



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

**Comportamento meccanico di sistemi FRCCM
rinforzati con fibre di basalto esposti a
temperature elevate**

**Mechanical behaviour of FRCCM systems reinforced
with basalt fibers exposed to high temperatures**

Relatore:
Prof. Ing. Jacopo Donnini

Laureando:
Daniele Berdini

Correlatore:
Prof. Ing. Valeria Corinaldesi

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.....	10
1.2.2 I sistemi FRCM a base geopolimerica	12
1.2.3 Qualificazione di un sistema FRCM	16
1.2.4 Quadro normativo	17
1.4 Alcuni studi scientifici di FRCM a temperature elevate.....	20
1.4.1 Lavoro svolto dall'Alma Mater Studiorum - UniBo.....	20
1.4.2 Lavoro svolto dall'Università della Calabria - UniCal	23
2. MATERIE PRIME E PREPARAZIONE.....	25
2.1 Matrici commerciali.....	25
2.2 Matrici Geopolimeriche	26
2.2.1 Polveri reattive allumino-silicate	26
2.2.2 Soluzioni Alcaline	32
2.2.3 Inerte sabbia	35
2.2.4 Mix design.....	35
2.3. Rete di rinforzo in basalto	37
2.4 Preparazione.....	38
2.4.1 Tipologia di casseri	38
2.4.2 Rinforzi per i campioni	42

2.4.3 Getti.....	43
2.5 Cottura in forno elettrico a muffola	51
3. METODI DI PROVA.....	52
3.1 Prova di spandimento.....	52
3.2 Prova di esposizione alle alte temperature.....	53
3.3 Prova ultrasonica.....	57
3.4 Caratterizzazione meccanica delle malte	59
3.4.1 Prova di flessione	59
3.4.2 Prova di compressione	60
3.5 Prova di trazione (Tensile Test).....	61
4. RISULTATI E OSSERVAZIONI	65
4.1 Consistenza della malta fresca	65
4.2 Monitoraggio in forno elettrico a muffola	67
4.3 Modulo elastico dinamico.....	72
4.4 Resistenza a flessione	75
4.5 Resistenza a compressione.....	78
4.6 Resistenza a trazione.....	81
5. CONCLUSIONI	88
5.1 Considerazioni finali.....	88
5.2 Future sperimentazioni	91
INDICE DELLE FIGURE.....	92
INDICE DELLE TABELLE	95
BIBLIOGRAFIA	96

INTRODUZIONE

L'utilizzo di materiali avanzati per il rinforzo strutturale è diventato sempre più comune negli ultimi anni per migliorare le prestazioni e la durabilità delle strutture. Tra questi materiali, le matrici cementizie rinforzate con fibre (FRCM – Fiber Reinforced Cementitious Matrix) stanno emergendo come una tecnologia estremamente promettente, soprattutto se consideriamo l'aumento di prestazioni meccaniche e la minima invasività che questi interventi comportano. Grazie alla loro elevata resistenza e adattabilità, i sistemi FRCM possono essere utilizzati con successo per rinforzare e riparare vari tipi di strutture in calcestruzzo armato e muratura, incluse quelle storiche e monumentali. Un tema di notevole importanza se pensiamo al patrimonio edilizio italiano, il quale presenta un vasto numero di strutture progettate e realizzate prima della comparsa dei codici di costruzione moderni.

Le prestazioni meccaniche di questi sistemi sono già state ampiamente studiate in letteratura, ma esistono tutt'oggi informazioni non esaustive sulle problematiche di interfaccia, e le loro prestazioni in condizioni eccezionali, come l'esposizione alle alte temperature che rappresenta un argomento che necessita di esser visto con maggior dettaglio.

Con questo lavoro c'è la volontà di dare un contributo nello studio dei sistemi compositi FRCM con matrice geopolimerica e fibre di basalto, focalizzandosi sul loro comportamento meccanico e deformativo dopo esser stati esposti a diverse temperature. I risultati ottenuti verranno successivamente confrontati con i dati di matrici che si trovano normalmente in commercio.

Nel primo capitolo viene riportata una descrizione generale dei materiali compositi a matrice inorganica fornendo una panoramica generale sullo stato dell'arte per poi concentrarsi sui sistemi compositi innovativi a base di geopolimeri. Vengono riportati anche alcuni studi

significativi che trattano l'esposizione alle alte temperature dei sistemi compositi. Viene data anche una panoramica riassuntiva su quella che è la normativa italiana e a livello internazionale per l'utilizzo di questi materiali.

Nel secondo capitolo viene fornita una descrizione delle materie prime, vengono riportati i dati tecnici e le quantità utilizzate per ogni tipologia di materiale, quindi viene riportata la procedura di realizzazione dei casseri e dei campioni per i diversi setup di prova.

Nel terzo capitolo vengono descritti i metodi di prova effettuati in laboratorio, come rielaborare i dati ottenuti e quindi determinare i risultati che ci interessano.

Nel quarto capitolo sono riportati e discussi i risultati delle campagne sperimentali, allegati di diversi grafici e tabelle per agevolare la lettura dei dati ottenuti.

Nel quinto e ultimo capitolo vengono date delle considerazioni finali sul lavoro svolto e si dà un incipit per le prossime sperimentazioni.

1. STATO DELL'ARTE

1.1 I materiali compositi

Questi sono materiali costituiti da una miscela naturale o artificiale, di materiali diversi.

Normalmente il termine compositi fa riferimento ad una categoria di materiali che rispondono a tre requisiti:

- sono formati da due o più materiali fisicamente distinti;
- sono dispersi l'uno nell'altro in modo controllato
- il materiale che ne risulta presenta una combinazione di proprietà che non è possibile ottenere dai singoli materiali costituenti¹.

Generalmente sono costituiti di una fase continua, detta matrice, e di una fase discontinua o dispersa, detta rinforzo. La natura dei componenti che costituiscono il composito contribuisce in maniera determinante alla definizione delle proprietà del materiale, infatti il comportamento finale è funzione delle caratteristiche fisico-chimiche della porzione di materiale compresa tra il rinforzo e la matrice, generalmente individuata come interfaccia o interfase (Fig. 1). Tale area può essere modificata e migliorata tramite l'utilizzo di particolari agenti chimici, che applicati sulla superficie della fase dispersa comportano un miglior trasferimento delle tensioni tra le diverse fasi del composito.

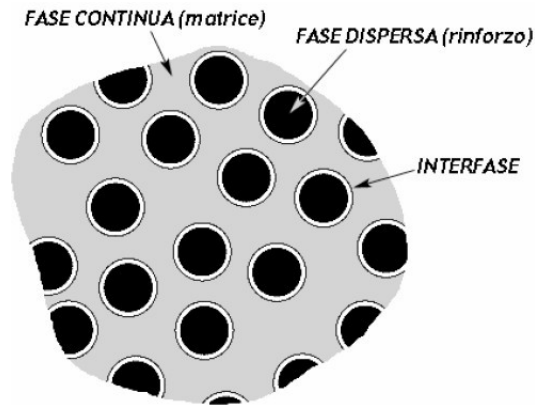


Fig. 1 - Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito.

1.1.1 Classificazione dei materiali compositi

Esistono diverse classificazioni per i materiali compositi fibrorinforzati, le più comuni sono in funzione del tipo di matrice e del tipo di rinforzo.

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

- **PMC (Polymer Matrix Composite, anche detti FRP Fiber Reinforced Polymer):** sono matrici organiche a base di resine termoindurenti (es. epossidiche, fenoliche, melamminiche) o termoplastiche (es. poliesteri, poliammidi, polipropilene). Sono utilizzate soprattutto in ambito aeronautico e navale.
- **MMC (Metallic Matrix Composite):** sono matrici inorganiche a base di leghe metalliche (es. alluminio, magnesio, titanio) caratterizzate da un elevato rapporto resistenza/densità, molto utilizzata in campo aerospaziale e automobilistico.
- **BMC (Brittle Matrix Composite):** anch'esse inorganiche, costituite da allumina o carburo di silicio, malte cementizie, materiali a base di calce e malte geopolimeriche, usate molto in ambito edilizio.

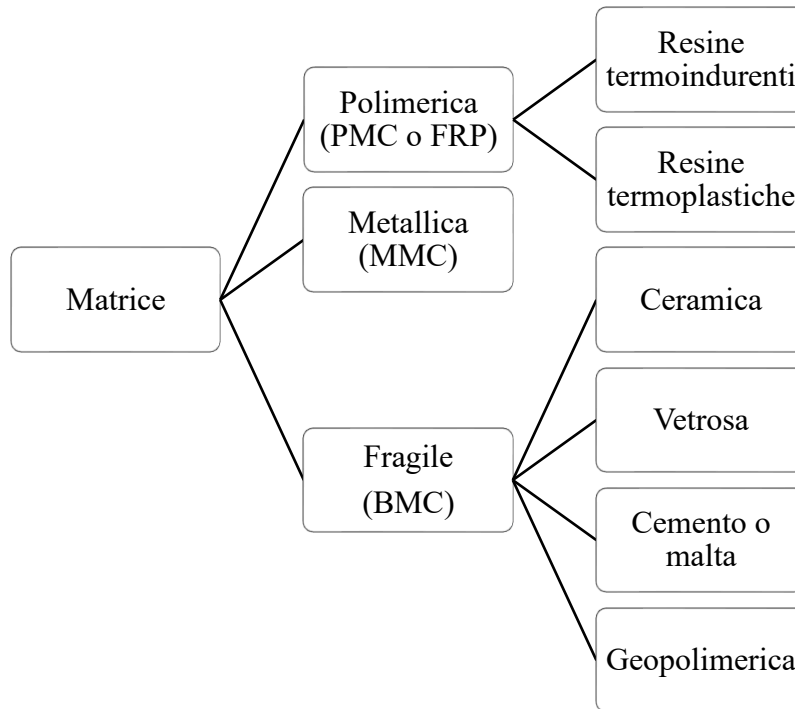


Fig. 2 - Schematizzazione materiali compositi in base alla tipologia di matrice.

Se consideriamo il tipo di 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) o discontinue (corte). Quest'ultime 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).

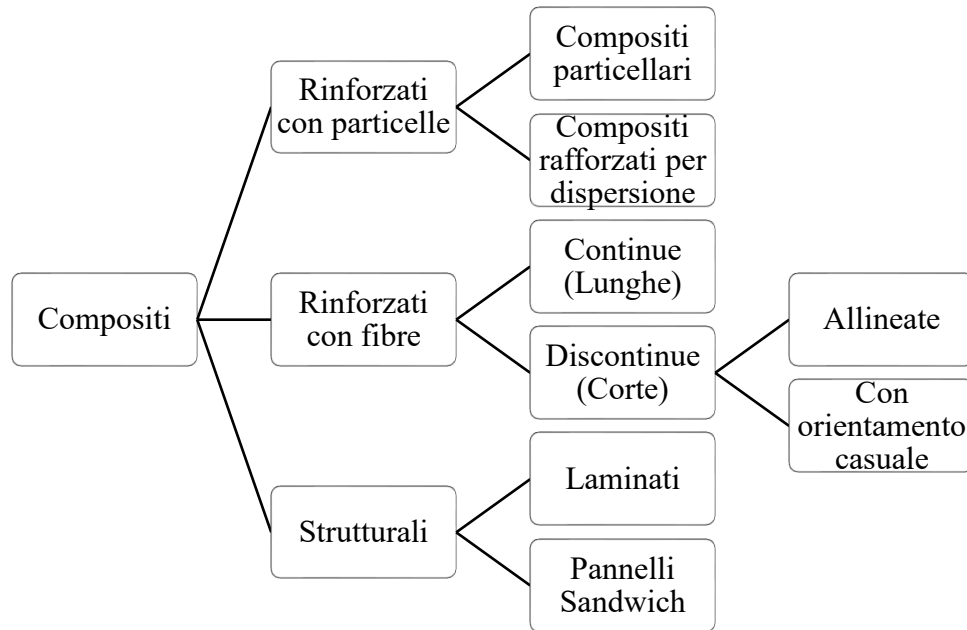


Fig. 3 - Schematizzazione materiali compositi in funzione della tipologia di rinforzo.

Nei prossimi punti parleremo in maniera più approfondita dei materiali compositi BMC, in particolare quelli con matrice a base di cemento o malta e geopolimerica rinforzati con fibre continue.

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. L'orientazione delle fibre del tessuto può seguire fino a quattro diverse direzioni.^{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, tagliato nelle dimensioni desiderate, il quale viene impregnato attraverso l'immersione completa in una boiaccia, che costituisce la matrice. 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. La rete in CFRP viene posizionata su un primo strato di malta, cui segue la stesura di un secondo strato¹⁰
- 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

Il termine FRCM, come anticipato, descrive un sistema composito costituito da una matrice inorganica con rinforzo in rete a maglia larga (0,6-1,5 cm) a bassa densità (0,6-1,8 kg/m²). Precedentemente, nell'ambito del rinforzo di elementi portanti in c.a., le fibre di acciaio sono state le prime ad essere impiegate. Infatti, il costo ridotto, l'elevata compatibilità di tali fibre con la matrice cementizia e la facilità della posa in opera hanno favorito la diffusione di questa tecnologia. In seguito, l'utilizzo di FRCM con rinforzo in carbonio ha portato alla formulazione di malte cementizie con caratteristiche specifiche finalizzate principalmente al miglioramento delle proprietà adesive e meccaniche.

La diffusione di sistemi a base di malta cementizia, successiva a quella dei sistemi a base di malta polimerica, è da attribuirsi principalmente alle ottime proprietà delle matrici inorganiche, a confronto con le matrici polimeriche. Infatti rispetto a quest'ultime, si fanno preferire per la resistenza all'umidità, alle medio-alte temperature, al fuoco, agli agenti aggressivi e l'adesione al supporto. Di contro, le malte cementizie possiedono una minore capacità di impregnare le fibre rispetto alle matrici polimeriche. Si determina, pertanto, una potenziale riduzione dell'aderenza tra le fibre e la matrice. Una delle soluzioni adottate per ovviare a questo problema consiste nell'utilizzo di tessuti unidirezionali o reti a maglia larga, favorendo il grado di penetrazione della matrice all'interno della rete¹¹.

I principali vantaggi dei sistemi FRCM includono:

- a) Resistenza meccanica: migliorano la resistenza meccanica e la capacità di carico delle strutture in calcestruzzo armato e muratura.
- b) Flessibilità: sono altamente adattabili, permettendo una maggiore aderenza nei punti critici della struttura, come gli angoli o le curve.
- c) Resistenza agli agenti atmosferici: sono molto resistenti agli agenti atmosferici, come aloni, esposizione al sole, freddo, pioggia, e umidità, aiutando a preservare la robustezza della struttura.
- d) Resistenza al fuoco: sono resistenti al fuoco, offrendo una protezione supplementare contro eventuali danni causati dal calore e dalle fiamme.
- e) 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.
- f) Affidabilità: sono considerati molto affidabili e sicuri, offrendo una lunga durata e una maggiore protezione in caso di eventi sismici.
- g) 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 FRCCM

I rinforzi per i sistemi FRCCM possono essere di vario tipo, ma in ambito edilizio sono quelli a fibra continua a rete i più utilizzati. Queste fibre sono solitamente dotate di elevata rigidità e resistenza a trazione, pertanto hanno il compito di assorbire la maggior parte del carico esterno applicato al materiale conferendo elevate proprietà meccaniche al composito.

Le principali caratteristiche fisiche del rinforzo sono:

- geometria, intendendo forma, dimensioni e distribuzione delle dimensioni;
- massa e densità del materiale;
- disposizione, orientamento rispetto agli assi di simmetria del materiale;
- concentrazione, ossia la frazione volumetrica.

I materiali attualmente impiegati sono le fibre di carbonio, aramide, acciaio, PBO (poliparafenilbenzobisossazolo) e più recentemente vetro e basalto.

Le fibre sono costituite da filamenti continui molto sottili e quindi difficili da manipolare singolarmente. Per tale motivo sono disponibili commercialmente in varie forme (Fig. 4):

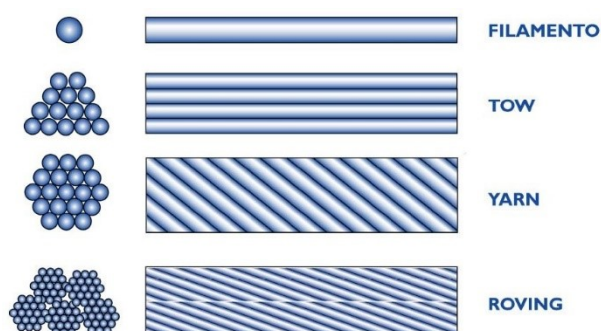


Fig. 4 - Tipologie di fibre. Immagine tratta da CNR-DT 200/2004, p. 11.

