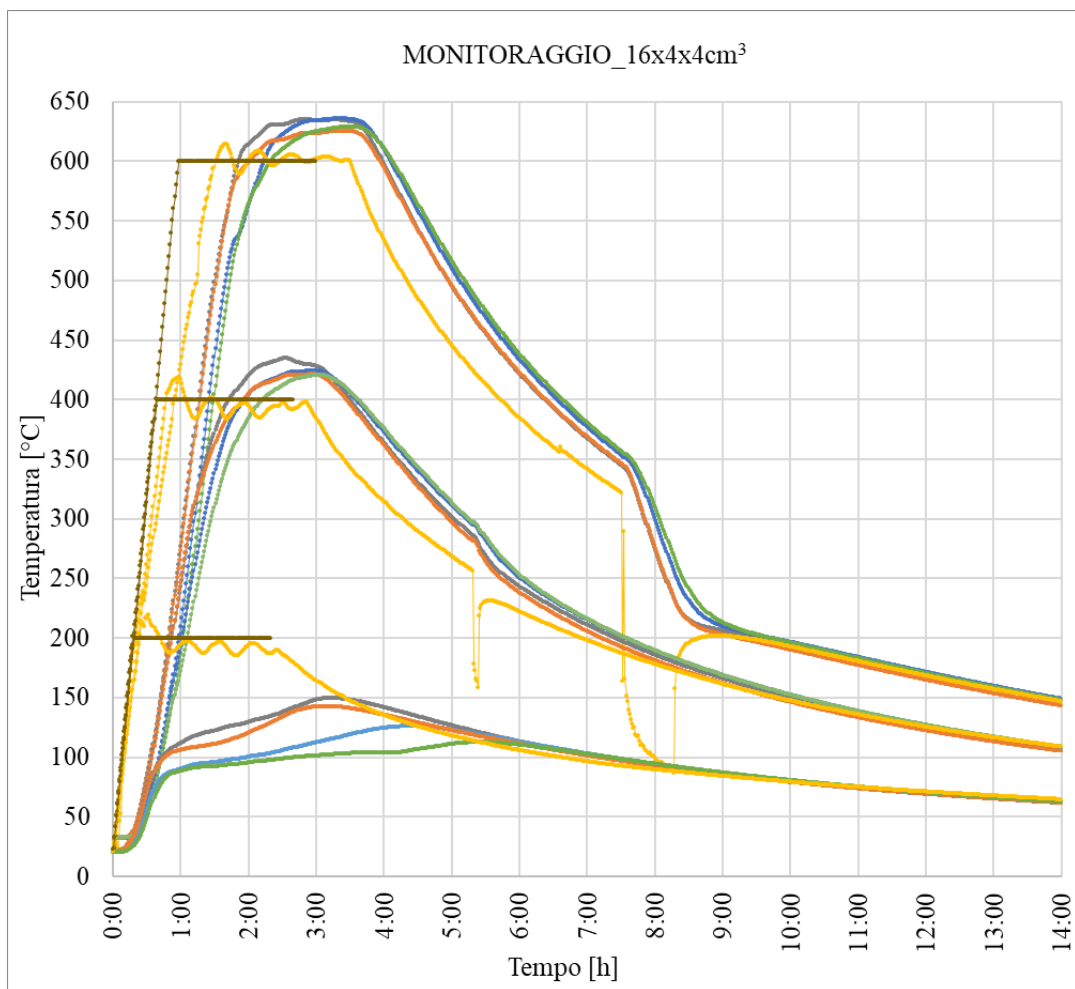


Fig. 45– Curve di riscaldamento dei provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ con termocoppia che hanno ricevuto il trattamento termico a tutte le temperature, curva di riscaldamento del forno e rampa di riscaldamento assegnata.

Provini con termocoppia	Materiale	Target 200°C	Target 400°C	Target 600°C
		T massima raggiunta [°C]	T massima raggiunta [°C]	T massima raggiunta [°C]
19 x 4 x 1	CEM	150.53	428.32	-
	CAL	139.87	435.09	633.06
	FAK	141.47	411.45	624.79
	MKK	139.02	382.79	606.10
Termocoppia libera per monitorare il forno		219.37	419.77	611.66

Tab. 9 - Temperature massime raggiunte dai diversi provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ con termocoppia che hanno ricevuto il trattamento a 200°C, 400°C e 600°C.

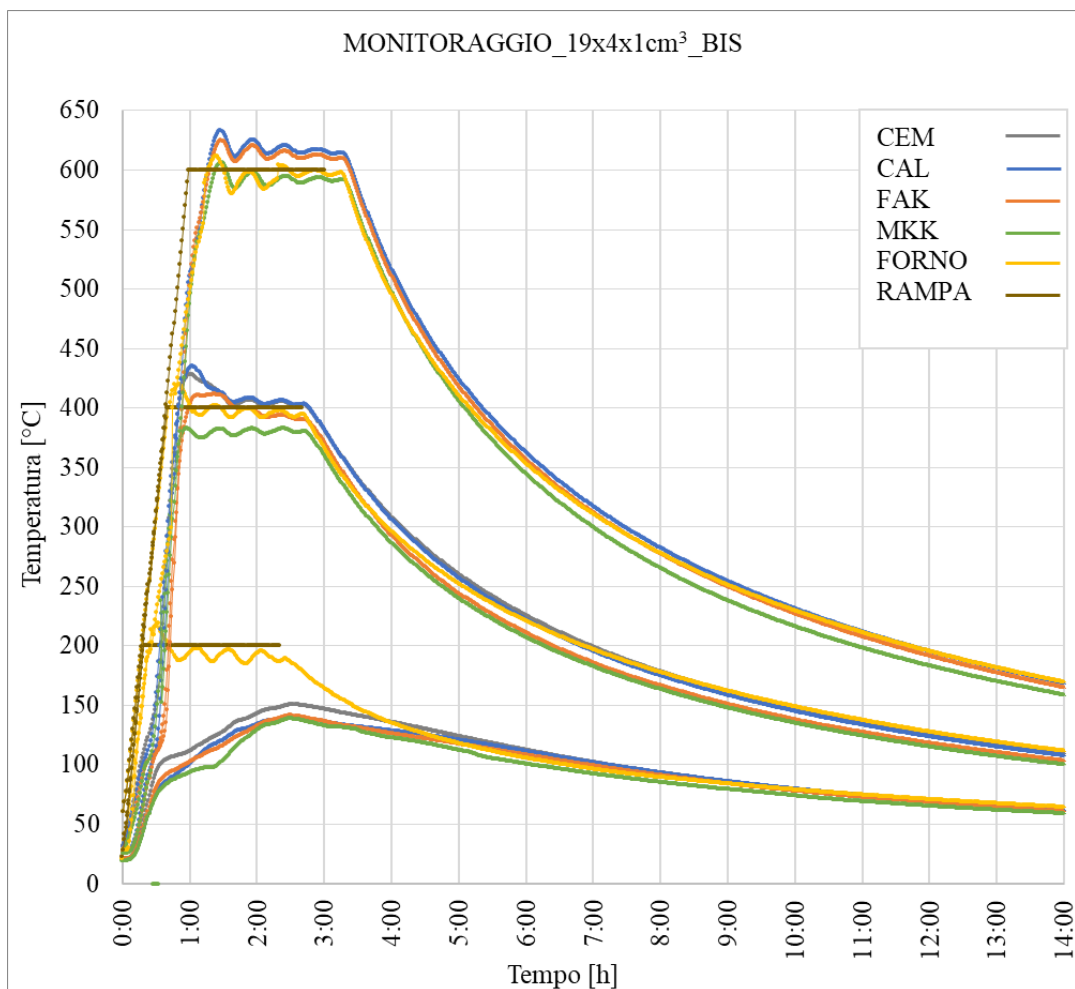


Fig. 46- Curve di riscaldamento dei provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ con termocoppia che hanno ricevuto il trattamento a 200°C – 400°C – 600°C , curva di riscaldamento del forno e rampa di riscaldamento assegnata.

Dalla rappresentazione grafica e dai valori in tabella, è possibile notare come i valori, una volta raggiunta la temperatura target, oscillino di $\pm 20^\circ\text{C}$ e che la rampa del forno non è stata rispettata. L'unica che ha meno oscillazioni e si può considerare più veritiera è la rampa dei 200°C . In quest'ultima rampa si può notare come il CEM e il CAL hanno temperature più elevate rispetto al FAK e MKK, quindi le matrici geopolimeriche sembrano essere più isolanti rispetto quelle commerciali. Inoltre, tutte le curve stanno al di sotto della temperatura target, rispetto invece alle curve dei 400°C e 600°C che raggiungono temperature più elevate del target.

I provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$, che hanno ricevuto tutti i trattamenti termici, risentono meno delle oscillazioni di temperatura del forno perché sono stati già fessurati, mentre i provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ seguono maggiormente le variazioni del forno. Questo sicuramente fa dedurre che la differenza di spessore influisce con la temperatura e lo si può notare confrontando un unico materiale (come il CEM) con due provini di dimensioni differenti.

In generale il materiale che ha raggiunto la temperatura più alta è quello a base geolite (CEM).

4.2 Modulo elastico dinamico

I dati ottenuti tramite la prova ultrasonica (Tab. 13) sono riferiti ad un periodo di stagionatura di almeno 28 giorni dei provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ e ciascun valore del modulo elastico dinamico è stato ricavato mediando i risultati ottenuti da una serie di due provini. Nelle tabelle seguenti sono mostrati i valori del modulo elastico dinamico con riferimento alle diverse temperature e malte testate. Per completezza vengono riportati anche i valori di peso, massa volumica, tempo di percorrenza e velocità delle onde ultrasoniche.

Temp.	Materiale	A/B	Peso P [g]	Massa Volumica ρ [kg/m ³]	Tempo di percorrenza tp [μ s]	Velocità V [m/s]	Modulo Dinamico Ed [GPa]	Modulo Dinamico Medio Edm [GPa]
Ambiente	CEM	A	521.17	2035.82	39.40	4060.91	24.94	24.88
		B	521.39	2036.68	39.50	4050.63	24.82	
	CAL	A	438.15	1711.52	57.30	2792.32	9.91	10.07
		B	436.04	1703.28	56.30	2841.92	10.22	
	FAK	A	592.67	2315.12	37.20	4301.08	31.82	32.01
		B	584.01	2281.29	36.70	4359.67	32.21	
	MKK	A	524.16	2047.50	78.60	2035.62	6.30	5.31
		B	510.22	1993.05	93.60	1709.40	4.33	
200 °C	CEM	A	473.35	1849.02	48.30	3312.63	15.07	15.45
		B	472.91	1847.30	47.10	3397.03	15.84	
	CAL	A	391.23	1528.24	69.30	2308.80	6.05	6.35
		B	394.45	1540.82	66.40	2409.64	6.65	
	FAK	A	557.70	2178.52	43.80	3652.97	21.60	19.35
		B	562.23	2196.21	49.40	3238.87	17.11	
	MKK	A	417.75	1631.84	89.10	1795.74	3.91	4.67
		B	429.99	1679.65	76.70	2086.05	5.43	
400 °C	CEM	A	448.17	1750.66	60.10	2662.23	9.22	9.46
		B	440.72	1721.56	58.10	2753.87	9.70	
	CAL	A	386.30	1508.98	80.00	2000.00	4.48	4.53
		B	391.89	1530.82	79.80	2005.01	4.57	
	FAK	A	555.91	2171.52	65.60	2439.02	9.60	8.26
		B	556.36	2173.28	77.30	2069.86	6.92	
	MKK	A	397.29	1551.91	106.50	1502.35	2.60	2.51
		B	405.32	1583.28	111.40	1436.27	2.43	
600 °C	CEM	A	444.62	1736.80	84.50	1893.49	4.63	4.43
		B	444.13	1734.88	88.30	1812.00	4.23	
	CAL	A	381.38	1489.77	128.70	1243.20	1.71	1.79
		B	381.47	1490.12	123.40	1296.60	1.86	
	FAK	A	534.97	2089.73	93.60	1709.40	4.54	5.00
		B	515.93	2015.35	83.80	1909.31	5.46	
	MKK	A	400.90	1566.02	121.30	1319.04	2.02	1.64
		B	398.13	1555.20	153.40	1043.02	1.26	

Tab. 10– Dati ottenuti e rielaborati da prova ultrasonica per provini 16 x 4 x 4 cm³ per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori temperatura.

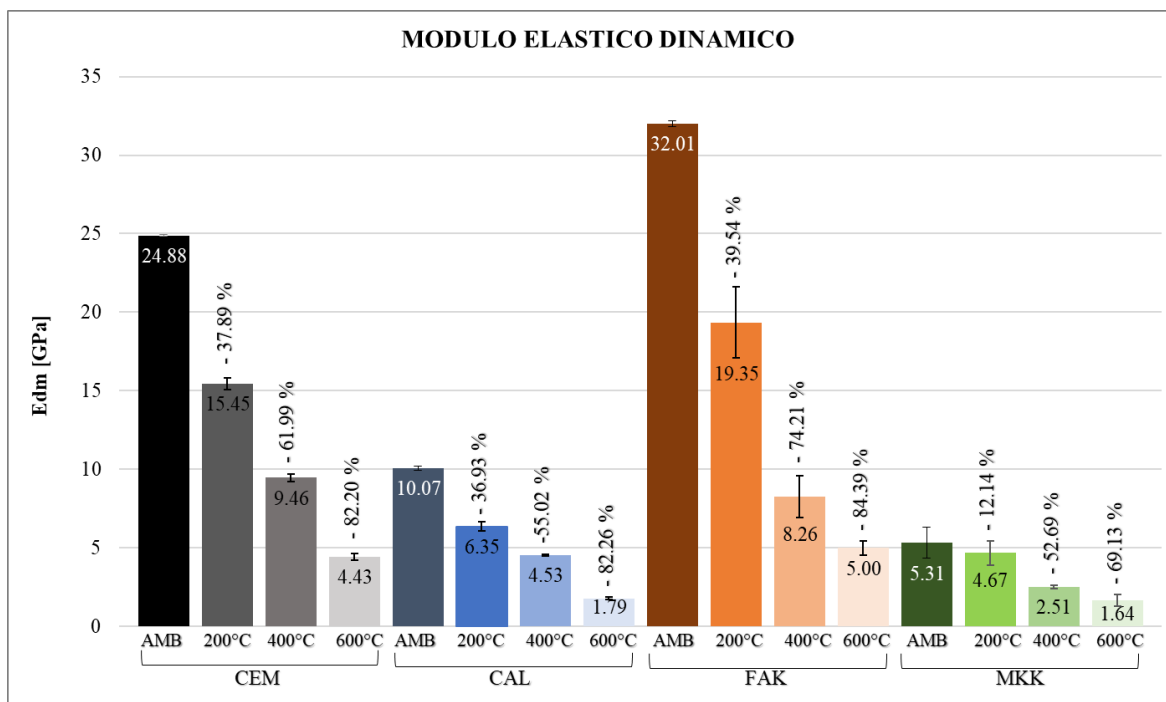


Fig. 47– Istogramma con moduli elastici dinamici medi per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura, compresi di barre di errore e percentuale di decremento.

Si può notare dal grafico come il FAK e il CEM abbiano un modulo elastico dinamico più elevato. A differenza del CAL e MKK che hanno valori di modulo elastico dinamico minori a tutte le temperature. I risultati ottenuti sono sicuramente coerenti con le tipologie di malte, moduli maggiori per malte più performanti e moduli minori per quelle meno performanti.

4.3 Resistenza a flessione

La prova a flessione è stata eseguita sui provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ dopo un periodo di stagionatura di 28 giorni e dopo esser stati sottoposti a differenti temperature. Di seguito vengono riportate in tabella (per ogni matrice e ogni temperatura): la forza di flessione massima, la conseguente tensione di flessione e la tensione di flessione mediata su due provini di stesso materiale, la deviazione standard riferita alla tensione e il coefficiente di variazione.

Temp.	Materiale	A/B	Forza Massima $F_{f,max}$ [kN]	Tensione Massima $\sigma_{f,max}$ [MPa]	Tensione Massima Media $\sigma_{f,max,m}$ [MPa]	Deviazione standard Dev.st. [MPa]	Coefficiente di variazione CV [%]
Ambiente	CEM	A: B:	4.40 4.57	10.31 10.71	10.51	0.29	2.72
	CAL	A: B:	1.61 1.65	3.78 3.86	3.82	0.05	1.38
	FAK	A: B:	5.01 4.82	11.73 11.29	11.51	0.31	2.71
	MKK	A: B:	0.81 0.70	1.90 1.65	1.78	0.18	10.16
200°C	CEM	A: B:	4.60 3.79	10.77 8.89	9.83	1.33	13.57
	CAL	A: B:	1.50 2.08	3.52 4.88	4.20	0.97	23.04
	FAK	A: B:	3.11 1.88	7.28 4.40	5.84	2.04	34.95
	MKK	A: B:	1.32 0.74	3.10 1.74	2.42	0.97	39.90
400°C	CEM	A: B:	1.76 2.05	4.11 4.82	4.46	0.50	11.11
	CAL	A: B:	1.28 1.22	3.01 2.85	2.93	0.11	3.72
	FAK	A: B:	1.50 1.05	3.52 2.46	2.99	0.75	25.11
	MKK	A: B:	0.45 0.54	1.05 1.25	1.15	0.14	12.22
600°C	CEM	A: B:	1.17 1.02	2.75 2.38	2.57	0.26	10.25
	CAL	A: B:	0.14 0.12	0.33 0.28	0.30	0.03	10.88
	FAK	A: B:	0.84 0.98	1.98 2.30	2.14	0.23	10.72
	MKK	A: B:	0.40 0.39	0.94 0.91	0.93	0.02	1.79

Tab. 11– Dati ottenuti e rielaborati da prova di flessione per provini 16 x 4 x 4 cm³ per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura.