- 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 filamento, destinato ad essere filato, ritorto o strappato per essere utilizzata 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.

Oltre che in forma di yarn o roving, le fibre sono disponibili commercialmente anche in modo da formare una grande varietà di tessuti (*fabric*) nei quali si distingue una direzione principale, detta ordito (*warp*) ed una trasversale ortogonale alla prima, detta trama (*weft*) (Fig. 5).

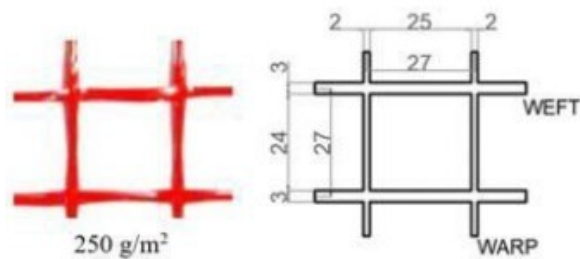


Fig. 5 - Tessuto in fibra di vetro in cui sono visibili le due direzioni.

1.2.2 I sistemi FRCM a base geopolimerica

Di recente, si stanno studiando malte a base di geopolimeri, da utilizzare come matrice di un composito FRCM. I sistemi di rinforzo ottenuti, ancora oggetto di ricerca, sono stati denominati FRGM (Fabric Reinforced Geopolymer Mortar) e CRGM (Composite Reinforced GeoPolymer Mortar); nel caso di utilizzo di fibre di acciaio sono stati utilizzati gli acronimi SRG (Steel Reinforced Grout) e SRGG (Steel Reinforced Geopolymeri Grout) ove impiegata una malta tradizionale o innovativa, rispettivamente. I risultati della ricerca sembrano ad oggi molto promettenti, considerato che i sistemi proposti garantiscono una resistenza meccanica simile a quella degli analoghi sistemi realizzati con malta tradizionale e con un incremento non indifferente della resistenza termica.

Nei prossimi capitoli verrà spiegato tutto il processo di geopolimerizzazione.

1.2.2.1 Geopolimeri

I geopolimeri sono leganti idraulici prodotti mescolando della polvere inorganica principalmente di silicato o alluminosilicato, che può essere ottenuto dalla macinazione di materiali come cenere volante, sabbia silicea, argille o scorie di alluminio in un ambiente fortemente basico¹³. Questi materiali sono utilizzati come sostituti dei tradizionali materiali da costruzione, infatti è un prodotto di geosintesi, cioè un prodotto somigliante a una roccia naturale e corrispondente ad una precisa classificazione mineralogica. Oltre ai vantaggi in termini di caratteristiche meccaniche, abbiamo anche una riduzione significativa delle emissioni di gas serra e degli scarti di processi di produzione, che rendono i geopolimeri un'alternativa più ecologica rispetto al cemento tradizionale.

Dato che vengono prodotti sfruttando una reazione chimica piuttosto che un trattamento

termico di sinterizzazione, alcuni autori hanno iniziato a definire questa classe di materiali “ceramiche consolidate per reazione alcalina” (“alkali bonded ceramics”)¹⁴; le proprietà chimico-fisiche e meccaniche ottenibili sono infatti confrontabili con quelle tipiche delle ceramiche. Chimicamente e strutturalmente, i geopolimeri sono essenzialmente confrontabili con le rocce naturali, anche per durezza, longevità e stabilità chimica mentre, rispetto ai cementi, possiedono strutture più reticolate e complesse. Una proposta di classificazione (avanzata da J.S.J. van Deventere J.L. Provis e indicata in Fig. 6) prende in considerazione il contenuto di calcio e alluminio¹⁵.

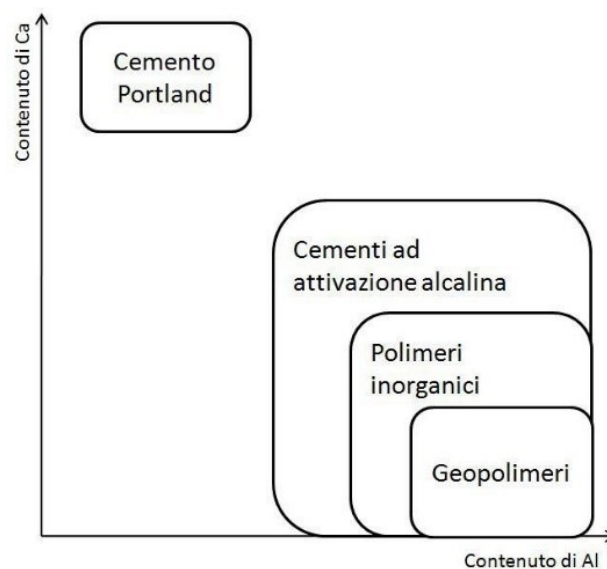


Fig. 6 - Classificazione di “materiali attivati con alcali” secondo J.S.J. Van Deventer e J.L. Provis.

Con il termine “cementi ad attivazione alcalina” ci si riferisce ad una famiglia di leganti inorganici derivanti dalla reazione tra un sale di un metallo alcalino con una polvere di silicati. I polimeri inorganici (maggiore contenuto di alluminio e sodio) si differenziano dai precedenti per una microstruttura disordinata ed un maggior grado di reticolazione delle catene silicatiche. I geopolimeri sono un sottoinsieme dei polimeri inorganici, caratterizzato

da un maggior contenuto di allumina, un altissimo contenuto di sodio ed un più basso tenore di calcio. Una peculiarità dei geopolimeri è quella di non possedere fasi cristalline idrate o carbonatate.

I geopolimeri, hanno una struttura polimerica tri- o bi-dimensionale in funzione del rapporto atomico Si/Al, con catene di molecole legate attraverso legami covalenti. Dal punto di vista ambientale e dello sviluppo sostenibile, l'impiego dei cementi geopolimerici può contribuire alla mitigazione del surriscaldamento globale rimpiazzando il cemento Portland ordinario. Quest'ultimo, infatti, proviene dalla calcinazione di carbonato di calcio e di silico alluminati a circa 1450 °C, con produzione di grandi quantità di anidride carbonica (1 ton di cemento produce 1 ton di CO₂). Si può stimare che i materiali a base geopolimerica riducano l'emissione di CO₂ di circa l'80 % poiché non necessitano di alte temperature di calcinazione. Inoltre si possono utilizzare come materie prime scarti industriali quali ceneri volanti o loppa d'altoforno e gli stessi materiali possono essere riciclati come aggregati, ad esempio nelle sedi stradali. Per questi motivi i geopolimeri trovano grande applicazione come materiali sostenibili ecocompatibili per l'industria delle costruzioni.

1.2.2.2 Processo di geopolimerizzazione

Al fine di produrre un materiale geopolimerico devono essere selezionate due tipologie di materie prime come schematizzato in Fig. 7:

- la polvere alluminosilicata reattiva nel processo di geopolimerizzazione, che determina in genere il tipo di applicazione in base alle sue caratteristiche morfologiche, chimico composizionali e di reattività;
- la soluzione acquosa di idrossidi e/o silicati alcalini, con pH e concentrazione accuratamente controllati in base alla reattività della polvere (cioè alla sua propensione all'idrolisi alcalina), che a seconda del catione alcalino (comunemente Na⁺, K⁺, ma anche Li⁺, Cs⁺) influisce sulle proprietà meccaniche del materiale finale.



Fig. 7 - Materie prime nella produzione del materiale geopolimerico.

La geopolimerizzazione è un processo piuttosto complesso ma può essere semplificato in quattro fasi:

- 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 geopolimerico ¹⁶

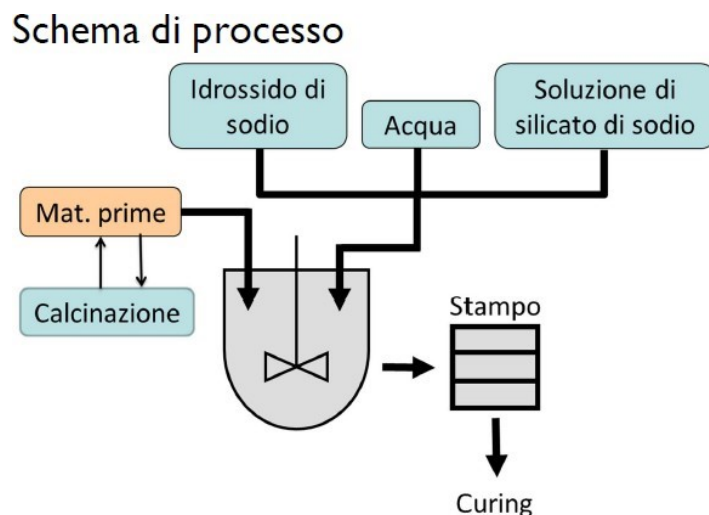


Fig. 8 - Schema di processo per ottenere materiale geopolimerico.

1.2.3 Qualificazione di un sistema FRCCM

Le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni, approvate con Decreto Ministeriale del 17 Gennaio 2018 prescrivono che tutti i materiali e prodotti da costruzione impiegati per uso strutturale, debbano essere identificabili, in possesso di specifica qualificazione all'uso previsto e debbano essere oggetto di controllo in fase di accettazione da parte del Direttore dei lavori.

Le norme predette prevedono che i materiali e i prodotti da costruzione per uso strutturale, quando non marcati CE o non provvisti di Benestare Tecnico Europeo, debbano essere in possesso di un Certificato di Valutazione Tecnica (CVT) rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale (STC), sulla base di linee guida approvate dal Consiglio superiore dei Lavori Pubblici. Le procedure per la qualificazione ed accettazione dei sistemi di rinforzo FRCCM forniscono curve di comportamento e relativi parametri meccanici utilizzabili per la

progettazione e la verifica degli interventi di rinforzo, quali la resistenza ultima a trazione del sistema di rinforzo FRCM e la resistenza nei confronti di prove di distacco dal supporto.

Nello specifico, ai fini del rilascio del CVT occorre eseguire le seguenti prove:

- 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 termiche¹⁷.

1.2.4 Quadro normativo

La progettazione con i sistemi FRP e FRCM ha trovato inizialmente degli ostacoli per la mancanza di codici normativi o di linee guida progettuali a cui i progettisti potessero fare riferimento. Infatti, fino alla fine degli anni '90 la produzione di questi documenti è stata piuttosto lenta, a dispetto del crescente numero di ricerche teoriche e sperimentali a sostegno dell'impiego di tali sistemi innovativi nel campo della riabilitazione strutturale come alternativa alle tecniche tradizionali. Successivamente, le Commissioni di Studio sulle norme tecniche e le Associazioni di Settore, con la diffusione nei mercati di molteplici prodotti differenti per la natura delle matrici e delle reti di rinforzo, hanno redatto documenti tecnici a cui possono riferirsi codici e normative nazionali.

In campo internazionale, gli Stati Uniti ed il Giappone sono stati i primi ad istituire tramite l'A.C.I. (American Concrete Institute) e la JSCE (Japan Society of Civil Engineers) commissioni tecniche finalizzate alla pubblicazione di importanti documenti. In particolare tra le istruzioni americane relative ai sistemi FRP si ricorda l'ACI 440.2R-02 ("Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures") sostituito dal più recente ACI 440.2R-08. Tra le pubblicazioni delle commissioni giapponesi istituite dalla JSCE si menziona il documento del 2001 dal titolo "Recommendations for upgrading of concrete structures with use of continuous Fiber Sheet" contenente un utile compendio di applicazioni reali di laminati FRP per il rinforzo strutturale. Si segnala inoltre lo studio sugli FRP condotto in Canada dalla CSA (Canadian Standards Association) che ha portato al documento CAN/CSA-S6-02 ("Design and Construction of Building Components with Fiber Reinforced Polymers"). A livello europeo, rimanendo sul tema degli FRP, si cita il documento pubblicato dalla fib (Federation Internationale du Bèton) nel luglio 2001 (fib Bulletin 14): "Design and Use of Externally Bonded Fibre Reinforced Polymer Reinforcement".

I sistemi di rinforzo FRCM, essendosi diffusi successivamente rispetto agli ormai classici compositi fibrorinforzati FRP, sono supportati da minore letteratura in campo internazionale. Si richiamano i criteri di accettazione statunitensi (ACI 434 – Acceptance Criteria for Masonry and Concrete Strengthening Using Fiber-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) Composite Systems) e le linee guida di progetto (RILEM TC 250-CSM & ACI 549 – Guide to Design and Construction of Externally Bonded Fabric-Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) and Steel Reinforced Grout (SRG) Systems for Repair and Strengthening Masonry Structures).

In Italia lo strumento legislativo attualmente vigente per la progettazione edilizia è quello delle Norme tecniche per le costruzioni 17/01/2018, nelle quali non è espressamente analizzato l'utilizzo dei sistemi FRP e FRCM. Nel Capitolo 8.6 delle stesse, però, si sottolinea citando la normativa che "...possono altresì essere utilizzati materiali non tradizionali, purché nel rispetto di normative e documenti di comprovata validità di cui al Capitolo 12."¹⁸.

Da cui al Capitolo 12 si evidenzia, come anticipato nel paragrafo precedente, che:

(...) possono essere utilizzati i documenti di seguito indicati che costituiscono riferimenti di comprovata validità:

- 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.)¹⁹.

Con queste precisazioni, sono qui riportati documenti italiani attualmente di riferimento e orientamento per i professionisti:

- Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice polimerica (FRP) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti (Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Luglio 2015);

- 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, Luglio 2018);
- 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).

1.4 Alcuni studi scientifici di FRCM a temperature elevate

1.4.1 Lavoro svolto dall'Alma Mater Studiorum - UniBo

Francesca Ferretti et al.²⁰ hanno valutato l'effetto di un aumento della temperatura sul comportamento a trazione di vari sistemi FRCM. Hanno eseguito 90 prove di trazione su 6 diversi sistemi compositi, realizzati con matrice a base di calce o cemento accoppiati con fibre in acciaio, fibre in basalto e fibre di vetro. Precisamente hanno utilizzato 3 diverse matrici: una a base cementizia da loro rinominata CEM e due a base calce rinominate NHL1 e NHL2. E 5 diversi tipi di fibre: acciaio inossidabile (S), basalto con 3 diverse densità (B1, B2, B3) e vetro (AG). Le combinazioni studiate sono state S-CEM, S-NHL1, B1-NHL1, B2-NHL2, B3-NHL2, AG-NHL2 e per ogni combinazione sono stati confezionati 15 provini di

lunghezza 500 mm e spessi 10 mm, mentre la larghezza era funzione del numero di yarn all'interno dei provini (60 - 64 mm).

Le proprietà meccaniche delle sole matrici le hanno determinate attraverso prove di laboratorio standard, quindi per ogni matrice sono stati fatti 3 provini prismatici di dimensione $160 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$, lasciati maturare per 28 giorni, quindi sottoposti a prova di flessione su tre punti a temperatura ambiente (22°C) e successivamente di compressione. Per indagare l'effetto della temperatura sulla resistenza a flessione hanno svolto prove di flessione anche alle temperature di 50°C e 80°C . I campioni sono stati inseriti all'interno di una camera termica con una velocità di riscaldamento di 30°C/h e il test è iniziato subito dopo il raggiungimento della temperatura target. Da questo test hanno notato che le malte a base di calce NHL1 e NHL2 sono caratterizzate da una progressiva riduzione di resistenza a flessione all'aumentare della temperatura, effetto che è meno evidente nelle malte cementizie (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.

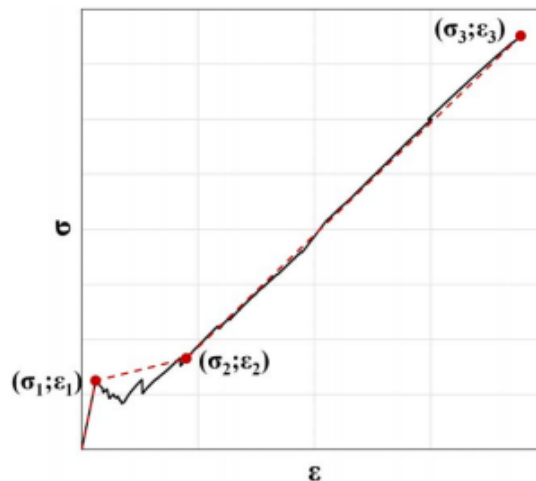


Fig. 9 – Comportamento trilineare della prova di trazione – UniBo.

La sperimentazione ha mostrato che i test di esposizione a lungo termine (360 min) e a breve termine (5 min) che hanno eseguito all'interno della camera termica hanno portato a risultati abbastanza simili anche alla temperatura di 80°C. Pertanto, 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.

1.4.2 Lavoro svolto dall'Università della Calabria - UniCal

Luciano Ombres et al.²¹ hanno svolto un'indagine sperimentale sull'adesione tra giunti FRCM–muratura esposti a diversi valori di temperatura. Hanno svolto prove di distacco dal supporto (single shear test), queste sono state condotte su provini di mattoni in laterizio rinforzati con diversi sistemi FRCM (2 tipologie di rinforzo in basalto, acciaio e PBO). Prima del test, i campioni sono stati esposti alle temperature: 20°C (temperatura ambiente), 100°C, 150°C, 200°C. I provini sono stati esposti a temperatura costante per 3 ore, quindi sono stati rimossi dal forno e lasciati raffreddare liberamente e testati a temperatura ambiente.

Hanno testato 20 campioni formati da strisce composite incollate, per una lunghezza di 300 mm, ai prismi in muratura per studiare la caratteristica di adesione FRCM-muratura.

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).

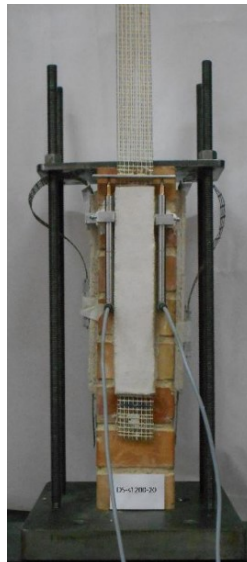


Fig. 10 – Setup di prova single shear test – UniCal.

I valori di carico di picco P sono stati misurati mediante la macchina, mentre i valori di sollecitazione di picco σ sono stati determinati dall'equazione:

$$\sigma = \frac{P}{n b t}$$

Dove, $b t$ è l'area della sezione trasversale di un fascio di fibre longitudinali, n è il numero di fasci di tessuti nella direzione longitudinale.

Dai risultati hanno evidenziato 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.

2. MATERIE PRIME E PREPARAZIONE

Le matrici studiate in questo lavoro sono quattro: due sono le matrici geopolimeriche create in laboratorio (R1 FAK, R1 MKK), le altre due sono matrici che sono facilmente trovabili in commercio (Geolite 40, Geocalce Multiuso). Ciò ci servirà per fare un confronto in termini meccanici e deformativi.

2.1 Matrici commerciali

Come matrici commerciali di confronto sono state usate due miscele di malte a base di geolite e geocalce di marca Kerakoll (Fig.11). Come indicato sulle confezioni, è stata semplicemente aggiunta acqua alle polveri, circa 0.9 l di acqua per 5 kg di Geolite 40 (classe R4) e circa 1,1 l di acqua per 5 kg di Geocalce multiuso (classe R1). Prossimamente, per semplificazione, nomineremo CEM i provini preparati con Geolite 40 e CAL i provini preparati con Geocalce multiuso.



Fig. 11 – Geolite 40 a sinistra, Geocalce Multiuso a destra, Kerakoll.

2.2 Matrici Geopolimeriche

Come introdotto precedentemente, le tipologie di materie prime necessarie per la produzione di geopolimeri sono le 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 ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) prodotta dalla cottura di argille contenenti caolino in un intervallo di temperatura compreso tra 600-900°C (processo di calcinazione: procedimento preposto alla decomposizione termica di un composto chimico, tramite un riscaldamento protratto per il tempo). E' la materia prima più reattiva durante il processo di geopolimerizzazione poiché a causa della sua particolare coordinazione cationica, è più facilmente aggredito da soluzioni alcaline e di conseguenza risulta essere altamente reattivo. La sua reattività dipende sia dalle caratteristiche intrinseche del caolino di partenza sia dal grado di deidrossilazione, che è funzione della tecnologia di produzione, cioè del tipo di forno e della temperatura di calcinazione che si può definire il maggior discriminante relativo alla qualità del metacaolino finito. Essa influenza il grado di deidrossilazione, e di conseguenza lo stato di reattività dell'alluminosilicato, proprietà fortemente ricercata in questo tipo di leganti. La deidrossilazione del caolino inizia sopra i 500°C formando il metacaolino, che ha un intervallo di stabilità compreso tra i 600°C e i 900°C. Non tutti i metacaolini, pertanto, reagiscono allo stesso modo o portano a prodotti analoghi durante il processo di geopolimerizzazione. Il processo chimico può essere riassunto nella seguente equazione:



La polvere di metacaolino utilizzata per questa sperimentazione è il MetaStar 501 (Fig. 12 e Fig. 13). A differenza di altri materiali pozzolanici come fumi di silice, ceneri volanti e scorie d'altoforno, il metacaolino MetaStar 501 non scurisce le applicazioni a base di cemento bianco o grigio. Questo metacaolino, può reagire con il sottoprodotto della calce libera dell'idratazione del cemento Portland per formare prodotti cementizi di silicato di calcio e alluminato di calcio, che possono comportare una durabilità complessiva migliorata.



Fig. 12 – Polvere di metacaolino usato nella sperimentazione.

METACAOLINO	
COMPONENTE	CONTENUTO IN MASSA [%]
SiO ₂	55
Al ₂ O ₃	40
Fe ₂ O ₃	0.6
K ₂ O	2.4
MgO	0.4
CaO	< 0.1
Na ₂ O	< 0.1

Tab. 1 –Costituenti metacaolino MetaStar 501.

2.2.1.2 Cenere volante

Le ceneri volanti si ottengono come sottoprodotto della combustione di carbone polverizzato nelle centrali termoelettriche. Sono costituite dal solido particellare che viene separato dai fumi di combustione per mezzo di filtri elettrostatici o meccanici. A causa delle elevate temperature a cui si formano (circa 1400 °C), le impurità minerali presenti nel carbone (quarzo, pirite, argilla, ecc.) fondono, formando piccole goccioline che poi, trascinate fuori dalla caldaia dai fumi, subiscono un brusco raffreddamento e solidificano sotto forma di microparticelle di forma sferoidale che presentano una struttura in prevalenza vetrosa (silice amorfa) e quindi reattiva. Le ceneri volanti dal punto di vista chimico, sono costituite in prevalenza da silice, allumina e ossido di ferro Fe_2O_3 , tutti composti che reagiscono a temperatura ambiente con la calce generando prodotti di idratazione del tutto simili a quelli che si ottengono durante l'idratazione del cemento Portland.

Le ceneri volanti si presentano come una polvere di colore grigio, costituita da particelle sferiche il cui diametro è compreso tra 1 e 100 μm , e area superficiale specifica tra 3000 e 6000 cm^2/g . Le particelle possono esser piene, o più spesso porose, e la loro forma sferica favorisce la lavorabilità e la pompabilità dell'impasto. Alcuni vantaggi dell'utilizzo della cenere volante, unitamente al cemento Portland, sono un minor sviluppo di calore in fase di idratazione dell'impasto (per via del minore dosaggio percentuale di cemento Portland), una maggiore impermeabilità del manufatto (per via del minore contenuto di idrossido di calcio), e una maggior fluidità dell'impasto a parità di acqua (con conseguente potenziale aumento delle resistenze meccaniche del prodotto finale). Vantaggi a cui va aggiunto il minor impatto ambientale generato dall'utilizzo di questo materiale di scarto, in sostituzione del cemento Portland, come materiale da costruzione²².

La UNI EN 197-1, del 2011, stabilisce i criteri di conformità di questo alluminosilicato nel

suo utilizzo in ambito edilizio. In particolare, suddivide le polveri di cenere volante in due classi distinte:

- Le ceneri volanti di natura calcica, o di classe C, sono il residuo della combustione della lignite e dei carboni sub-bituminosi. Contengono silice, allumina e ossido di calcio che ne influenza la reattività e deve essere contenuto nelle polveri in quantità maggiori del 5% in massa. Nel caso superi il 15% della massa totale dell'alluminosilicato, contribuisce ad aumentare le proprietà meccaniche dei composti.
- Le ceneri volanti di natura silicea, o di classe F, sono residui della combustione di carboni bituminosi o dell'antracite, ed è l'unica tipologia di cenere attualmente disponibile in Italia. Sono formate da una polvere finissima costituita da silice reattiva (che deve essere maggiore o uguale del 25% in massa del prodotto), allumina, e una quantità di ossido di calcio inferiore al 5% in massa. Sono le polveri più utilizzate nella produzione di calcestruzzi e che è stata usata anche per questo lavoro (Fig.13 e Tab.2).

Le ceneri non conformi alla UNI EN 450, possono comunque essere utilizzate come filler, conformemente a quanto stabilito dalla UNI EN 12620:2013.



Fig. 13 - Polvere di cenere volante 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.

2.2.1.3 Cemento alluminoso

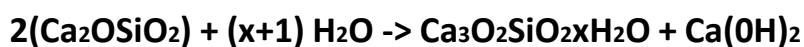
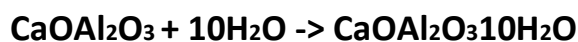
Il cemento alluminoso, anche detto cemento di alluminato di calcio o cemento fuso (dal francese “ciment fondu” Fig. 14) viene solitamente utilizzato per definire cementi principalmente costituiti da alluminati idraulici di calcio per la produzione di calcestruzzi altamente performanti a breve stagionatura, resistenti alle alte e basse temperature e agli attacchi chimici. Viene, inoltre, utilizzato per la produzione di cementi additivati, allo scopo di ottenere manufatti dalle elevate resistenze iniziali e ad espansione controllata.

Viene realizzato fondendo una miscela composta da un materiale calcifero (solitamente ossido di calcio da calcare) e un materiale alluminoso (solitamente bauxite, o allumina, nel caso si vogliano ottenere cementi particolarmente refrattari) a temperature che si attestano attorno ai 1600°C. Poi la miscela raffreddata viene opportunamente macinata allo scopo di ottenere il prodotto finito.



Fig. 14 - Polvere di cemento alluminoso usato nella sperimentazione.

Durante l'idratazione del cemento alluminoso vengono prodotti alluminati di calcio idrati esagonali e gel di allumina, secondo le reazioni:



La trasformazione degli alluminati di calcio idrati esagonali in alluminati di calcio idrati cubici (che occupano un volume inferiore rispetto ai precedenti) comporta un aumento della porosità del composto realizzato con questo tipo di cemento, con un conseguente abbattimento delle resistenze meccaniche dello stesso. Per questo motivo, le normative italiane ed europee vietano l'utilizzo del cemento alluminoso nella produzione di calcestruzzi armati²³.

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 Soluzioni Alcaline

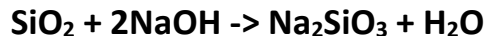
Come accennato, la soluzione alcalina ha il compito di innescare la reazione geopolimerica e lo sviluppo dei processi di indurimento. Può essere definita come una soluzione acquosa di idrossidi e di silicati alcalini, i quali, variando in tipologia e quantità, influiscono sul pH e sulla tipologia di cationi presenti nella soluzione finale, e, di conseguenza, sul livello di reattività del mix e sulle sue proprietà meccaniche. È stato dimostrato che, all'aumentare del pH della soluzione alcalina, si ottengono impasti geopolimerici meno viscosi, più lavorabili e maggiormente performanti dal punto di vista meccanico ^{24 25}. Migliori prestazioni si ottengono anche dall'utilizzo di cationi di maggiori dimensioni, che offrono anche una maggiore refrattarietà al preparato finale ^{26 27 28}. Gli attivatori alcalini maggiormente utilizzati in sperimentazione sono i silicati di sodio o di potassio in soluzione acquosa, a cui vengono aggiunti i relativi idrossidi, al fine di correggere il rapporto molare SiO₂/M₂O (con M uguale a Na o a K), a seconda della tipologia di alluminosilicato utilizzata e del tipo di reattività che si desidera ottenere. Una maggior presenza di acqua nella soluzione provoca

una diminuzione delle resistenze meccaniche, e un aumento della porosità del composto.

Nelle sperimentazioni di questa tesi 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 (o metasilicato 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 neutre o basiche, mentre nelle soluzioni acidereagisce, fino a formare acido silicico. La parte basica del composto è fornita dall'ossido di sodio (Na_2O), la parte acida dall'anidride silicica (SiO_2). Per la sua produzione in fase liquida vengono versati soda caustica, sabbia di quarzo e acqua in un serbatoio di miscelazione, e, grazie a un reattore e all'introduzione del vapore della miscela, si ottiene la reazione:



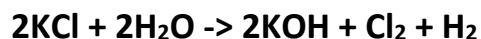
Le caratteristiche e la composizione della soluzione di silicato di sodio utilizzata in questa tesi sono descritte in seguito (Tab. 4).

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
Denistà 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

Anche noto come “potassa caustica” (KOH), trova largo impiego per via della sua propensione a reagire con gli acidi e per via della sua natura corrosiva. Rispetto all'idrossido di sodio NaOH, è dotato di una minore solubilità in acqua. Viene prodotto tramite il processo cloro-alcali, ovvero tramite il processo cloro-potassa. La sintesi avviene secondo la reazione:



Per la produzione delle soluzioni di idrossidi utilizzate in questa tesi contenenti KOH, è stata utilizzata una soluzione di potassa caustica ad alta concentrazione (50% in massa di solidi di KOH, 50% in massa di acqua), ovvero con molarità 12M, opportunamente diluita con ulteriore acqua distillata, a seconda della concentrazione di idrossido ricercata nella soluzione alcalina. Nella seguente tabella (Tab. 5) sono riportate le proprietà chimico-fisiche dell'idrossido di potassio.

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 sabbia

L'inerte utilizzato nelle seguenti sperimentazioni è la sabbia Esincafce 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 stata aggiunta 3.4% in peso di acqua. Vedere Allegato per la scheda tecnica.



Fig. 15 – Sabbia usata nella sperimentazione.

2.2.4 Mix design

Per poter procedere alla realizzazione delle malte geopolimeriche è necessario determinare i dosaggi necessari all'impasto. Per Mix design si intende il “progetto della miscela”, più precisamente il “calcolo della composizione del materiale a partire dalle prestazioni richieste (lavorabilità, resistenza meccanica, durabilità, ecc.) e dalle caratteristiche delle materie prime disponibili”. Non esiste un codice di calcolo esatto per ottenere la miscela ottimale, dunque il mix-design si basa per lo più su correlazioni sperimentali. Le malte sono state così classificate in base alle loro caratteristiche meccaniche allo stato indurito, secondo la norma UNI EN 1504:2006. Tale norma (nella parte III) fornisce un accurato sistema di classificazione delle malte (a seconda che si tratti di malte strutturali o non strutturali),

classificandole in R1, R2, R3, R4 a seconda delle caratteristiche meccaniche, di aderenza, ecc. In particolare, per quanto riguarda la caratterizzazione meccanica a compressione, si definiscono malte:

- 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 $R_c \geq 45 \text{ MPa}$

Nel caso in esame, come illustrato in tabella (Tab. 6), sono stati effettuati due tipi di miscele per la realizzazione dei due tipi di matrici geopolimeriche. Si tratta di un'operazione delicata e precisa nella quale sono state miscelate tutte le componenti della miscela finale, che indurendosi e interfacciandosi con l'inerte, contribuisce a formare un sistema monolitico. Il comportamento della malta è inevitabilmente influenzato dalla tipologia e dalla qualità delle materie prime e dal loro differente 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 per un litro per la creazione delle miscele geopolimeriche.

2.3. Rete di rinforzo in basalto

Il sistema di rinforzo usato per una delle due tipologie di provini è il Glasstex Struktura BA 420 (Fig. 16), è una rete strutturale biassiale 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. Le fibre di basalto sono fibre inorganiche di origine naturale, quindi eco-sostenibili. Presentano proprietà meccaniche costanti anche 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 microfilati di acciaio Inox ed eccellenti prestazioni meccaniche per il trattamento con resina a base acquosa.

Le caratteristiche geometriche e quelle meccaniche con i valori di resistenza e densità sono riportate nella scheda tecniche della ditta fornitrice dei materiali (Tab. 7).

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.