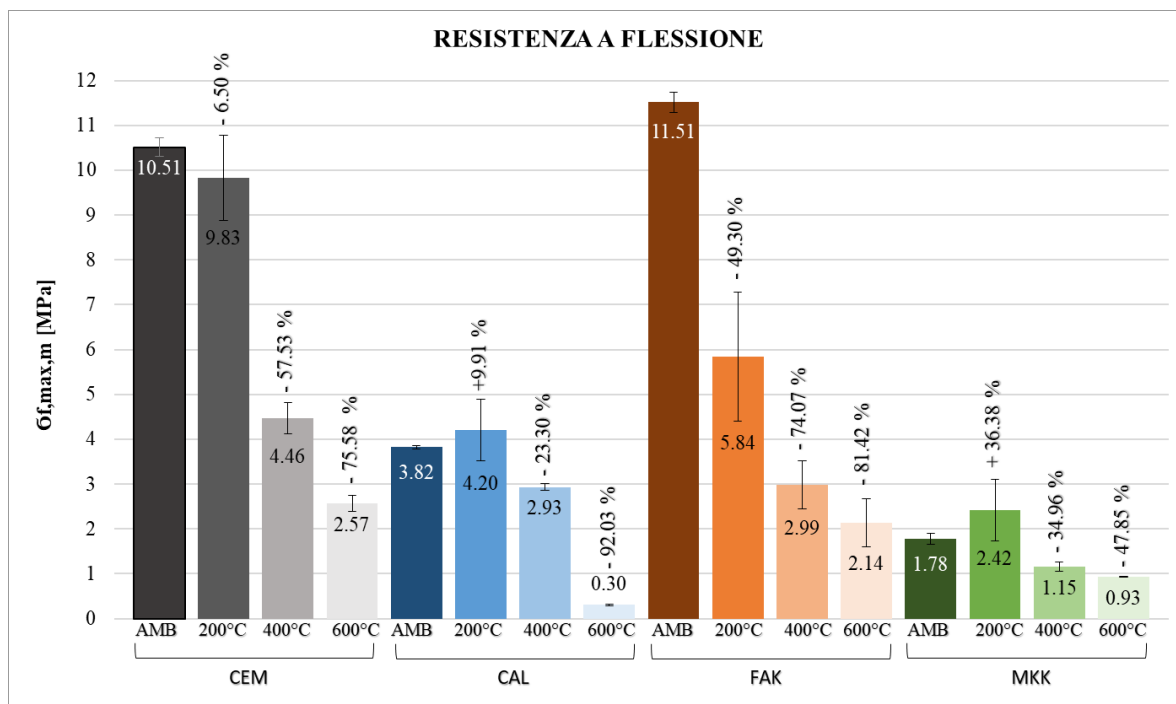


Fig. 48- Istogramma con valori di resistenza a flessione massima media per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura,



Fig. 49 – Provini dopo l'esecuzione della prova di flessione.

Osservando il grafico (Fig.52) sicuramente si può notare come il FAK e il CEM siano molto più resistenti a flessione del MKK e del CAL. Dato da tener in considerazione è il declino della

resistenza del FAK dopo esser stato sottoposto alle alte temperature, a differenza del CEM che a 200°C resiste ancora bene a flessione.

Per quanto riguarda invece il CAL e MKK, dopo l'esposizione ai 200°C, hanno una resistenza a flessione maggiore di quelli a temperatura ambiente e di quelli sottoposti a 400°C e 600°C.

Anche per la prova a flessione abbiamo dati coerenti, infatti abbiamo valori maggiori per il CEM e il FAK, a base di geolite e cenere volante / cemento alluminoso, e valori minori per il CAL e MKK, a base di geocalce e metacaolino.

4.4 Resistenza a compressione

Le prove a compressione, svolte sugli spezzoni ottenuti dalla prova a flessione, hanno dato differenti valori e sono stati riportati nella tabella che segue (Tab.15) e nella (Fig. 54). Anche qui abbiamo differenti malte sottoposte a differenti trattamenti termici, riportando come valori: la forza di flessione massima, la conseguente tensione di flessione e la tensione di flessione mediata su due provini di stesso materiale, la deviazione standard riferita alla tensione e il coefficiente di variazione.

Temp.	Materiale	A/B 1/2	Forza Massima $F_{c,max}$ [kN]	Tensione Massima $\sigma_{c,max}$ [MPa]	Tensione Massima Media $\sigma_{c,max,m}$ [MPa]	Deviazione Standard Dev.st. [MPa]	Coefficiente di Variazione CV [%]
Ambiente	CEM	A: 1:	91.28	57.05	56.64	3.84	6.79
		2:	98.69	61.68			
		B: 1:	84.03	52.52			
		2:	88.51	55.32			
	CAL	A: 1:	20.15	12.59	12.15	0.77	6.36
		2:	19.23	12.02			
		B: 1:	20.59	12.87			
		2:	17.79	11.12			
	FAK	A: 1:	90.10	56.31	52.64	3.40	6.46
		2:	87.06	54.41			
		B: 1:	77.83	48.64			
		2:	81.90	51.18			
	MKK	A: 1:	13.23	8.27	8.60	0.30	3.55
		2:	13.46	8.41			
		B: 1:	14.13	8.83			
		2:	14.21	8.88			

Temp.	Materiale	A/B 1/2	Forza Massima $F_{c,max}$ [kN]	Tensione Massima $\sigma_{c,max}$ [MPa]	Tensione Massima Media $\sigma_{c,max,m}$ [MPa]	Deviazione Standard Dev.st. [MPa]	Coefficiente di Variazione CV [%]
200°C	CEM	A: 1:	66.05	41.28	42.29	1.46	3.46
		2:	66.12	41.33			
		B: 1:	67.43	42.14			
		2:	71.04	44.40			
	CAL	A: 1:	17.16	10.73	10.91	0.44	4.00
		2:	17.17	10.73			
		B: 1:	18.49	11.56			
		2:	16.99	10.62			
	FAK	A: 1:	112.38	70.24	67.55	6.88	10.18
		2:	120.73	75.45			
		B: 1:	95.07	59.42			
		2:	104.17	65.10			
400°C	CEM	A: 1:	49.93	31.21	31.20	0.67	2.15
		2:	51.43	32.14			
		B: 1:	49.11	30.69			
		2:	49.19	30.75			
	CAL	A: 1:	11.72	7.33	8.17	0.58	7.05
		2:	13.36	8.35			
		B: 1:	13.42	8.39			
		2:	13.80	8.62			
	FAK	A: 1:	54.10	33.81	29.92	3.74	12.51
		2:	51.64	32.28			
		B: 1:	44.45	27.78			
		2:	41.31	25.82			
	MKK	A: 1:	14.06	8.79	8.35	0.31	3.75
		2:	13.33	8.33			
		B: 1:	13.16	8.22			
		2:	12.89	8.06			
600°C	CEM	A: 1:	30.80	19.25	19.47	2.17	11.12
		2:	36.15	22.59			
		B: 1:	29.10	18.19			
		2:	28.55	17.84			
	CAL	A: 1:	5.54	3.46	2.72	0.56	20.54
		2:	3.99	2.49			
		B: 1:	3.43	2.14			
		2:	4.47	2.79			
	FAK	A: 1:	33.48	20.93	23.37	2.46	10.52
		2:	35.56	22.22			
		B: 1:	42.64	26.65			
		2:	37.90	23.69			
	MKK	A: 1:	13.83	8.64	7.78	0.75	9.68
		2:	13.06	8.16			
		B: 1:	11.73	7.33			
		2:	11.20	7.00			

Tab. 12- Dati ottenuti e rielaborati da prova di compressione per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura.