Per il lavoro svolto è stata calcolata anche la sezione resistente del singolo filo di rinforzo:

$$\text{Sezione resistente singolo filo} = \frac{66.67 \text{ mm}^2/\text{m}}{50 \text{ fili}/\text{m}} = 1.33 \text{ mm}^2/\text{filo}$$

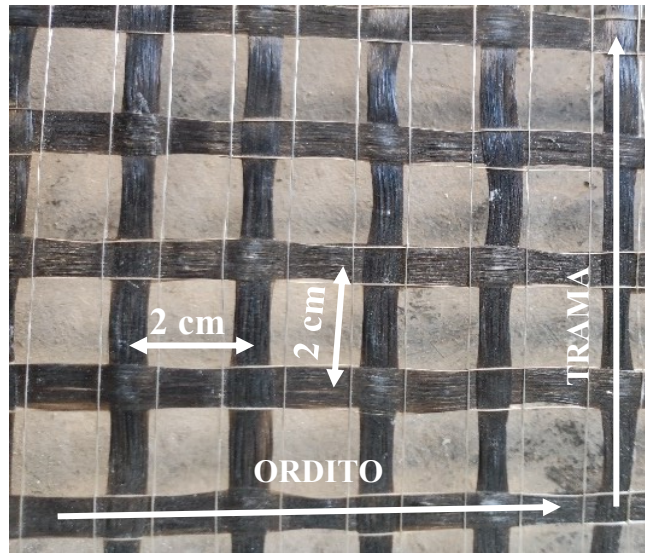


Fig. 16 – Rinforzo in basalto usato nella sperimentazione

2.4 Preparazione

Di seguito verrà fornita una descrizione dettagliata delle procedure di realizzazione dei casseri, dei getti, e quindi dei campioni per le diverse prove effettuate per la determinazione dei valori caratteristici dei materiali.

2.4.1 Tipologia di casseri

Per la realizzazione dei getti e per le successive prove sui campioni sono stati realizzati casseri di vario tipo e dimensioni. In particolare:

2.4.1.1 Casseri 16 x 4 x 4 cm³

I casseri di queste dimensioni sono stati realizzati con elementi in ferro, assemblabili tra loro in modo da formare per ogni cassero 3 provini diversi. Per le matrici commerciali, gli elementi sono stati poi ricoperti da un sottile strato di disarmante liquido (Fig. 17), mentre per le matrici geopolimeriche sono stati ricoperti da uno strato di scotch da pacchi (Fig. 18). Questo per facilitare la fase di scassero.

Una parte di questi casseri è stata usata anche per fare provini 16 x 4 x 4 cm³ con termocoppia di tipo K per il monitoraggio in forno a 200°C.



Fig. 17 – Casseri in metallo 16 x 4 x 4 cm³ con disarmante per provini di malta commerciale.



Fig. 18 – Casseri in metallo 16 x 4 x 4 cm³ con scotch per provini di malta geopolimerica.

2.4.1.2 Casseri 38 x 6 x 1 cm³

I casseri di queste dimensioni sono stati realizzati con dei listelli in legno fissati su un tavolato, anch'esso in legno, con dei chiodi. Anche questa tipologia di casseri è stata bagnata con del disarmante liquido per le matrici commerciali (Fig.19) e ricoperti di scotch da pacchi per le matrici geopolimeriche (Fig. 20).



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



Fig. 20 – 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 nella stessa maniera dei 38 x 6 x 1 cm³ ma sono stati usati per fare provini con termocoppie di tipo K annegate all'interno per il monitoraggio del materiale in forno (Fig. 21).



*Fig. 21 – Casseri in legno 19 x 4 x 1 cm³
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).

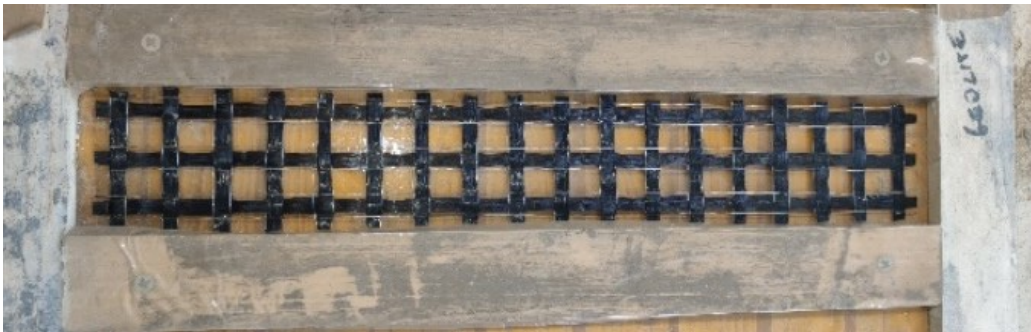


Fig. 22 - Rete in basalto per provini $38 \times 6 \times 1 \text{ cm}^3$ (3 yarn).



Fig. 23 - Rete in basalto per provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ con termocoppia (2 yarn).

2.4.3 Getti

Per la realizzazione dei getti sono state predisposte precedentemente le soluzioni attivatrici composte da silicato di sodio, idrossido di potassio e acqua per le matrici geopolimeriche. Le quantità necessarie sono state pesate in laboratorio tramite una bilancia di precisione 10^{-2} g in quattro contenitori differenti (Fig. 25) per avere un controllo maggiore sulle quantità e per una maggiore manovralita in fase di mescolamento con le polveri. (Vedi Tab. 6 paragrafo 2.2.4 Mix design)



Fig. 24 – Silicato di sodio (a sinistra) e idrossido di potassio (a destra) usati nella sperimentazione.



*Fig. 25 – Bilancia di precisione usata nella sperimentazione a sinistra;
Contenitori con le soluzioni attivatrici a destra*

Successivamente si è passati al dosaggio delle polveri:

- Cenere volante e cemento alluminoso per la miscela R1 FAK;
- Metacaolino per la miscela R1 MKK
- Geolite 40 per la miscela rinominata CEM
- Geocalce multiuso per la miscela rinominata CAL

Alle matrici R1 FAK e R1 MKK è stata poi aggiunta sabbia in condizioni sature a superficie asciutta (3.4% di acqua rispetto al peso secco della sabbia). (Vedi Tab. 6 paragrafo 2.2.4 Mix design)

Una volta definite e preparate le componenti solide e liquide, sono state mescolate tra loro rispettando il progetto di mix design (Tab. 6 paragrafo 2.2.4 “Mix design”) per le matrici geopolimeriche e seguendo le indicazioni d’uso riportate nelle schede tecniche per le matrici commerciali. E’ stato utilizzato un miscelatore elettrico (Fig. 26) per malte per rendere il materiale il più omogeneo e adatto all’utilizzo possibile con aggiunta di un certo quantitativo di acqua durante il mix. Il getto di tutte le miscele è stato fatto con rapidità, soprattutto per le matrici geopolimeriche che già dopo pochi minuti avevano iniziato il processo di polimerizzazione.



Fig. 26 – Miscelatore elettrico usato nella sperimentazione.

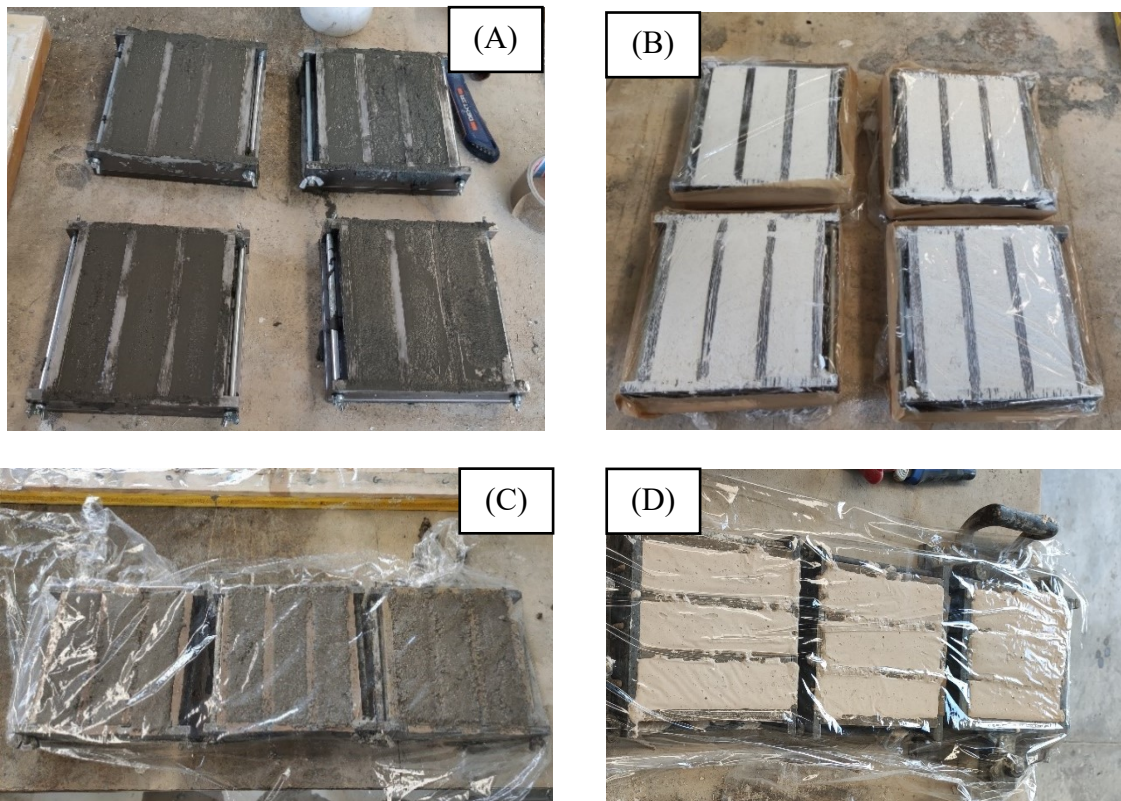


Fig. 27 :
(A) Provini 16 x 4 x 4 cm³ in geolite 40 (CEM);
(B) Provini 16 x 4 x 4 cm³ in geocalce multiuso (CAL);
(C) Provini 16 x 4 x 4 cm³ in cenere volante e cemento alluminoso (FAK);
(D) Provini 16 x 4 x 4 cm³ in metacaolino (MKK).

Per i provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ (Fig. 27) il getto è stato relativamente rapido, mentre per la preparazione dei provini di dimensione $38 \times 6 \times 1 \text{ cm}^3$ c'è stato il bisogno di gettare in due fasi successive (Fig. 28 e Fig.29). Nella prima fase è avvenuta la stesura di mezzo centimetro di matrice, quindi è stata inserita la rete di rinforzo in basalto e infine è stata coperta, sempre con matrice, fino al bordo del cassero.

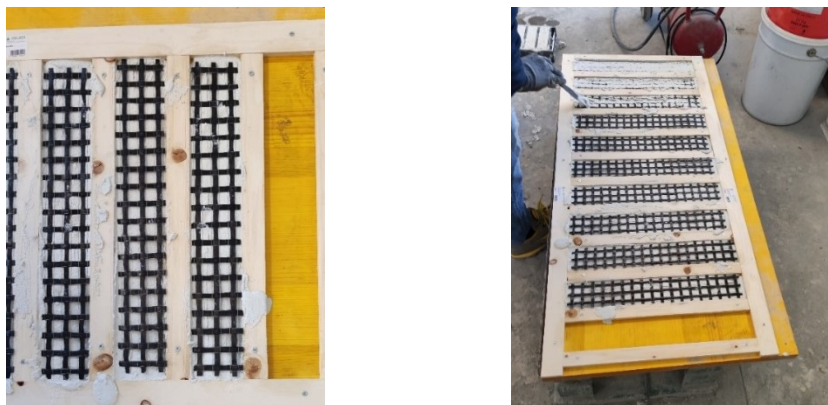


Fig. 28 – Fase di stesura del primo strato di malta e successiva posa della rete di rinforzo.

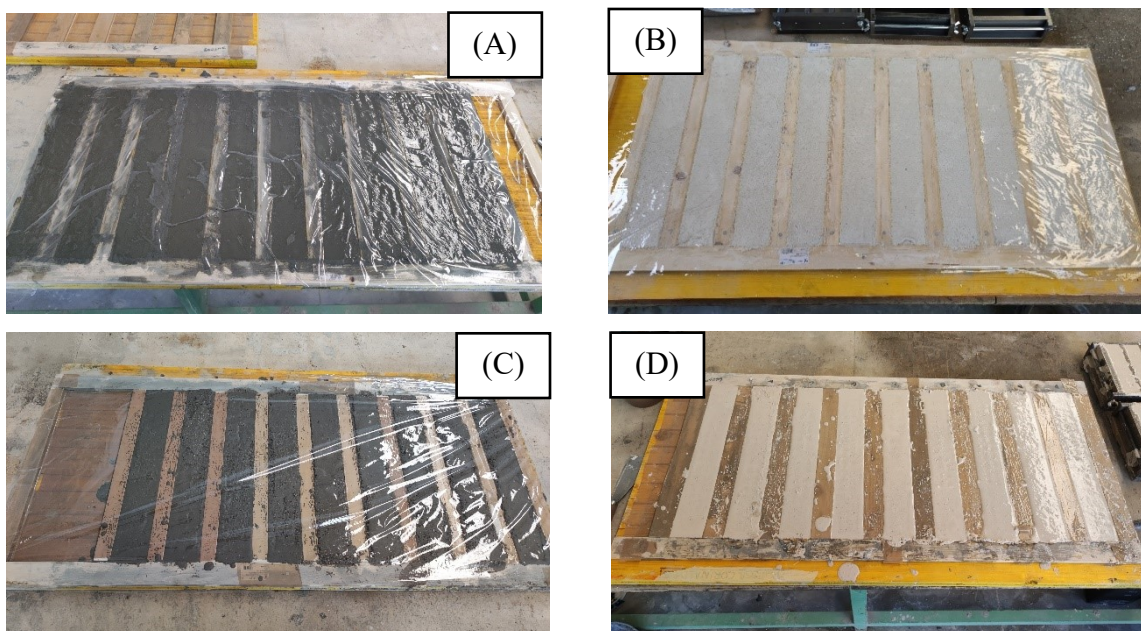


Fig. 29 :

- (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).

Gli stessi procedimenti sono stati usati per i provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ e $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ a cui è stata aggiunta una termocoppia (Fig. 30 e Fig.31). Precisamente sono stati fatti 4 provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ (uno per ogni matrice) e 12 provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ (3 per ogni matrice) per monitorare il loro comportamento ai valori di temperatura del forno di 200°C , 400°C e 600°C .

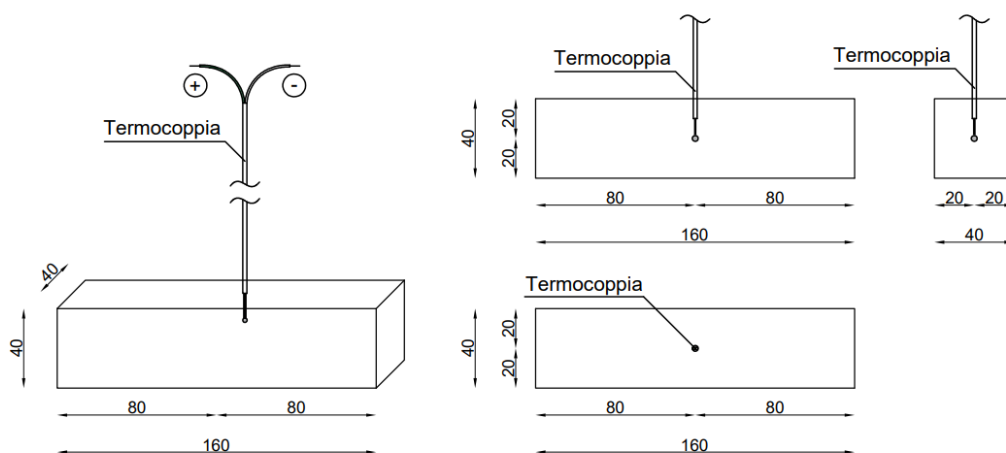


Fig. 30 – Provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ (in figura in mm^3) con termocoppia.