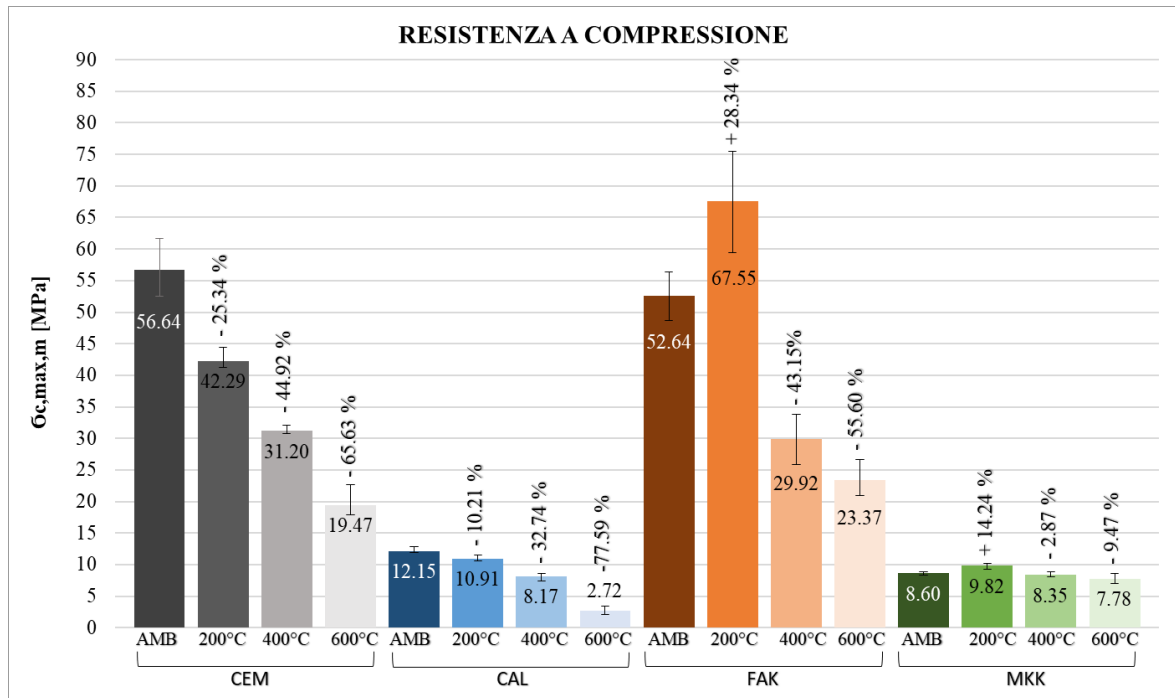


Fig. 50 - Istogramma con valori di resistenza a compressione massima media per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura.

Dai dati in (Fig.54), notiamo che il CEM e FAK hanno valori più alti rispetto al CAL e MKK. Inoltre, sia il FAK che MKK dopo l'esposizione a 200°C, restituiscono una resistenza a compressione maggiore rispetto gli altri provini esposti ad altre temperature.

Il FAK e il CEM li possiamo confrontare, non considerando però il trattamento a 200°C, mentre il CAL e MKK li possiamo confrontare notando che hanno una resistenza inferiore a temperatura ambiente rispetto al trattamento dei 200°C.

Possiamo dire che le matrici geopolimeriche a base di cenere volante / cemento alluminoso e metacaolino resistono maggiormente a compressione dopo l'avvenuta esposizione alle alte temperature rispetto alle matrici commerciali a base geolite e geocalce. Questo probabilmente è dovuto al processo di geopolimerizzazione che viene favorito dalla temperatura elevata.

4.5 Resistenza a trazione (Tensile-Test)

La prova a trazione è stata eseguita sui provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$, precedentemente esposti a differenti temperature. Nella tabella che segue (Tab. 16-19) e i grafici (Fig.55-59), sono riportati i valori raccolti durante la prova. In dettaglio vengono riportati i valori di forza di trazione massima e relativo spostamento, tensione massima e relativa deformazione, il modulo elastico secante relativo alla tensione massima e deformazione, modulo secante e tensione massima media, deviazione standard e coefficiente di variazione relativa alla tensione. I dati in rosso non sono stati tenuti in conto durante la rielaborazione, questi sono dati ottenuti da prove che hanno registrato anomalie o difficoltà di esecuzione, per cui avremo dati mediati su 2 o 3 provini. I grafici tensione – deformazione di CEM - FAK e CAL - MKK sono stati accoppiati per un miglior confronto e per una miglior sintesi di lettura.

Temp.	Mat.	n	Forza Massima F_t [N]	Spost. S_{ft} [mm]	Tensione Massima σ_{tu} [MPa]	Def. $\epsilon_{\sigma_{tu}}$ [mm/mm]	Modulo Secante E_{sec} [GPa]	Modulo Sec. Medio $E_{sec,m}$ [GPa]	Tensione Max Media $\sigma_{t,m}$ [MPa]	Dev.St. [MPa]	Coeff. di Variazione CV [%]
Ambiente	CEM	1:	2317.70	2.53	871.32	0.0133	65.54	61.34	604.39	80.81	13.37
		2:	1455.68	1.40	547.25	0.0074	74.17				
		3:	1759.67	2.59	661.53	0.0136	48.52				
	CAL	1:	1093.67	1.42	411.16	0.0075	55.04	39.59	411.59	0.62	0.15
		2:	824.02	0.96	309.78	0.0050	61.55				
		3:	1096.00	3.24	412.03	0.0171	24.13				
	FAK	1:	1070.90	2.55	402.59	0.0134	29.99	30.73	390.38	11.36	2.91
		2:	1033.18	2.03	388.41	0.0107	36.32				
		3:	1011.18	2.79	380.14	0.0147	25.89				
	MKK	1:	529.28	1.60	198.98	0.0084	23.67	26.21	202.15	8.66	4.28
		2:	520.08	1.51	195.52	0.0080	24.54				
		3:	563.76	1.32	211.94	0.0070	30.40				

Tab. 13- Dati ottenuti e rielaborati da prova di trazione per provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ per tutte le tipologie di materiale e valore di temperatura ambiente.

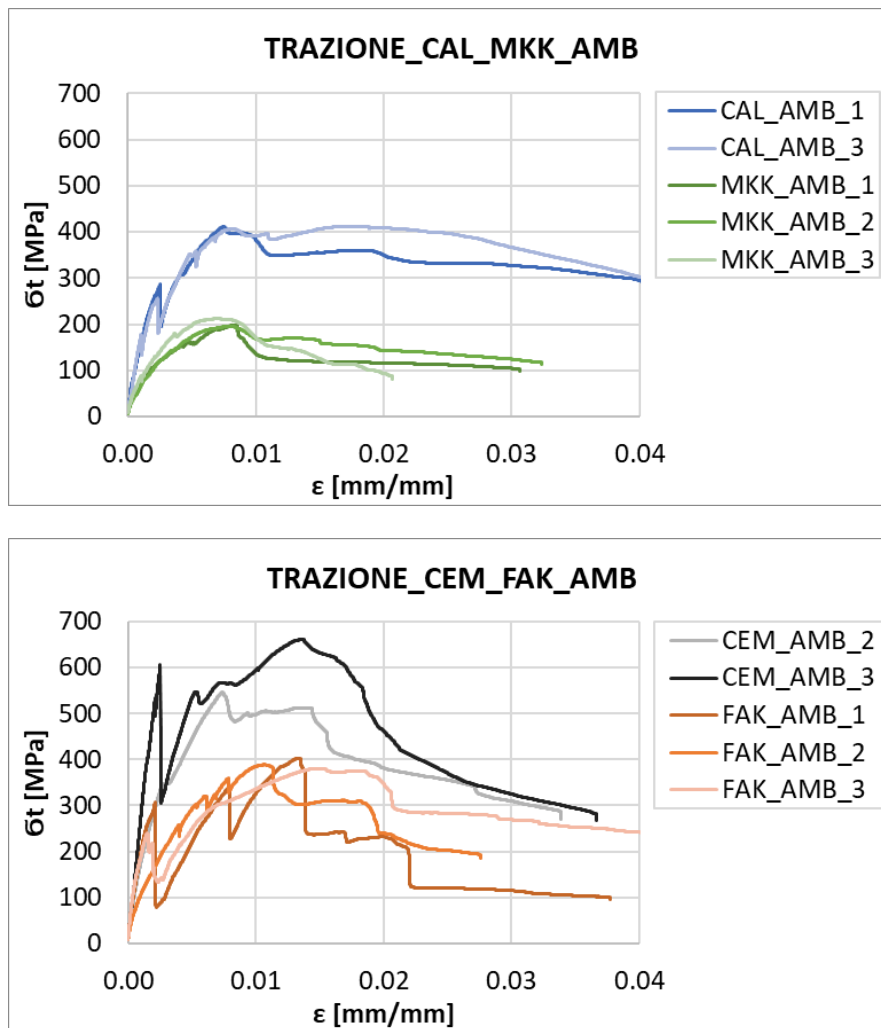


Fig. 51- Diagrammi Tensione–Deformazione da prova di trazione svolta su provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ che non hanno ricevuto il trattamento termico.

Temp.	Mat.	n	Forza Massima F_t [N]	Spost. S_{Ft} [mm]	Tensione Massima σ_{tu} [MPa]	Def. $\epsilon_{\sigma_{tu}}$ [mm/mm]	Modulo Secante E_{sec} [GPa]	Modulo Sec. Medio $E_{sec,m}$ [GPa]	Tensione Max Media $\sigma_{t,m}$ [MPa]	Dev.St. [MPa]	Coeff. di Variazione CV [%]
200°C	CEM	1:	1355.77	1.71	509.69	0.0090	56.74	51.61	544.85	49.73	9.13
		2:	563.11	0.75	211.69	0.0040	53.56				
		3:	1542.84	2.37	580.01	0.0125	46.48				
	CAL	1:	909.70	0.98	341.99	0.0052	66.08	56.87	398.59	64.32	16.14
		2:	1024.73	1.49	385.23	0.0078	49.09				
		3:	1246.30	1.61	468.53	0.0084	55.45				
	FAK	1:	436.76	1.84	164.19	0.0097	16.97	38.50	318.33	2.13	0.67
		2:	850.78	1.15	319.84	0.0060	52.87				
		3:	842.75	2.50	316.82	0.0131	24.12				
	MKK	1:	1481.07	2.40	556.79	0.0126	44.15	50.98	520.06	51.94	9.99
		2:	1285.68	1.59	483.34	0.0084	57.81				
		3:	1010.32	1.20	379.82	0.0063	60.23				

Tab. 14- Dati ottenuti e rielaborati da prova di trazione per provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ per tutte le tipologie di materiale e valore di temperatura 200°C.

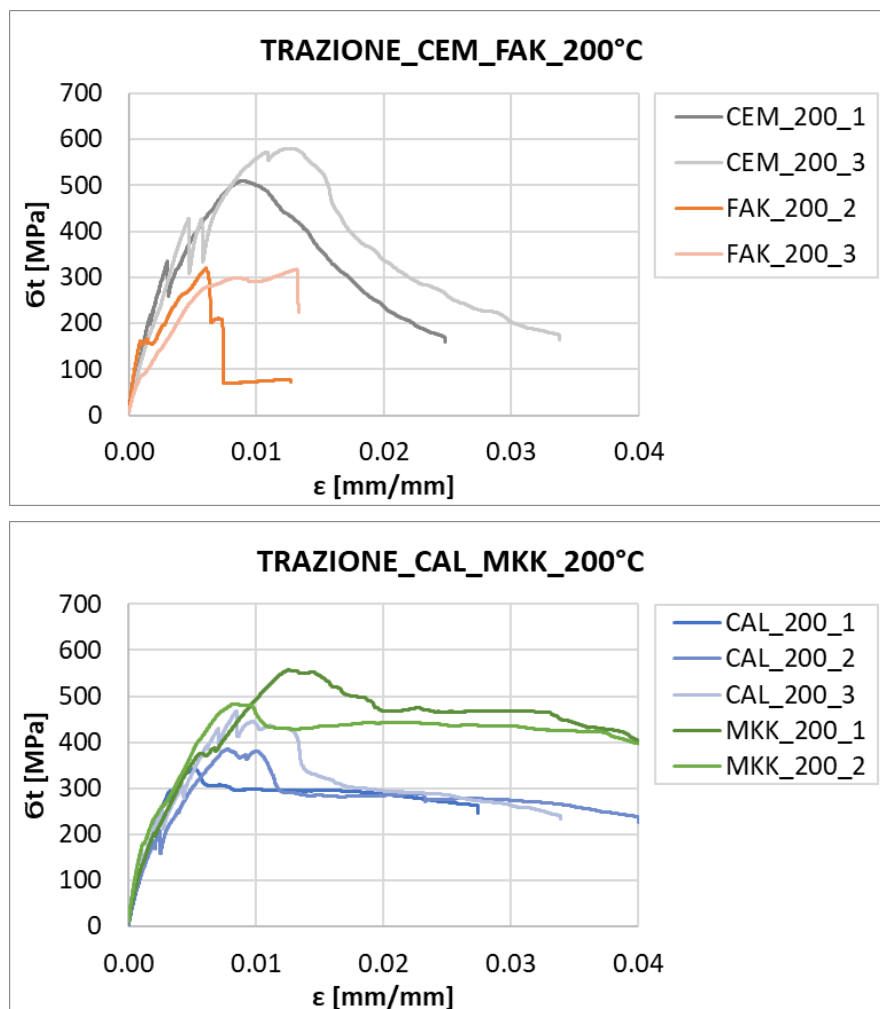


Fig. 52- Diagrammi Tensione–Deformazione da prova di trazione svolta su provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ che hanno ricevuto il trattamento termico a 200°C.

Temp.	Mat.	n	Forza Massima F_t [N]	Spost. S_{Ft} [mm]	Tensione Massima σ_{tu} [MPa]	Def. $\epsilon_{\sigma_{tu}}$ [mm/mm]	Modulo Secante E_{sec} [GPa]	Modulo Sec. Medio $E_{sec,m}$ [GPa]	Tensione Max Media $\sigma_{t,m}$ [MPa]	Dev.St. [MPa]	Coeff. di Variazione CV [%]
400°C	CEM	1:	1132.31	2.32	425.68	0.0122	34.92	35.26	405.52	28.51	7.03
		2:	1025.07	2.06	385.36	0.0108	35.60				
		3:	295.55	2.23	111.11	0.0117	9.47				
	CAL	1:	212.19	3.76	79.77	0.0198	4.03	47.00	467.86	209.37	44.75
		2:	850.71	1.70	319.81	0.0089	35.74				
		3:	1638.32	2.01	615.91	0.0106	58.26				
	FAK	1:	311.45	0.48	117.09	0.0025	46.66	61.54	288.15	31.12	10.80
		2:	707.96	0.48	266.15	0.0025	104.84				
		3:	825.01	3.23	310.16	0.0170	18.24				
	MKK	1:	593.30	1.58	223.05	0.0083	26.89	29.71	209.36	19.36	9.25
		2:	252.77	5.71	95.02	0.0301	3.16				
		3:	520.49	1.14	195.67	0.0060	32.53				

Tab. 15- Dati ottenuti e rielaborati da prova di trazione per provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ per tutte le tipologie di materiale e valore di temperatura 400°C.

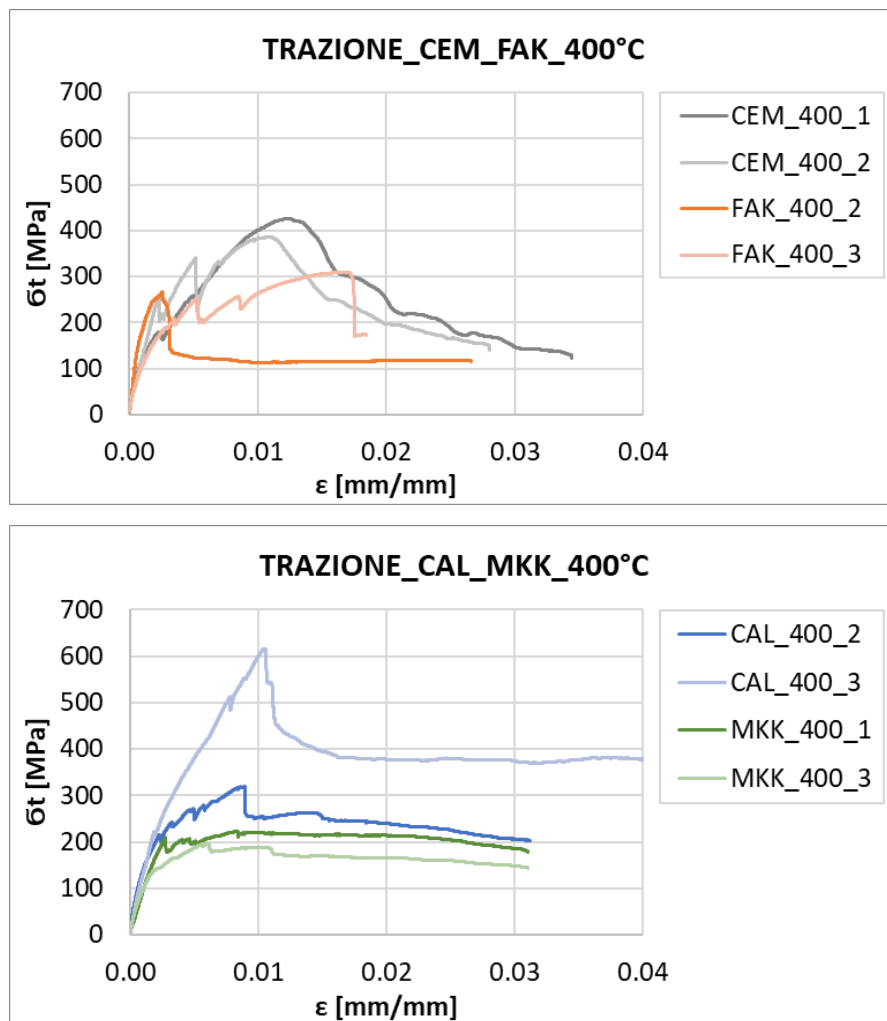


Fig. 53- Diagrammi Tensione–Deformazione da prova di trazione svolta su provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ che hanno ricevuto il trattamento termico a 400°C.