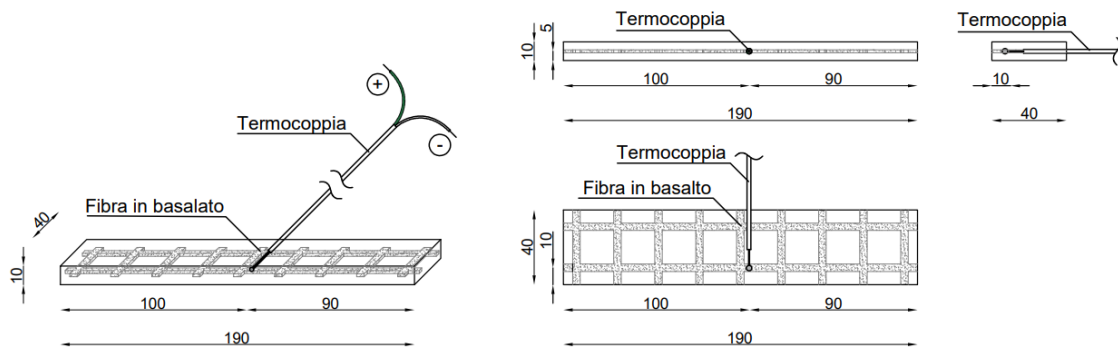
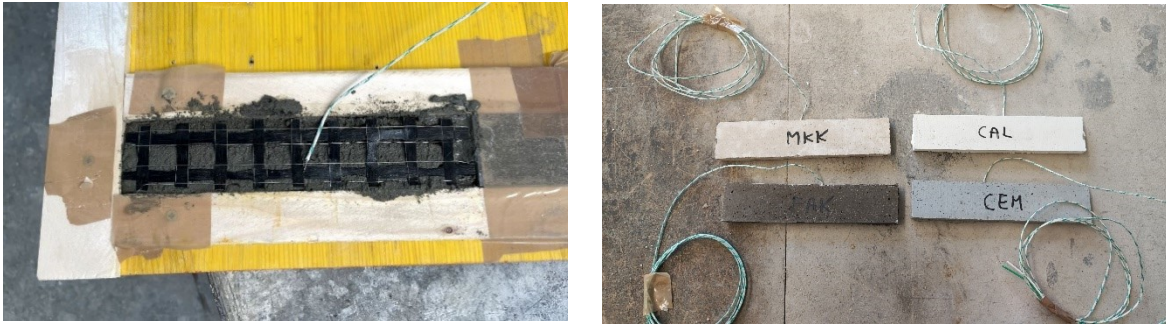


Fig. 31 Provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ (in figura in mm^3) con termocoppia.

Tutti i casseri sono stati poi posti per almeno un minuto sopra una tavola vibrante (Fig. 32) per eliminare il più possibile le bolle d'aria createsi durante la miscelazione / getto e infine ricoperti con pellicola trasparente per limitare al massimo l'evaporazione di acqua e la creazione di efflorescenze (Fig. 33).

I provini sono stati scasserati dopo un giorno e nuovamente ricoperti con della pellicola trasparente, quindi sono stati lasciati a maturare a temperatura ambiente per almeno 28 giorni.



Fig. 32 – Tavola vibrante usata nella sperimentazione.



Fig. 33 – Efflorescenze causate dall'esposizione all'aria di una malta geopolimerica in sperimentazioni passate.

I provini $38 \times 6 \times 1 \text{ cm}^3$ hanno avuto un'ulteriore passaggio, infatti questi sono stati tagliati con una sega circolare (Fig. 34) per ottenere le stesse dimensioni dei provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$. 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. 35). Quest'ultimi verranno usati per future analisi al microscopio che non verranno trattate in questa tesi.



Fig. 34 – Sega circolare per il taglio dei provini $38 \times 6 \times 1 \text{ cm}^3$.

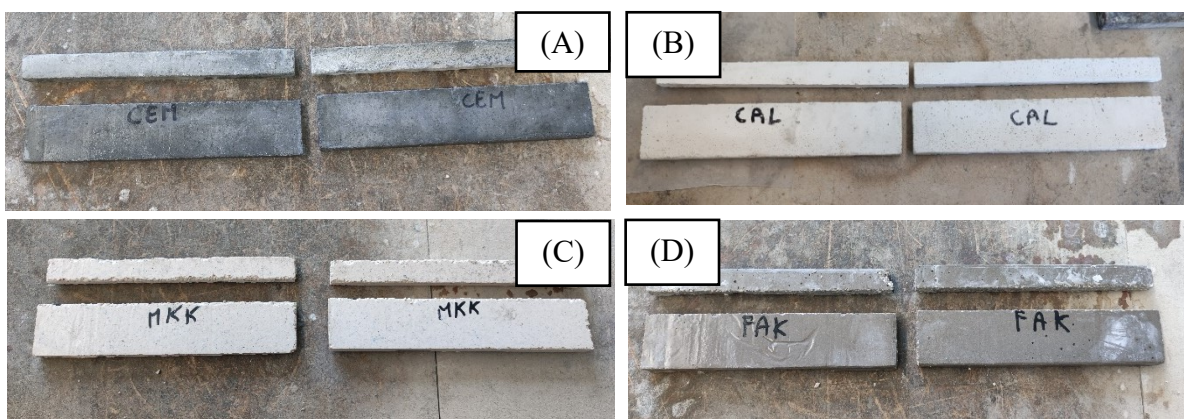


Fig. 35:

- (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.

Riassumendo, i provini da testare meccanicamente in questa tesi sono:

- 8 provini x 4 matrici = 32 provini di dimensione $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ da testare a flessione e compressione e tramite sonda ultrasonica (8 provini CEM, 8 provini CAL, 8 provini FAK, 8 provini MKK).
- 12 provini x 4 matrici = 48 provini con fibra in basalto di dimensione $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ da testare a trazione. (12 provini CEM, 12 provini CAL, 12 provini FAK, 12 provini MKK).

2.5 Cottura in forno elettrico a muffola

Raggiunto il tempo di maturazione, i provini sono stati esposti alle alte temperature (200°C, 400°C, 600°C) tramite l'utilizzo di un forno elettrico a muffola (Fig. 36). A causa della limitata capacità di riscaldamento del forno, non si è potuto seguire le curve di incendio standard (ISO 2012) che impongono una velocità di riscaldamento che superano i 150°C/min, ma si è optato per la velocità massima raggiungibile dal forno che è di circa 10°C/min. Ulteriori dettagli saranno dati nel Paragrafo 3.2 “Prova di esposizione alle alte temperature”.

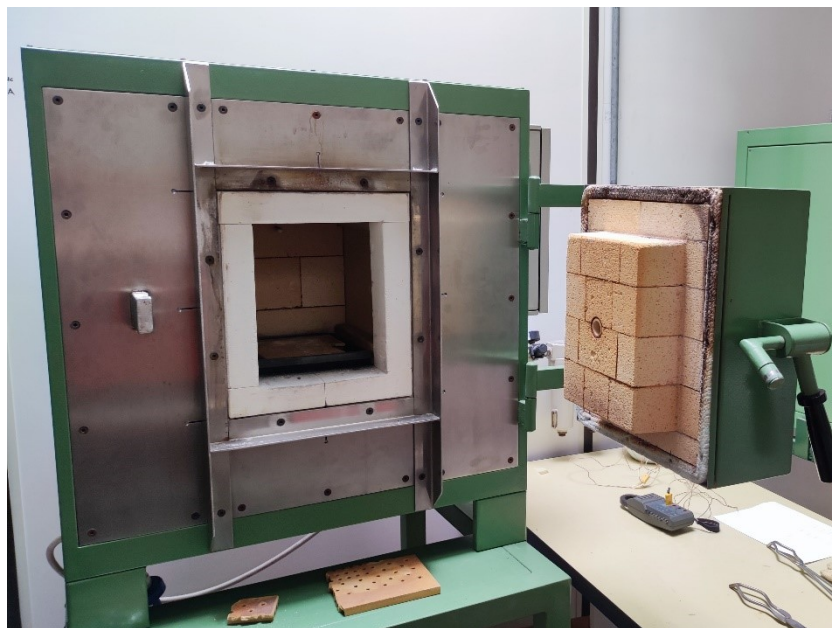


Fig. 36 – Forno elettrico a muffola usato nella sperimentazione.

3. METODI DI PROVA

3.1 Prova di spandimento

Nel momento del getto, si è presa una parte di ogni matrice per effettuare le prove di spandimento per la determinazione del valore di fluidità della malta fresca tramite tavola. La prova consiste nel misurare il diametro di spandimento di ogni matrice posta all'interno di uno stampo troncoconico con misure standardizzate dopo 15 scosse di tavola vibrante come descritto dalla normativa UNI EN 1015-3:2007 (Fig. 37).

Lo stampo troncoconico in bronzo ha dimensione standardizzate: altezza 60 mm, diametro alla base 100 mm e diametro in sommità 70 mm.

La procedura è la seguente:

1. Si posiziona lo stampo troncoconico al centro del disco della tavola a scosse
2. Si introduce la malta in due strati, ciascuno dei quali deve essere assestato mediante 10 brevi colpi di pestello, quindi rimuovere l'eccesso di malta
3. Dopo circa 15 secondi, sollevare lentamente lo stampo in direzione verticale
4. Spargere la malta sul disco facendo vibrare la tavola a scosse per 15 volte, un colpo al secondo.
5. Misurare il diametro della malta in due direzioni perpendicolari l'una all'altra e calcolare una media.

Di seguito è riportata la tabella (Tab. 8) da normativa che definisce la consistenza in base al diametro misurato dopo la prova.

Consistenza all'atto	Valore dello scorrimento
	[mm]
Malta rigida	<140 mm
Malta plastica	Da 140 mm a 200 mm
Malta tenera	>200 mm

Tab. 8 – Tabella come da normativa UNI EN 1015-3:2007.



Fig. 37 – Tavola a scosse e stampo troncoconico come da normativa UNI.

3.2 Prova di esposizione alle alte temperature

Passati i 28 giorni di maturazione dei provini, questi sono stati esposti a diverse temperature per poi esser testati nelle successive prove di caratterizzazione fisico-meccanica.

Per le diverse temperature si è proceduto in vario modo:

- Temperatura ambiente: i campioni dopo i 28 giorni di maturazione non hanno ricevuto alcun trattamento termico.

- Temperatura di 200°C: i campioni sono stati messi all'interno del forno a temperatura ambiente (Fig. 38), quindi è stata impostata una rampa di riscaldamento del forno di 20 minuti (il forno raggiungerà la temperatura target in 20 minuti, velocità di riscaldamento di circa 10°C/min) per poi mantenerla costante per 2 ore. Passate le due ore il forno è stato spento e lasciato raffreddare 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 dopo circa 40 minuti (rampa di riscaldamento del forno 400°C in 40 minuti).
- Temperatura di 600°C: uguale ai 200°C e ai 400°C ma la temperatura target è stata raggiunta dopo circa 1 ora di attesa (rampa di riscaldamento del forno 600°C in 1 ora).



Fig. 38 – Disposizione dei provini in forno per la cottura a 200°C (medesima disposizione per le cotture a 400°C e 600°C).

Durante questo processo di cottura abbiamo monitorato la temperatura dei provini attraverso i campioni con termocoppia di tipo K annegata all'interno della matrice. I dati sono stati raccolti tramite l'utilizzo di un registratore a cui sono state collegate le termocoppie (Fig. 39).



*Fig. 39 – Registratore di dati a sinistra;
Esempio di collegamento di due termocoppie a destra.*

Alla fine di tutto il processo avevamo:

- 2 campioni $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ per ogni matrice e per ogni temperatura (32 provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ totali) in cui verranno svolte la prova sonica, la prova di flessione e di compressione (Fig.40).
- 3 campioni $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ per ogni matrice e per ogni temperatura (48 provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ totali) con cui verranno svolte le prove di trazione (Fig. 40).
- 1 Campione $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ con termocoppia di tipo K per ogni matrice testato a 200°C , 400°C e 600°C (4 provini totali testati a tutte le temperature).

- 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 (4 provini totali che verranno testati a tutte le temperature).
- 1 campione $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ con termocoppia di tipo K per ogni matrice testato solamente a 400°C (4 provini totali).
- 1 campione $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ con termocoppia di tipo K per ogni matrice testato solamente a 600°C (4 provini totali).
- Campioni $19 \times 2 \times 1 \text{ cm}^3$ che non verranno trattati in questa tesi (Fig. 40).

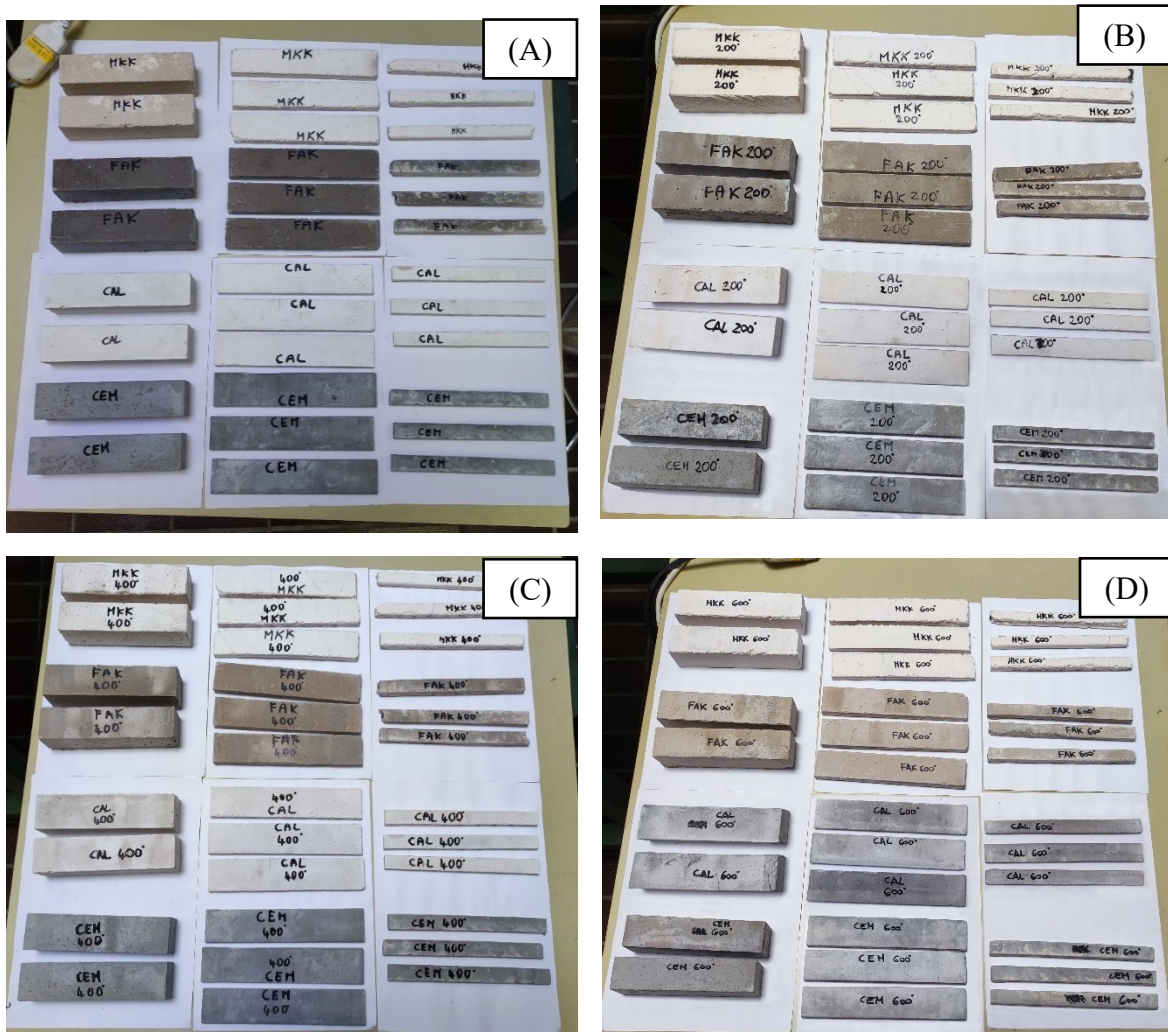


Fig. 40 – Campioni alle varie temperature studiate:

- (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 .



Fig. 41- Ispezione visiva dei campioni dopo il trattamento termico, Formazione di fessure in un provino CAL 600°C a sinistra, Imbarcamento dei provini MKK 600°C a destra.

3.3 Prova ultrasonica

Dopo l'avvenuta maturazione dei provini (28 giorni) e il successivo trattamento termico in forno a muffola, tutti i provini 16 x 4 x 4 cm³ sono stati sottoposti a prova ultrasonica per la determinazione del modulo elastico dinamico.

In tale metodo si sfrutta la relazione tra il modulo elastico dinamico E_d del materiale e la velocità V con la quale le onde ultrasoniche, applicate con una frequenza di 50 kHz, lo attraversano, come espresso dalla formula:

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

- V è la velocità delle onde espressa in m/s
- E_d indica il modulo di elasticità dinamico in N/m²;
- ρ è la massa volumica del materiale espressa in kg/m³;
- 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.