Temp.	Mat.	n	Forza Massima F_t [N]	Spost. S_{Ft} [mm]	Tensione Massima σ_{tu} [MPa]	Def. $\epsilon_{\sigma_{tu}}$ [mm/mm]	Modulo Secante E_{sec} [GPa]	Modulo Sec. Medio $E_{sec,m}$ [GPa]	Tensione Max Media $\sigma_{t,m}$ [MPa]	Dev.St. [MPa]	Coeff. di Variazione CV [%]
600°C	CEM	1:	341.79	1.13	128.49	0.0060	21.53	10.07	129.74	13.78	10.62
		2:	310.23	5.14	116.63	0.0270	4.31				
		3:	383.32	6.24	144.11	0.0329	4.38				
	CAL	1:	105.99	1.74	39.85	0.0092	4.34	7.46	85.72	7.22	8.42
		2:	241.60	5.84	90.83	0.0307	2.96				
		3:	214.44	1.28	80.62	0.0067	11.96				
	FAK	1:	171.82	1.74	64.59	0.0092	7.05	79.47	91.94	47.48	51.64
		2:	390.41	0.17	146.77	0.0009	167.52				
		3:	171.49	0.19	64.47	0.0010	63.85				
	MKK	1:	365.78	5.99	137.51	0.0315	4.36	14.27	112.00	28.97	25.87
		2:	313.81	0.64	117.97	0.0034	34.89				
		3:	214.14	4.30	80.50	0.0226	3.56				

Tab. 16- Dati ottenuti e rielaborati da prova di trazione per provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ per tutte le tipologie di materiale e valore di temperatura 600°C.

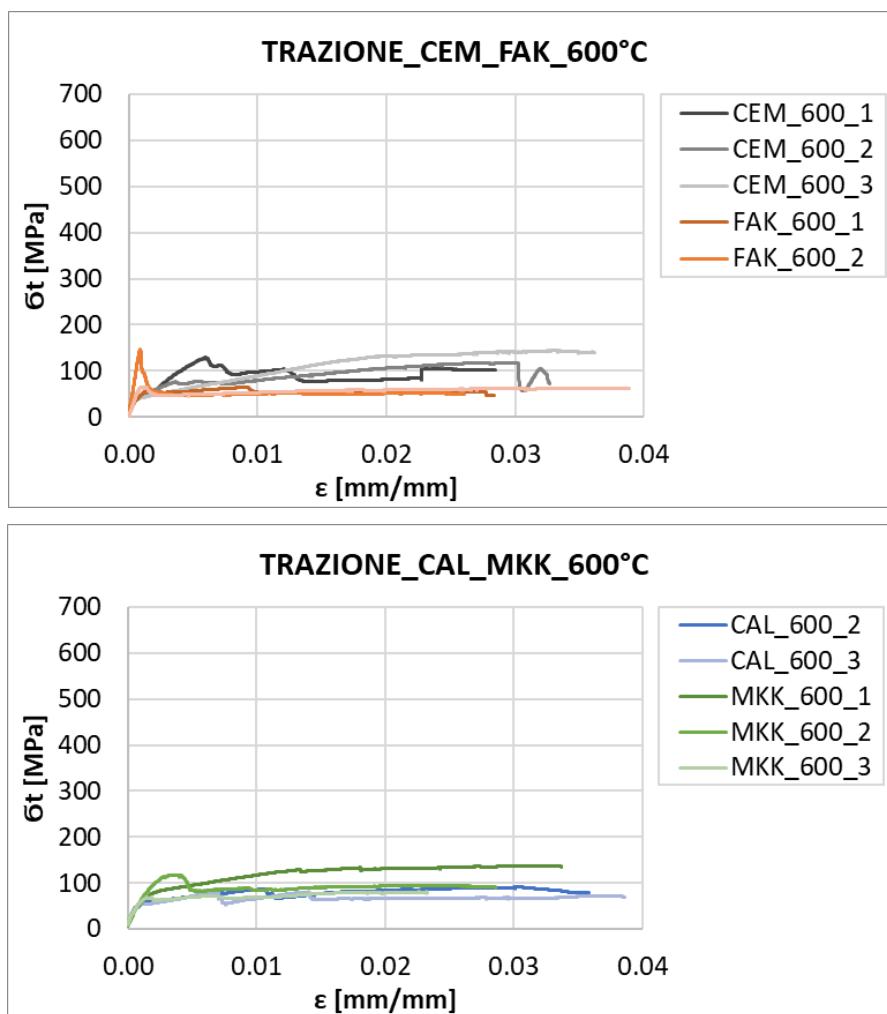


Fig. 54- Diagrammi Tensione–Deformazione da prova di trazione svolta su provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ che hanno ricevuto il trattamento termico a 600°C.

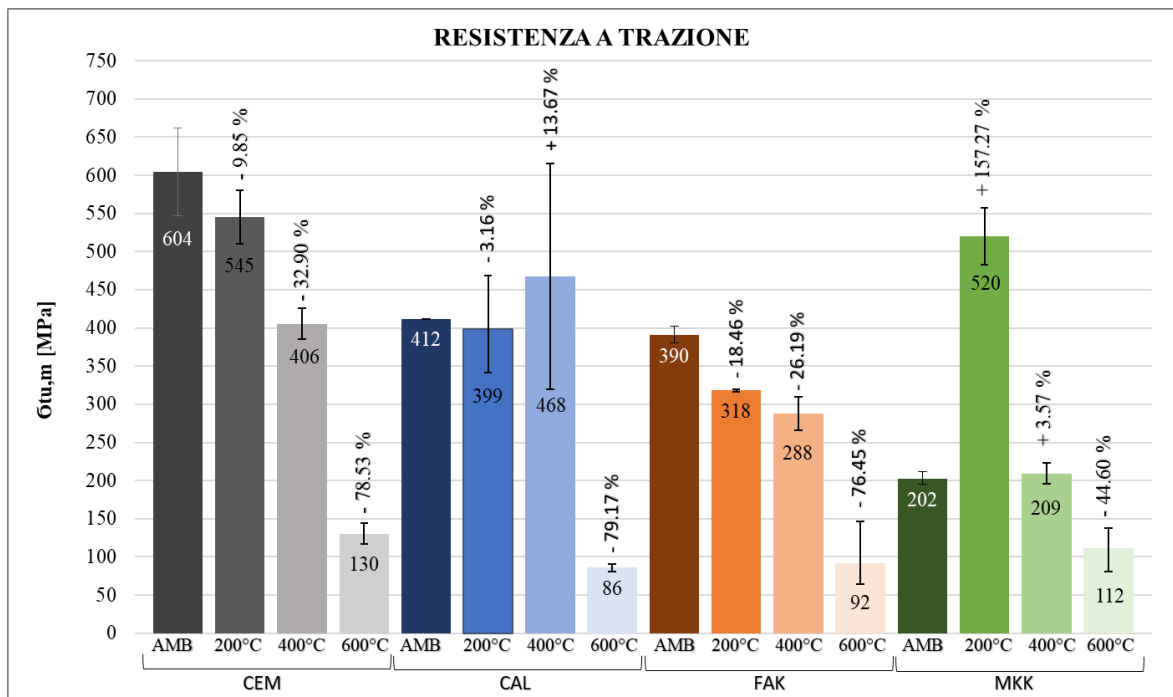


Fig. 55- Istogramma con valori di resistenza a trazione ultima media per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura, compresi di barre di errore e percentuale di decremento / incremento.

Guardando il grafico complessivo (Fig.55), si può notare che il CEM, matrice a base di geolite, sia la più performante in tutti i range di temperatura con un declino importante dopo l'esposizione a 600°C (-78.53%). Il FAK (matrice geopolimerica con cenere volante), ha un comportamento simile al CEM, ossia, si mantiene quasi costante o comunque con valori pressoché vicini di resistenza fino ai 400°C, poi dopo l'esposizione ai 600°C diminuisce notevolmente (-76,45%).

Differente è il comportamento del CAL (provini a base geocalce), presenta un aumento di resistenza dopo l'esposizione ai 400°C, ma anche una differenza di valori molto variabile e quindi questo ci fa trarre la conclusione di essere poco affidabile (CAL 400°C range 319,81°C-615,91°C).

I provini a base metacaolino MKK hanno un aumento non indifferente dopo l'esposizione ai 200°C con una variabile di valori limitata.

Se invece ci concentriamo sui grafici a dispersione (Fig. 55 – 58), notiamo subito che le matrici commerciali CEM e CAL tendono a deformarsi facendo aprire più fessure, infatti notiamo in generale diversi picchi di tensione in questi rispetto alle matrici geopolimeriche FAK e MKK. Picchi di tensione che sono quasi nulli in tutti i provini dopo l'esposizione alla temperatura di 600°C.

A temperatura ambiente, i campioni CEM e FAK raggiungono il picco di tensione allo stesso livello di deformazione ($\varepsilon \approx 0.013$), stessa cosa è valida per i campioni CAL e MKK ($\varepsilon \approx 0.007$), ma le matrici geopolimeriche raggiungono valori di tensione più bassi quindi possiamo generalmente dire che le matrici commerciali sopportano valori di trazione più elevati a parità di deformazione.

I provini FAK tendono ad essere i più fragili, infatti se trascuriamo i campioni che non hanno ricevuto il trattamento termico, tendono ad avere picchi di tensione seguiti da crolli improvvisi, comportamento tipico di materiali molto fragili. La restante tensione dopo il crollo è probabilmente dovuta allo scorrimento o all'allungamento della rete in basalto all'interno della matrice.

5. CONCLUSIONI

5.1 Considerazioni finali

La tesi ha riguardato lo studio del comportamento meccanico di sistemi FRCM con matrici geopolimeriche a base di cenere volante (FAK) e metacaolino (MKK) e di malte commerciali a base di geocalce (CAL) e geolite (CEM), entrambe rinforzate con reti in fibre di basalto, dopo l'esposizione ad alte temperature.

Nella prova ultrasonica è emerso che il FAK e CEM hanno valori del modulo elastico più elevati rispetto al MKK e CAL. Per le prime due malte, a temperatura ambiente, si ha un modulo elastico dinamico di circa 32GPa (FAK) e 25 GPa (CEM). Il modulo elastico decresce all'aumentare della temperatura di esposizione. Le altre due malte (MKK e CAL) hanno valori del modulo elastico inferiori a 10GPa, e risentono meno dell'esposizione a temperature elevate.

Per quanto riguarda invece la prova di flessione, le malte che hanno riscontrato una resistenza maggiore sono il CEM e il FAK (10,51 GPa e 11,51 GPa), rispetto al CAL e MKK (3,82GPa e 1,78 GPa) a temperatura ambiente. È interessante notare che quest'ultime due subiscono un incremento della resistenza dopo l'esposizione a 200°C (CAL: 200°C 4,20 MPa, MKK: 200°C 2,42 MPa), mentre le matrici CEM e FAK subiscono un decremento con l'aumentare della temperatura di esposizione.

Per quanto riguarda la resistenza a compressione i valori maggiori sono stati ottenuti per i provini CEM e FAK, seguiti da CAL e MKK. Una cosa che accomuna le matrici FAK e MKK è la crescita notevole della resistenza a compressione dopo l'esposizione ai 200°C, crescita che probabilmente è dovuta al processo di geopolimerizzazione che viene favorito dalla temperatura elevata (fino a 200°C). Tra tutte le matrici, quella che risente meno l'esposizione alle alte temperature è l'MKK.

Sono state infine eseguite le prove di trazione, su provini FRCM ($19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$), il più performante è stato il CEM (resistenza ultima a trazione: AMB: 604 MPa, 200°C: 545 MPa, 400°C: 406 MPa, 600°C: 130 MPa). I provini FAK hanno mostrato una resistenza ultima a trazione elevata, ma inferiore del 20% rispetto al CEM, mentre i provini MKK hanno avuto un aumento considerevole della resistenza a trazione dopo l'esposizione in forno a 200°C (+157.27%).

Concludendo, dalla prova sperimentali si è osservato che le matrici geopolimeriche risultano in generale più resistenti alle alte temperature rispetto alle matrici a base calce e cemento. L'esposizione ad una temperatura di 200 °C ha portato addirittura ad un incremento della resistenza meccanica nelle matrici geopolimeriche.

Anche per i provini rinforzati con fibre in basalto (FRCM) l'esposizione a 200°C ha portato ad un incremento della resistenza ultima a trazione nei provini MKK a 200°C.

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1 - Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito.....	3
Fig. 2 - Schematizzazione materiali compositi in base alla tipologia di matrice.....	4
Fig. 3 - Schematizzazione materiali compositi in funzione della tipologia di rinforzo.....	5
Fig. 4 - Tipologie di fibre. Immagine tratta da CNR-DT 200/2004, p. 11.	10
Fig. 5 - Tessuto in fibra di vetro in cui sono visibili le due direzioni.....	10
Fig. 6 - Comportamento trilineare della prova di trazione – UniBo	12
Fig. 7 - Setup di prova single shear test – UniCal.	13
Fig. 8 - Classificazione di “materiali attivati con alcali” secondo J.S.J. Van Deventer e J.L. Provis16	
Fig. 9 – Materie prime nella produzione del materiale geopolimerico.....	15
Fig. 10 – Schema di processo per ottenere materiale geopolimerico	16
Fig. 11 – Geolite 40 a sinistra, Geocalce Multiuso a destra, Kerakoll.	19
Fig. 12 – Polvere di metacaolino usato nella sperimentazione.....	20
Fig. 13 - Polvere di cenere volante silico-alluminosa usata nella sperimentazione.....	22
Fig. 14 - Polvere di cemento alluminoso usato per ridurre i fenomeni di efflorescenza.	23
Fig. 15 – Sabbia usata nella sperimentazione.....	26
Fig. 16 – Rinforzo in basalto usato nella sperimentazione	29
Fig. 17 – Casseri in metallo 16 x 4 x 4 cm ³ con disarmante	30
Fig. 18 – Casseri in metallo 16 x 4 x 4 cm ³ con scotch	30
Fig. 19 – Casseri in legno 38 x 6 x 1 cm ³ con disarmante	31
Fig. 20 – Casseri in legno 38 x 6 x 1 cm ³ con scotch	31
Fig. 21 – Casseri in legno 19 x 4 x 1 cm ³ per malta commerciale a sinistra, per malta geopolimerica a destra.	32
Fig. 22 - Rete in basalto per provini 38 x 6 x 1 cm ³ (3 yarn).	32
Fig. 23 – Rete in basalto per provini 19 x 4 x 1 cm ³ con termocoppia (2 yarn).	32
Fig. 24 – Silicato di sodio (a sinistra) e idrossido di potassio (a destra) usati nella sperimentazione.	33
Fig. 25 – Bilancia di precisione usata nella sperimentazione	33
Fig. 26 – Miscelatore elettrico usato nella sperimentazione.....	34

Fig. 27 : Tavola vibrante.	35
Fig. 28 –(A) Provini 16 x 4 x 4 cm ³ in geolite 40 (CEM); (B) Provini 16 x 4 x 4 cm ³ in geocalce multiuso (CAL); (C) Provini 16 x 4 x 4 cm ³ in cenere volante e cemento alluminoso (FAK); (D) Provini 16 x 4 x 4 cm ³ in metacaolino (MKK).....	35
Fig. 29 : Provini 16 x 4 x 4 cm ³ in geolite 40 (CEM); (B) Provini 16 x 4 x 4 cm ³ in geocalce multiuso (CAL); (C) Provini 16 x 4 x 4 cm ³ in cenere volante e cemento alluminoso (FAK); (D) Provini 16 x 4 x 4 cm ³ in metacaolino (MKK).....	36
Fig. 30 – Fase di stesura del primo strato di malta e successiva posa della rete di rinforzo (A).	36
Fig. 31 Sega circolare per il taglio dei provini 38 x 6 x 1 cm ³	37
Fig. 32 – (A) Provini 38 x 4 x 1 cm ³ in geolite 40 (CEM) dopo il taglio con sega circolare; (B) Provini 16 x 4 x 4 cm ³ in geocalce multiuso (CAL) dopo il taglio con sega circolare; (C) Provini 16 x 4 x 4 cm ³ in cenere volante e cemento alluminoso (FAK) dopo il taglio con sega circolare; (D) Provini 16 x 4 x 4 cm ³ in metacaolino (MKK) dopo il taglio con sega circolare.....	37
Fig. 33 – Provini 16 x 4 x 4 cm ³ (in figura in mm ³) con termocoppia Efflorescenze causate dall'esposizione all'aria di una malta geopolimerica in sperimentazioni passate.	38
Fig. 34 – Provini 19 x 4 x 1 cm ³ (in figura in mm ³) con termocoppia	39
Fig. 35: Forno elettrico a muffola usato nella sperimentazione.	40
Fig. 36 – Disposizione dei provini in forno per la cottura a 200°C	42
Fig. 37 – Calibrazione dello strumento e misura delle onde ultrasoniche su un provino 16 x 4 x 4 cm ³ Registratore di dati a sinistra; Esempio di collegamento di due termocoppie a destra.....	42
Fig. 38 – Curve di riscaldamento dei provini 16 x 4 x 4 cm ³ con termocoppia che hanno ricevuto il trattamento termico a tutte le temperature, curva di riscaldamento del forno e rampa di riscaldamento assegnata.....	43
Fig. 39 – Calibrazione dello strumento e misura delle onde ultrasoniche su un provino 16 x 4 x 4 cm ³	44
Fig. 40– Macchina di compressione Galbadini usata nella sperimentazione a sinistra; Setup di prova a flessione a destra prima e dopo la rottura.	46
Fig. 41 – Setup di prova a compressione.....	47
Fig. 42 – Resina Bicomponente e fibra di vetro usata nella sperimentazione.	48
Fig. 43 – Esempio dei provini con estremità in fibra di vetro.	48
Fig. 44– Setup di prova a trazione eseguito con la macchina Zwick/Roell Z050	49
Fig. 45- Curve di riscaldamento dei provini 19 x 4 x 1 cm ³ con termocoppia che hanno ricevuto il trattamento termico a tutte le temperature, curva di riscaldamento del forno e rampa di riscaldamento assegnata.	52
Fig. 46- Curve di riscaldamento dei provini 19 x 4 x 1 cm ³ con termocoppia che hanno ricevuto il trattamento a 200°C – 400°C – 600°C, curva di riscaldamento del forno e rampa di riscaldamento assegnata.	53