Lo strumento è composto da due sonde, una trasmittente che manda l'onda ultrasonica, una ricevente che prende il segnale e lo rimanda al lettore di dati.

Prima di ogni misura, lo strumento è stato tarato a $25,3 \mu\text{s}$ (Fig. 42) tramite l'utilizzo di un cilindro centrale con funzione di calibro.

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).

Essendo la misura influenzata dalla scabrosità della superficie del materiale, si è provveduto all'interposizione di uno strato di grasso tra le facce dei trasduttori e quelle del provino, in modo da garantire la qualità del contatto con il materiale da testare.

In generale si rilevano riduzioni della velocità di propagazione quando nel materiale sono presenti zone di disaggregazione, lesioni e bolle d'aria.



Fig. 42 – Calibrazione dello strumento e misura delle onde ultrasoniche su un provino $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$.

3.4 Caratterizzazione meccanica delle malte

Le matrici inorganiche sono state caratterizzate meccanicamente attraverso prove di compressione e flessione su provini di dimensioni $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$, secondo la norma UNI EN 1015-11:2007 (Metodi di prova per malte per opere murarie – Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita). Le matrici sono state testate dopo il periodo di maturazione di 28 giorni e del successivo trattamento termico.

Le prove sono state eseguite con una macchina di trazione/compressione Galdabini da 400 kN (Fig. 44).

3.4.1 Prova di flessione

La prova viene effettuata attraverso 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:

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

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 .

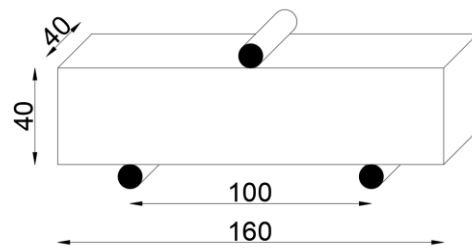


Fig. 43 - Schema della prova di flessione come da normativa UNI EN 1015-11:2007.



*Fig. 44 – Macchina di compressione Galbadini usata nella sperimentazione a sinistra;
Setup di prova a flessione a destra prima e dopo la rottura.*

3.4.2 Prova di compressione

I due spezzoni risultanti dalla prova di flessione sono stati sottoposti a 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. 45 – Setup di prova a compressione.

3.5 Prova di trazione (Tensile Test)

Le prove di resistenza a trazione sono state svolte sui provini in composito di dimensione $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$, ovvero sui provini formati da matrice e rete di rinforzo in basalto. La prova consiste nel sottoporre un provino di forma e dimensioni unificate a uno sforzo continuo e crescente fino alla sua rottura. Il provino, in questo caso di forma rettangolare, viene fissato sulle due estremità alle ganasce del macchinario, mentre nella zona centrale il provino rimane scoperto.

Nelle zone di estremità di presa del provino, sono state incollate su entrambi i lati, tramite una resina bicomponente in rapporto 2:1, delle fasce in fibra di vetro . Queste fasce sono state tagliate con le stesse dimensioni in larghezza dei provini sottoposti alla prova di trazione (Fig. 46)



Fig. 46 – Resina Bicomponente e fibra di vetro usata nella sperimentazione.

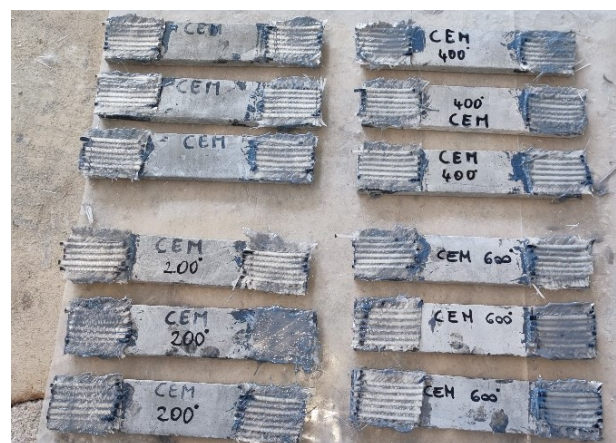


Fig. 47 – Esempio dei provini con estremità in fibra di vetro.

Per eseguire il test a trazione sui campioni è stata utilizzata la macchina di prova a trazione Zwick/Roell Z050 (capacità 50 kN) (Fig. 48). Il carico è stato applicato con modalità a controllo di spostamento con velocità della traversa impostata a 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. 48 – Setup di prova a trazione eseguito con la macchina Zwick/Roell Z050.

Durante l'allungamento nella zona centrale appare un restringimento della sezione (strizione), che insieme alla forma della frattura fornisce indicazioni sulle proprietà tecnologiche del materiale.

Per la costruzione dei grafici sforzo - deformazione rappresentativi del comportamento dei provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^2$ 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 mm^2 , 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 mm^2 pari a 1.33 mm^2 come calcolato al Paragrafo 2.3 "Rete di rinforzo in basalto"

Per calcolare la deformazione invece abbiamo usato la formula:

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

Dove:

- ε_t è la deformazione di trazione adimensionale mm/mm
- l_0 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.

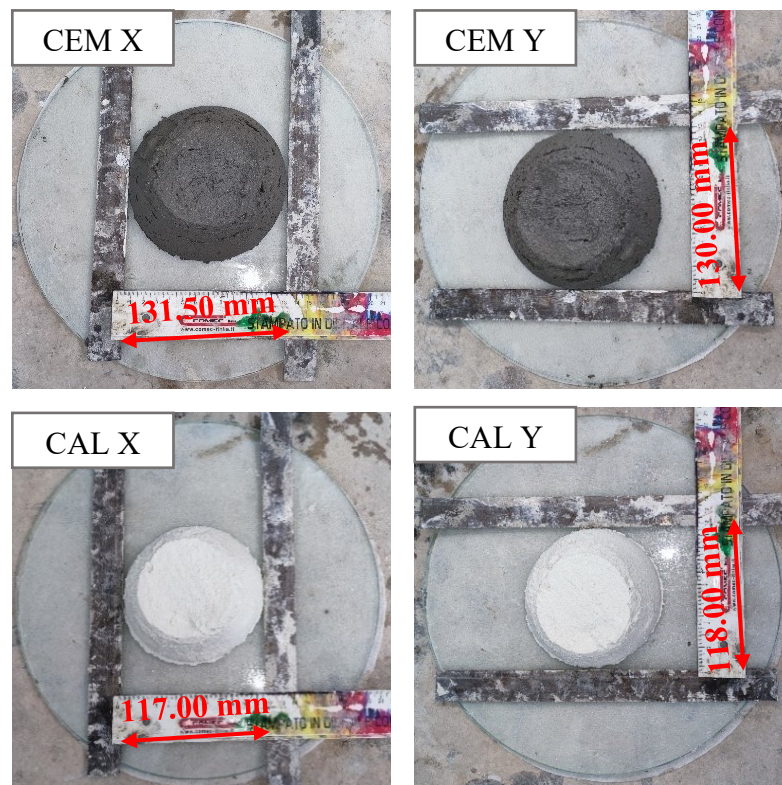
Quindi, calcolato lo sforzo e la deformazione è stato possibile costruire i grafici delle varie prove effettuate.

4. RISULTATI E OSSERVAZIONI

A seguito delle prove effettuate, i dati ottenuti sono stati elaborati e riportati tramite grafici e tabelle, da cui sono state fatte osservazioni e si è cercato di dare delle considerazioni finali sul lavoro svolto. Questi sono stati definiti per ogni tipologia di prova, in cui sono riportate anche eventuali prove non riuscite o test su materiali diversi da quelli oggetto di studio nella presente tesi.

4.1 Consistenza della malta fresca

Il diametro di spandimento è stato misurato nelle due direzioni ortogonali X e Y, per poi dunque fare la media e determinare la consistenza della malta come riportato nella normativa UNI EN 1015-6 e in tabella (Vedi Paragrafo 3.1 “Prova di spandimento”).



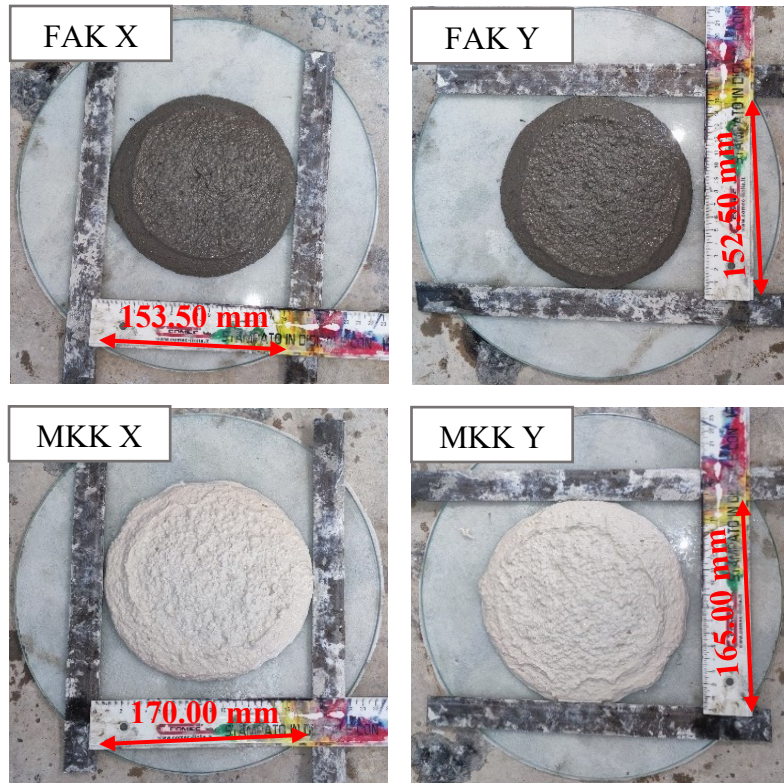


Fig. 49 – Misura dei diametri di spandimento delle malte nelle due direzioni ortogonali.

Materiale	Direzione X / Y	Diametro [mm]	Diametro XY [mm]	Consistenza
CEM	X	131.50	130.75	Rigida
	Y	130.00		
CAL	X	117.00	117.50	Rigida
	Y	118.00		
FAK	X	153.50	153.00	Plastica
	Y	152.50		
MKK	X	170.00	167.50	Plastica
	Y	165.00		

Tab. 9 – Valori dei diametri di spandimento delle malte e definizione di consistenza.

Dal valore della media dei diametri XY (Tab. 9), confrontandoli con i valori da normativa, possiamo notare che le due matrici commerciali hanno un diametro di spandimento minore di 140 mm da risultare matrici con consistenza rigida, mentre le due miscele geopolimeriche

hanno un diametro di spandimento compreso tra i 140 mm e i 200 mm da risultare miscele plastiche. Anche se il valore di consistenza è a favore delle matrici geopolimeriche, durante tutto il periodo di creazione dei provini, le matrici commerciali sono risultate di più facile utilizzo, mentre le matrici geopolimeriche, a causa del rapido processo di geopolimerizzazione, sono risultate molto meno manovrabili

4.2 Monitoraggio in forno elettrico a muffola

Il monitoraggio in forno è l'unica prova che non ha dato i risultati sperati. Durante il monitoraggio dei provini, a causa delle fessure apertesesi alle temperature target di 400°C e 600°C, la termocoppia ha misurato valori molto prossimi a quella del forno. Sintomo che la termocoppia stava misurando la temperatura dell'aria all'interno del forno e non più il comportamento della matrice / composito. Inoltre durante il monitoraggio a 400°C e 600°C, le termocoppie hanno sviluppato una reazione di combustione del rivestimento che ha portato alla formazione di fumi e perdita di granelli di materiale del cavo.

L'unico monitoraggio andato realmente a buon fine è stato quello alla temperatura target di 200°C che non ha riscontrato problemi. Ricordiamo che la temperatura target è stata raggiunta con un carico termico di circa 10°C/min e mantenuta costante per 2 ore.

Qui di seguito sono riportati i test svolti (Tab. 10) e i dati raccolti (Tab. 11-13, Fig. 50-52):

Monitoraggio in forno							
Provinci con termocoppia		Test a temperatura					
n°	Dimensioni [cm ³]	200°C		400°C		600°C	
4	16 x 4 x 4	✓	Fig. 50	✓	Fig. 50	✓	Fig. 50
4	19 x 4 x 1	✓	Fig. 51-52	✓	Fig. 51	✓	Fig. 51
4	19 x 4 x 1	X	-	✓	Fig. 52	X	-
4	19 x 4 x 1	X	-	X	-	✓	Fig. 52

Tab. 10 – Test di monitoraggio in fornsvolti.

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 x 4	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. 11 – Temperature massime raggiunte dai diversi provini 16 x 4 x 4 cm³ con termocoppia che hanno ricevuto il trattamento a tutte le temperature.

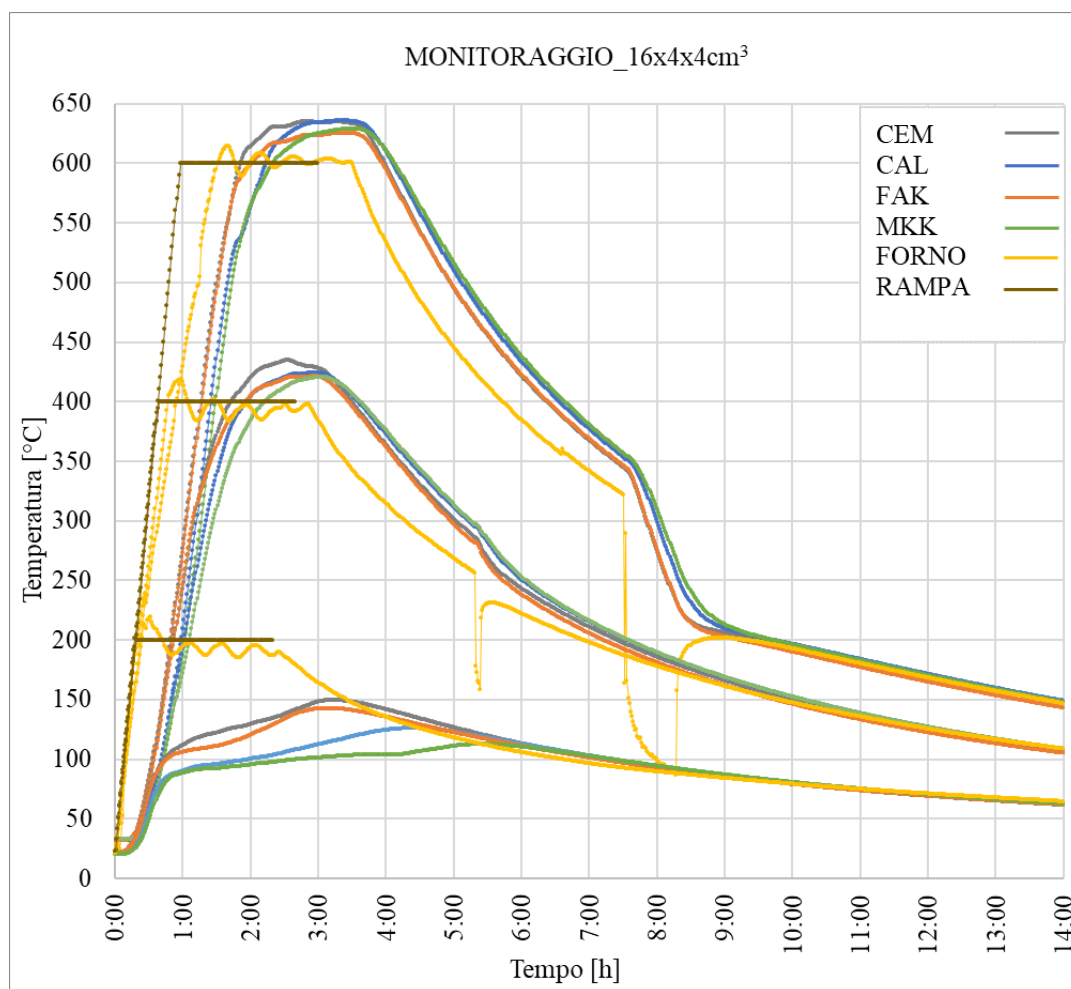


Fig. 50 – Curve di riscaldamento dei provini 16 x 4 x 4 cm³ con termocoppia che hanno ricevuto il trattamento termico a tutte le temperature, curva di riscaldamento del forno e rampa di riscaldamento assegnata.