Fig. 47– Istogramma con moduli elastici dinamici medi per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura, compresi di barre di errore e percentuale di decremento.....	56
Fig. 48- Istogramma con valori di resistenza a flessione massima media per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura, compresi di barre di errore e percentuale di decremento / incremento.....	58
Fig. 49– Provini dopo l’esecuzione della prova di flessione.	58
Fig. 50 - Istogramma con valori di resistenza a compressione massima media per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura, compresi di barre di errore e percentuale di decremento / incremento.	61
Fig. 51 - Diagrammi Tensione–Deformazione da prova di trazione svolta su provini 19 x 4 x 1 cm ³ che non hanno ricevuto il trattamento termico.....	63
Fig. 52 - Diagrammi Tensione–Deformazione da prova di trazione svolta su provini 19 x 4 x 1 cm ³ che hanno ricevuto il trattamento termico a 200°C.....	64
Fig. 53- Diagrammi Tensione–Deformazione da prova di trazione svolta su provini 19 x 4 x 1 cm ³ che hanno ricevuto il trattamento termico a 400°C.	65
Fig. 54- Diagrammi Tensione–Deformazione da prova di trazione svolta su provini 19 x 4 x 1 cm ³ che hanno ricevuto il trattamento termico a 600°C.	66
Fig. 55- Istogramma con valori di resistenza a trazione ultima media per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura, compresi di barre di errore e percentuale di decremento / incremento.	67

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 1 –Costituenti metacaolino MetaStar 501.	20
Tab. 2 – Costituenti cenere volante silicea.	22
Tab. 3 – Componenti cemento alluminoso (Ciment Fondu Imerys).	23
Tab. 4 - Proprietà chimico-fisiche del silicato di sodio.....	24
Tab. 5 – Proprietà chimico-fisiche dell'idrossido di potassio.	25
Tab. 6 – Mix di sostanze utilizzate per la formazione di malte geopolimeriche	27
Tab. 7 – Caratteristiche tecniche del sistema di rinforzo in basalto.	28
Tab. 8 – Temperature massime raggiunte dai diversi provini 16 x 4 x 4 cm ³ con termocoppia che hanno ricevuto il trattamento a tutte le temperature.....	51
Tab. 9 - Temperature massime raggiunte dai diversi provini 19 x 4 x 1 cm ³ con termocoppia che hanno ricevuto il trattamento a 200°C, 400°C e 600°C.	52
Tab. 10 – Dati ottenuti e rielaborati da prova ultrasonica per provini 16 x 4 x 4 cm ³ per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori temperatura.....	57
Tab. 11 – Dati ottenuti e rielaborati da prova di flessione per provini 16 x 4 x 4 cm ³ per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura.	57
Tab. 12 - Dati ottenuti e rielaborati da prova di compressione per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura.	60
Tab. 13 - Dati ottenuti e rielaborati da prova di trazione per provini 19 x 4 x 1 cm ³ per tutte le tipologie di materiale e valore di temperatura ambiente.....	62
Tab. 14 - Dati ottenuti e rielaborati da prova di trazione per provini 19 x 4 x 1 cm ³ per tutte le tipologie di materiale e valore di temperatura 200°C.	64
Tab. 15 - Dati ottenuti e rielaborati da prova di trazione per provini 19 x 4 x 1 cm ³ per tutte le tipologie di materiale e valore di temperatura 400°C.	65
Tab. 16 - Dati ottenuti e rielaborati da prova di trazione per provini 19 x 4 x 1 cm ³ per tutte le tipologie di materiale e valore di temperatura 600°C.	66

BIBLIOGRAFIA

- ¹ Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibro-rinforzati. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, CNR 13 luglio 2004, p. 8-11
- ² Strengthening of concrete structures with cement based bonded composites. Blanksvärd T, Täljsten B. 2008, Journal of Nordic Concrete Research, 38(2): 133- 153.
- ³ Material and bonding characteristics for dimensioning and modeling of textile reinforced concrete (TRC) elements. Banholzer B, Brockmann T, Brameshuber W. 2006, Materials and Structures, 39: 749–763.
- ⁴ Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear. Brückner A, Ortlepp R, Curbach M. 2006, Materials and Structures, 39: 741-748.
- ⁵ Influence of bond properties on the tensile behaviour of Textile Reinforced Concrete. Hartig J, Häuler-Combe U, Schick Tanz K. 2008, Cement & Concrete Composites, 30: 898-906.
- ⁶ Load-bearing behavior and simulation of textile reinforced concrete. Hegger J, Will N, Bruckermann O, Voss S. 2006, Materials and Structures, 39: 765-776.
- ⁷ Fibre reinforced cementitious matrix systems for fire-safe flexural strengthening of concrete: Pilot testing at ambient temperature. Bisby L.A, Roy E.C, Ward M, Stratford T.J. 2009, In Proceedings Advanced Composites in Construction, Edinburgh, UK.
- ⁸ Innovative Textile-based Composites for Strengthening and Seismic Retrofitting of Concrete and Masonry Structures. Triantafillou T.C. 2010, In Proceedings of the 5th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE-2010, Beijing, China. 145
- ⁹ Fiber reinforced cement based composite sheets for structural retrofit. Wu H.C, Sun P. 2005, In Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, BBFS, Hong Kong, China.
- ¹⁰ Mineral-Based bonding of Carbon FRP to strengthen concrete structures. Täljsten B, Blanksvärd T. 2007, Journal of Composites for Construction, 11(2): 120-128.

- ¹¹ Bellomo M, D'Ambrosio V. Fibrorinforzati in architettura. Le tecnologie FRP e FRCM nel recupero delle strutture in c.a. CLEAN edizioni, 2009.
- ¹² Classificazione tratta da CNR-DT 200/2004, p.12.
- ¹³ RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages. www.rilem.net
- ¹⁴ M. Gordon, J. Bell, W.M. Kriven. "Geopolymers: Alkali Bonded Ceramics (ABCs) for high-tech applications". Ceram. Trans. (2006). Vol. 175: pp.215-24.
- ¹⁵ J.S.J. van Deventer, J.L. Provis, P. Duxson, D.G. Brice. "Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials". Waste Biomass Valor. (2010). Vol. 1: pp. 145-55.
- ¹⁶ Luciano Ombres, Antonio Iorfida, Stefania Mazzuca, Salvatore Verre -Bond analysis of thermally conditioned FRCM-masonry joints.
- ¹⁷ E. Papa, "Produzione e caratterizzazione di schiume inorganiche a base geopolimerica", Tesi di laurea magistrale, Dipartimento di Chimica Industriale e dei Materiali, Università degli Studi di Bologna, 2010-2011
- ¹⁸ Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti, Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Servizio Tecnico Centrale, Luglio 2018.
- ¹⁹ Norme tecniche per le costruzioni approvate con Decreto Ministeriale del 17 Gennaio 2018 (nel seguito NTC 2018), Capitolo 8.6.
- ²⁰ NTC 2018, Capitolo 12.