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	413.43	607.76
	CAL	139.87	414.32	606.89
	FAK	141.47	410.38	605.93
	MKK	139.02	387.58	594.95
Termocoppia libera per monitorare il forno		219.37	418.82	614.49

Tab. 12 - Temperature massime raggiunte dai diversi provini 19 x 4 x 1 cm³ con termocoppia che hanno ricevuto il trattamento a tutte le temperature.

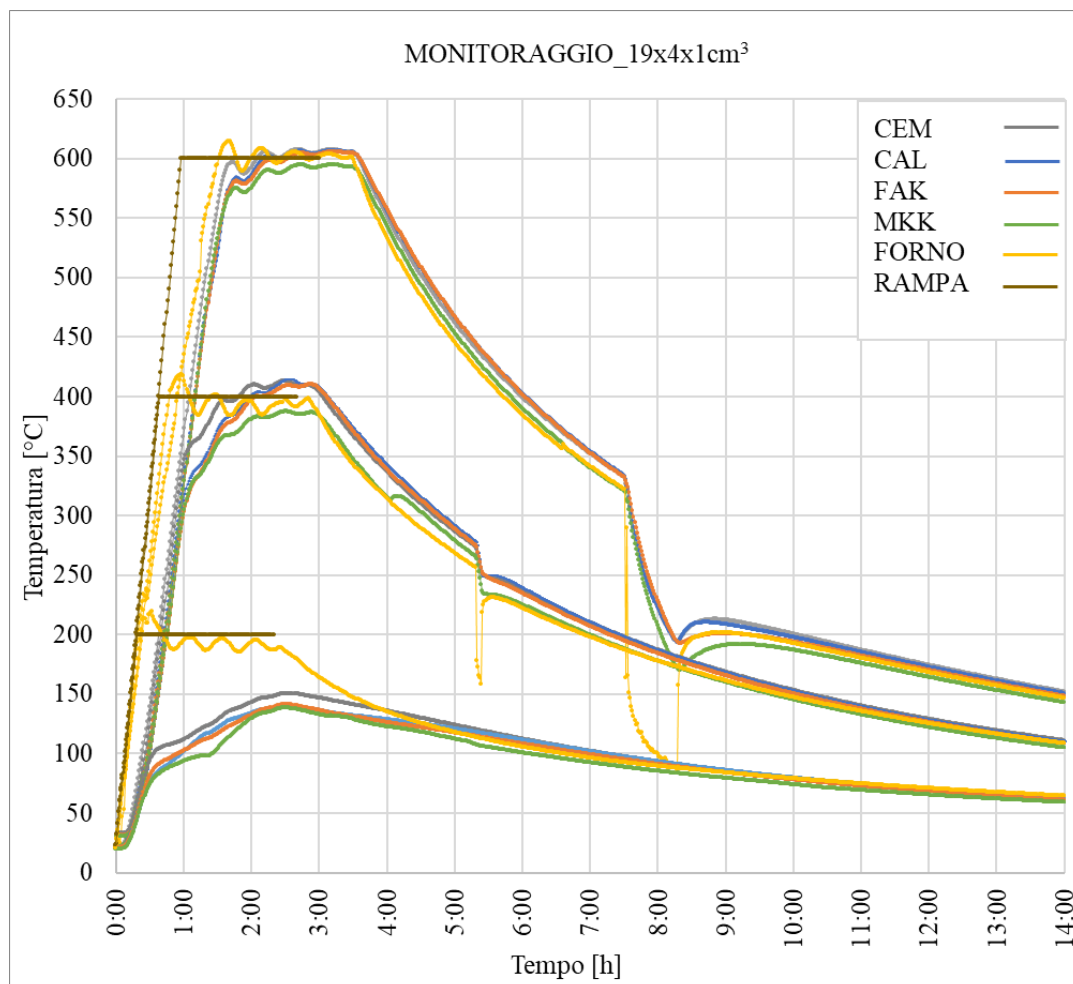


Fig. 51 - Curve di riscaldamento dei provini 19 x 4 x 1 cm³ con termocoppia che hanno ricevuto il trattamento termico a tutte le temperature, curva di riscaldamento del forno e rampa di riscaldamento assegnata.

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. 13 - Temperature massime raggiunte dai diversi provini 19 x 4 x 1 cm³ con termocoppia che hanno ricevuto il trattamento a 200°C, 400°C e 600°C.

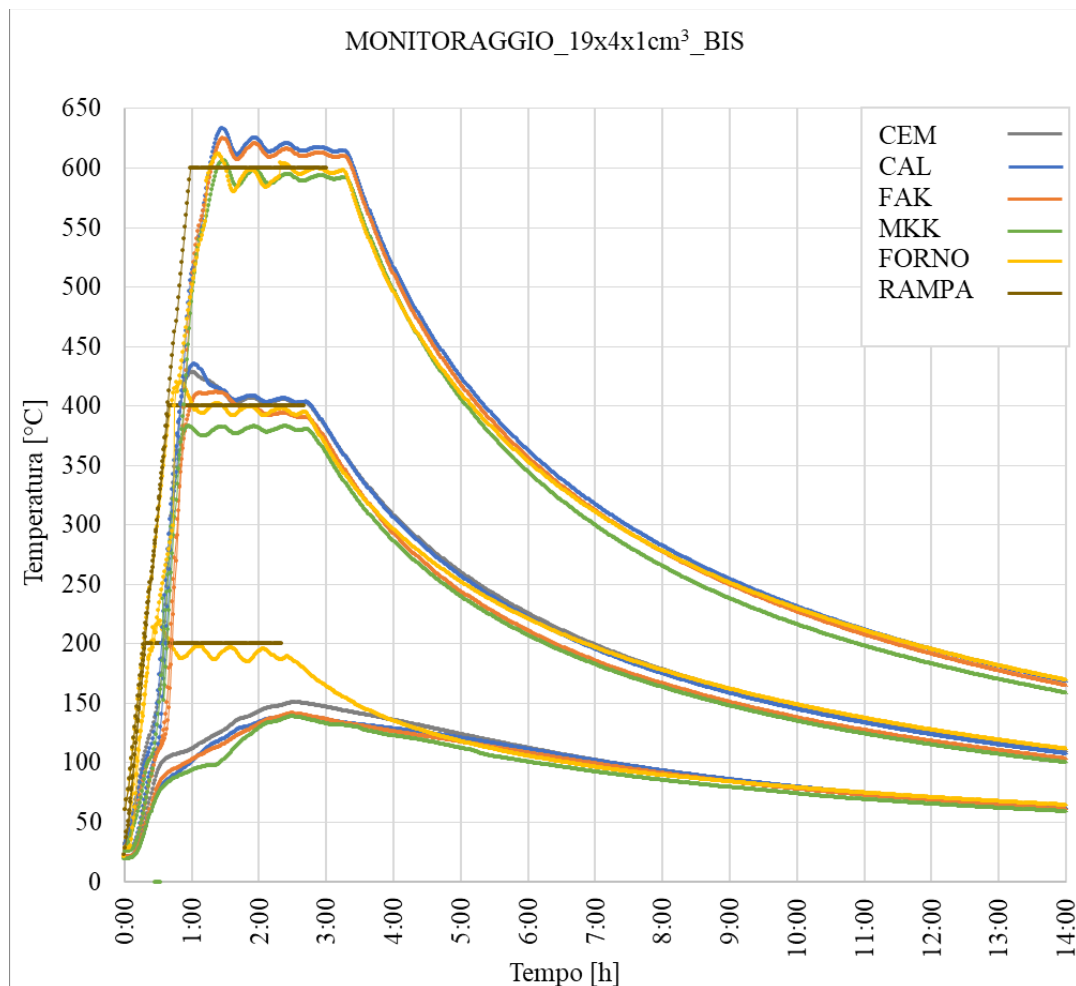


Fig. 52 - Curve di riscaldamento dei provini 19 x 4 x 1 cm³ con termocoppia che hanno ricevuto il trattamento a 200°C – 400°C – 600°C, curva di riscaldamento del forno e rampa di riscaldamento assegnata.

Come possiamo vedere nelle tabelle (Tab. 11-13) e dai grafici (Fig. 50-52), la rampa di riscaldamento del forno non è stata rispettata. La temperatura target è stata raggiunta in intervalli di tempo più lunghi rispetto a quelli di progetto, inoltre notiamo oscillazioni di temperatura di $\pm 20^{\circ}\text{C}$ dopo il raggiungimento della condizione termica impostata.

Se ci concentriamo sulle curve di temperatura con rampa di riscaldamento del forno a 200°C , notiamo che CEM e CAL hanno temperature più elevate di FAK e MKK e quindi le matrici geopolimeriche sembrano essere più isolanti rispetto le controparti commerciali.

Sempre sulle curve di riscaldamento a 200°C , notiamo che tutte le prove hanno dato valori di temperatura minori della temperatura target, diversamente per le temperature di 400°C e 600°C che raggiungono valori anche più elevati della temperatura del forno. Questo è dovuto a ciò che avevamo già anticipato, la formazione di microfessure nei vari provini ha fatto sì che le termocoppie non misurassero più il cuore dei provini, ma l'aria all'interno del forno nelle varie posizioni.

I provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ che hanno ricevuto tutti i trattamenti termici (Fig.50) risentono meno delle oscillazioni di temperatura del forno proprio perché già fessurati, mentre i provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ (Fig. 51-52) seguono maggiormente le variazioni del forno. Quindi la differenza di spessore ha influenzato le diverse risposte dei provini. Questo lo si nota bene se ci focalizziamo sui provini $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ a 200°C CAL e MKK. Questi hanno raggiunto la temperatura al cuore più bassa (rispettivamente 125.95°C e 112.47°C) e se li confrontiamo con la loro controparte in composito $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ vediamo che ci sono differenze di temperature importanti (CAL 139.87°C , MKK 139.02°C). Differenze di dimensioni che non hanno influenzato in modo considerevole i campioni a base CEM e FAK.

In generale, il materiale che ha raggiunto le temperature più elevate è quello a base di geolite (CEM). Si noti che in Tab. 13 manca la temperatura massima raggiunta a 600°C , questo

perché la termocoppia ha dato valori anomali per tutta la durata del monitoraggio. E' da segnalare che il forno è stato aperto durante le prove a 400°C e 600°C a causa della presenza di fumi da combustione del rivestimento delle termocoppie (abbassamenti di temperatura in Fig. 50 e 51 durante le prove a 400°C e 600°C).

Dato il risultato dei monitoraggi a 400°C e 600°C, si è deciso di ripetere la prova in forno con termocoppie ricoperte con materiale più isolante.

4.3 Modulo elastico dinamico

I dati ottenuti tramite la prova ultrasonica (Tab. 14) sono riferiti ad un periodo di stagionatura di almeno 28 giorni dei provini 16x4x4 cm³ 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. 14 – 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.

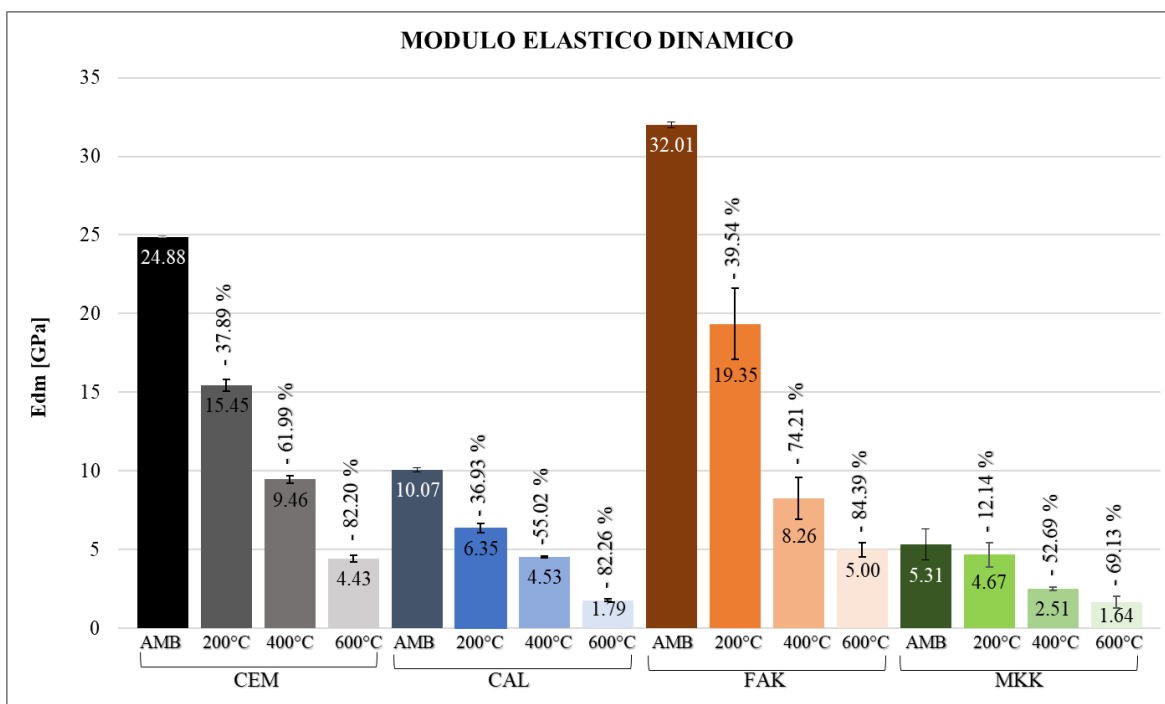


Fig. 53 – Istogramma con moduli elastici dinamici medi per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura, compresi di barre di errore e percentuale di decremento.

A seguito dei risultati ottenuti, si può osservare che le malte che presentano moduli elastici dinamici più elevati sono i CEM e gli FAK. Quest’ultimi in particolare hanno un modulo elastico che risulta maggiore a temperatura ambiente (32.01 GPa contro i 24.88 GPa dei CEM) e a 200°C (19.35 GPa contro i 15.45 GPa dei CEM), per poi allinearsi ai valori dei CEM alle temperature di 400°C (9.46 GPa CEM , 8.26 GPa FAK) e 600°C (4.43 GPa CEM , 5.00 GPa FAK).

I CAL e gli MKK hanno valori di modulo elastico dinamico minori di 10.07 MPa a tutte le temperature. Dato interessante è il modulo elastico dinamico dei provini MKK, che ha i valori più bassi del lotto ma che risente in maniera minore dell’esposizione alle temperature. In generale si può affermare che i risultati ottenuti sono coerenti con le tipologie di malta: moduli dinamici maggiori per malte più performanti come quelle a base di cenere volante e geolite.

4.4 Resistenza a flessione

Di seguito vengono riportate tutte le tabelle con i dati relativi alle prove a flessione svolte sui provini 16 x 4 x 4 cm³ dopo un periodo di stagionatura di almeno 28 giorni. Precisamente si riportano per ogni matrice e 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	Tensione Massima	Tensione Massima Media	Deviazione standard	Coefficiente di variazione
			F _{f,max} [kN]	σ _{f,max} [MPa]	σ _{f,max,m} [MPa]	Dev.st. [MPa]	CV [%]
Ambiente	CEM	A:	4.40	10.31	10.51	0.29	2.72
		B:	4.57	10.71			
	CAL	A:	1.61	3.78	3.82	0.05	1.38
		B:	1.65	3.86			
FAK	A:	5.01	11.73	11.51	0.31	2.71	
	B:	4.82	11.29				
MKK	A:	0.81	1.90	1.78	0.18	10.16	
	B:	0.70	1.65				
200°C	CEM	A:	4.60	10.77	9.83	1.33	13.57
		B:	3.79	8.89			
	CAL	A:	1.50	3.52	4.20	0.97	23.04
		B:	2.08	4.88			
FAK	A:	3.11	7.28	5.84	2.04	34.95	
	B:	1.88	4.40				
MKK	A:	1.32	3.10	2.42	0.97	39.90	
	B:	0.74	1.74				
400°C	CEM	A:	1.76	4.11	4.46	0.50	11.11
		B:	2.05	4.82			
	CAL	A:	1.28	3.01	2.93	0.11	3.72
		B:	1.22	2.85			
FAK	A:	1.50	3.52	2.99	0.75	25.11	
	B:	1.05	2.46				
MKK	A:	0.45	1.05	1.15	0.14	12.22	
	B:	0.54	1.25				

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 [%]
600°C	CEM	A:	1.17	2.75	2.57	0.26	10.25
		B:	1.02	2.38			
	CAL	A:	0.14	0.33	0.30	0.03	10.88
		B:	0.12	0.28			
	FAK	A:	0.84	1.98	2.14	0.23	10.72
		B:	0.98	2.30			
	MKK	A:	0.40	0.94	0.93	0.02	1.79
		B:	0.39	0.91			

Tab. 15 – 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.

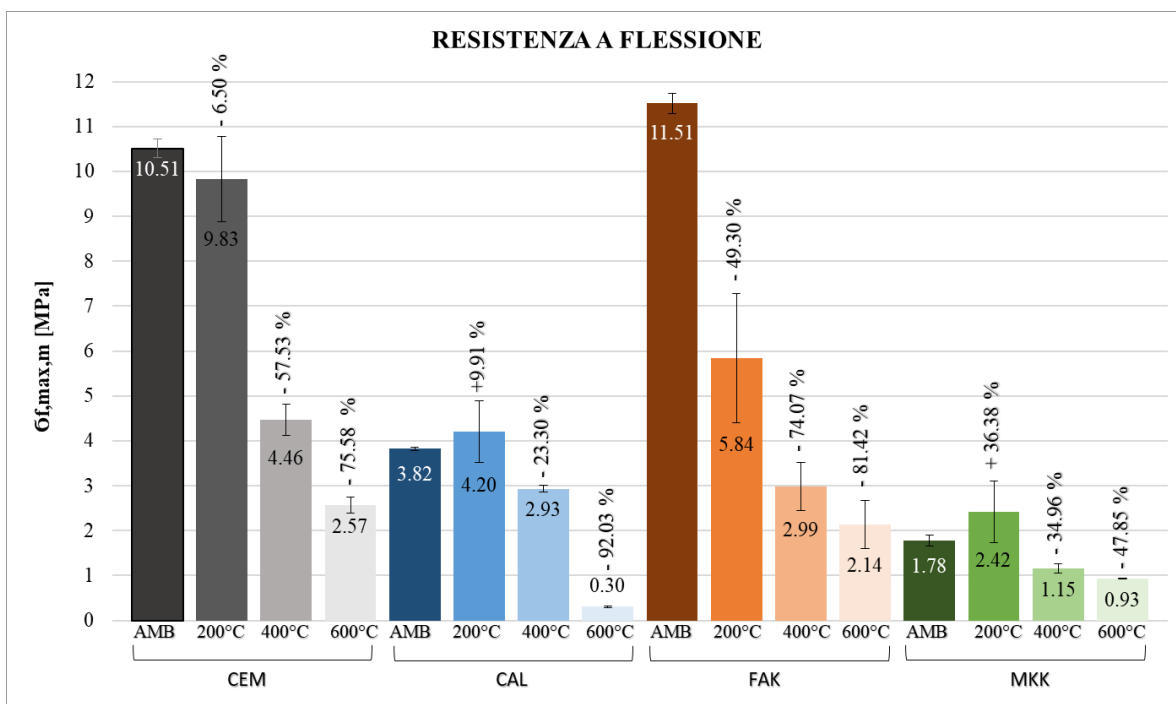


Fig. 54 - Istogramma con valori di resistenza a flessione massima media per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura, compresi di barre di errore e percentuale di decremento / incremento.

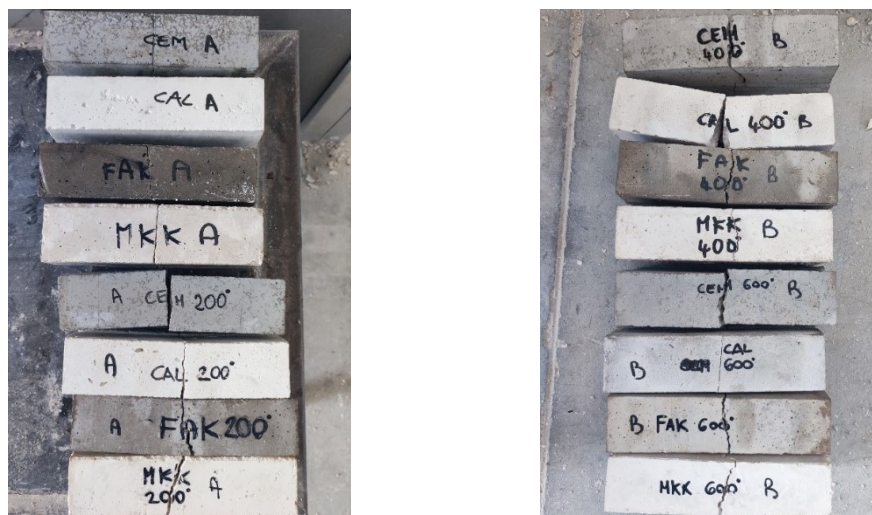


Fig. 55 – Provini dopo l'esecuzione della prova di flessione.

Osservando le figure (Fig. 55), si può notare che tutti i provini sottoposti a flessione, hanno subito lo stesso tipo di rottura, ovvero tipica con frattura netta in mezzeria. Sulla base dell'andamento dei grafici e dei valori ottenuti (Tab. 12 e Fig. 54) si evince che le resistenze a flessione più elevate risultano dai provini CEM e FAK (rispettivamente 10.51 MPa e 11.51 MPa). Dato interessante che i provini FAK hanno un declino della resistenza a flessione maggiore a 200°C (- 49.30%) rispetto ai provini CEM che ne risentono meno (-6.50%). Stessa situazione la rivediamo con i trattamenti termici a 400°C e 600°C ma abbiamo uno scostamento meno evidente (CEM 400°C -57.53% contro FAK 400°C -74.07%, CEM 600°C -75.58% contro FAK 600°C -81.42%).

I provini con resistenza minore sono i CAL a base geocalce e gli MKK a base metacaolino. Da notare è il valore di resistenza a flessione dopo l'esposizione ai 200°C che tende ad aumentare rispetto alle prove che non hanno ricevuto il trattamento termico (CAL AMB 3.82 MPa contro CAL 200°C 4.20 MPa, MKK AMB 1.78 MPa contro MKK 200°C 2.42 MPa) per poi ridiminuire con l'esposizione a 400°C e 600°C (intervallo di valori 3 - 0.3 MPa)

Anche per la flessione i dati sono coerenti, infatti abbiamo valori maggiori per provini CEM e FAK, a base di geolite e cenere volante / cemento alluminoso, e valori minori per provini CAL e MKK, a base di geocalce e metacaolino, con quest'ultimi che guadagnano in resistenza dopo il trattamento in forno a 200°C.

4.5 Resistenza a compressione

Tutti i dati ottenuti dalla prova di compressione, svolte sui due spezzoni ottenuti dalle prove di flessione, sono riportati nelle tabelle e nei grafici seguenti (Tab. 16 e Fig. 56). Anche qui, come per la prova precedente, si riportano per ogni matrice e 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 1/2	Forza	Tensione	Tensione	Deviazione	Coefficiente	
			Massima	Massima	Massima Media			
			$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{c,max}$ [MPa]	$\sigma_{c,max,m}$ [MPa]	Standard Dev.st. [MPa]	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
		A: 2:	66.12	41.33			
	B:	B: 1:	67.43	42.14			
		B: 2:	71.04	44.40			
	CAL	A: 1:	17.16	10.73	10.91	0.44	4.00
		A: 2:	17.17	10.73			
	B:	B: 1:	18.49	11.56			
		B: 2:	16.99	10.62			
	FAK	A: 1:	112.38	70.24	67.55	6.88	10.18
		A: 2:	120.73	75.45			
	B:	B: 1:	95.07	59.42			
		B: 2:	104.17	65.10			
MKK	A: 1:	14.79	9.24	9.82	0.43	4.43	
	A: 2:	15.57	9.73				
B:	B: 1:	16.22	10.14				
	B: 2:	16.27	10.17				
400°C	CEM	A: 1:	49.93	31.21	31.20	0.67	2.15
		A: 2:	51.43	32.14			
	B:	B: 1:	49.11	30.69			
		B: 2:	49.19	30.75			
	CAL	A: 1:	11.72	7.33	8.17	0.58	7.05
		A: 2:	13.36	8.35			
	B:	B: 1:	13.42	8.39			
		B: 2:	13.80	8.62			
	FAK	A: 1:	54.10	33.81	29.92	3.74	12.51
		A: 2:	51.64	32.28			
	B:	B: 1:	44.45	27.78			
		B: 2:	41.31	25.82			
MKK	A: 1:	14.06	8.79	8.35	0.31	3.75	
	A: 2:	13.33	8.33				
B:	B: 1:	13.16	8.22				
	B: 2:	12.89	8.06				
600°C	CEM	A: 1:	30.80	19.25	19.47	2.17	11.12
		A: 2:	36.15	22.59			
	B:	B: 1:	29.10	18.19			
		B: 2:	28.55	17.84			
	CAL	A: 1:	5.54	3.46	2.72	0.56	20.54
		A: 2:	3.99	2.49			
	B:	B: 1:	3.43	2.14			
		B: 2:	4.47	2.79			
	FAK	A: 1:	33.48	20.93	23.37	2.46	10.52
		A: 2:	35.56	22.22			
	B:	B: 1:	42.64	26.65			
		B: 2:	37.90	23.69			
MKK	A: 1:	13.83	8.64	7.78	0.75	9.68	
	A: 2:	13.06	8.16				
B:	B: 1:	11.73	7.33				
	B: 2:	11.20	7.00				

Tab. 16 - Dati ottenuti e rielaborati da prova di compressione per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura.

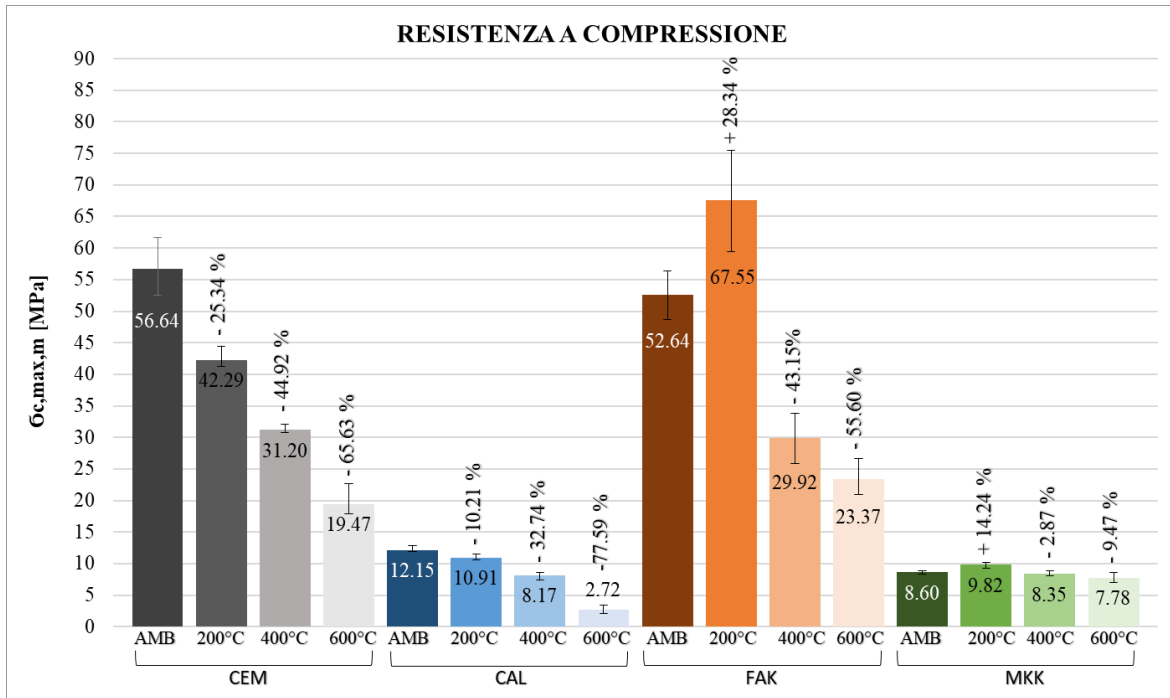


Fig. 56 - Istogramma con valori di resistenza a compressione massima media per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura, compresi di barre di errore e percentuale di decremento / incremento.

Come era prevedibile, anche per la resistenza a compressione abbiamo valori più elevati per i campioni CEM e FAK rispetto ai campioni CAL e MKK. Si osserva una crescita non indifferente della resistenza a compressione dei provini FAK e MKK dopo l'esposizione alla temperatura di 200°C (FAK 200°C 67.55 MPa contro FAK AMB 52.64 MPa, MKK 200°C 9.82 MPa contro MKK AMB 8.60 MPa). Non considerando le resistenze dei provini dopo il trattamento a 200°C, i campioni FAK e CEM hanno valori confrontabili di resistenza dopo l'esposizione ai 400°C e ai 600°C e nei provini che non hanno ricevuto il trattamento termico. Se invece confrontiamo i campioni CAL e MKK, si nota subito che i secondi partono con una resistenza inferiore a temperatura ambiente ma risentono meno del trattamento termico in tutto il range di temperatura studiato (MKK: AMB 8.60 MPa, 200°C 9.82, 400°C 8.35,

600°C 7.78). Al contrario i campioni CAL hanno un declino di resistenza di almeno 2 MPa per ogni temperatura.

Discutibile è il valore di resistenza a compressione FAK 200°C, infatti abbiamo visto avere una diminuzione di resistenza a flessione e di modulo elastico dinamico ma abbiamo un incremento considerevole di resistenza a compressione. Inoltre abbiamo un'ampia barra di errore.

Generalmente 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.

4.6 Resistenza a trazione

Di seguito vengono riportate le tabelle (Tab. 17 – 20) e i grafici (Fig. 57 – 61) con i dati della prova di trazione sui provini 19 x 4 x 1 cm³ rielaborati come descritto al Paragrafo 3.5 “Prova di trazione (Tensile Test)”. 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. 17 - 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.

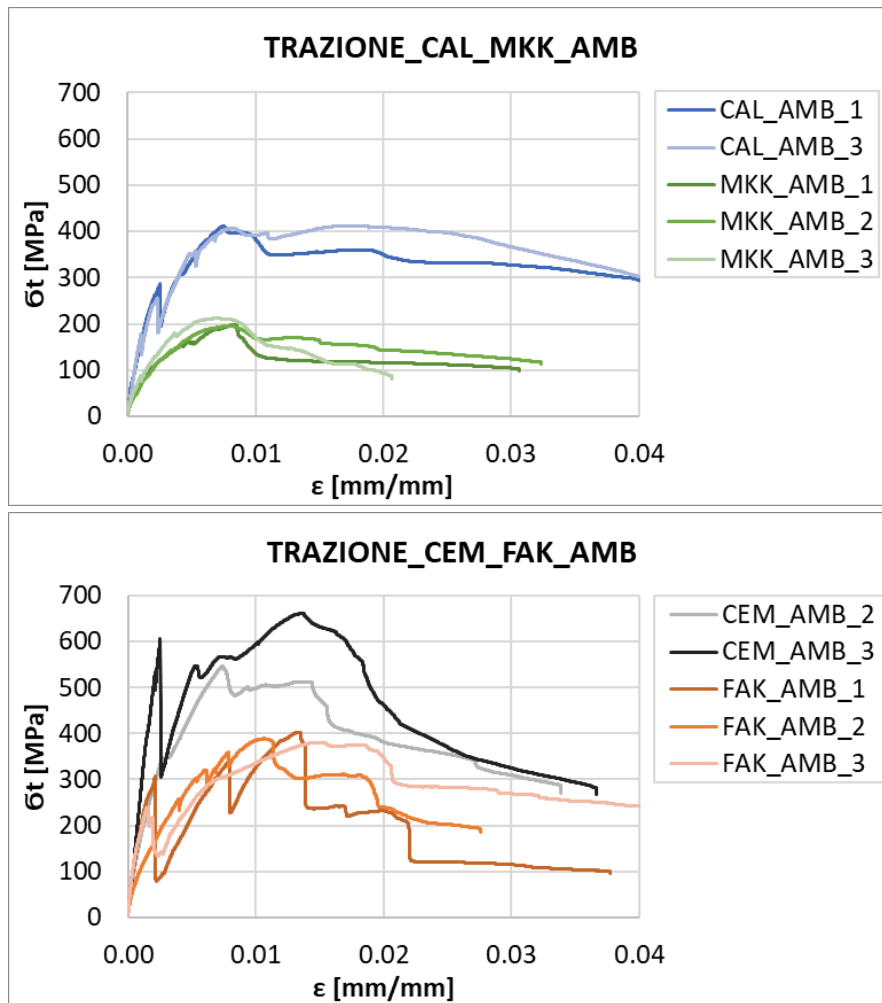


Fig. 57 - Diagrammi Tensione-Deformazione da prova di trazione svolta su provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ che non hanno ricevuto il trattamento termico.

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. 18 - 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.

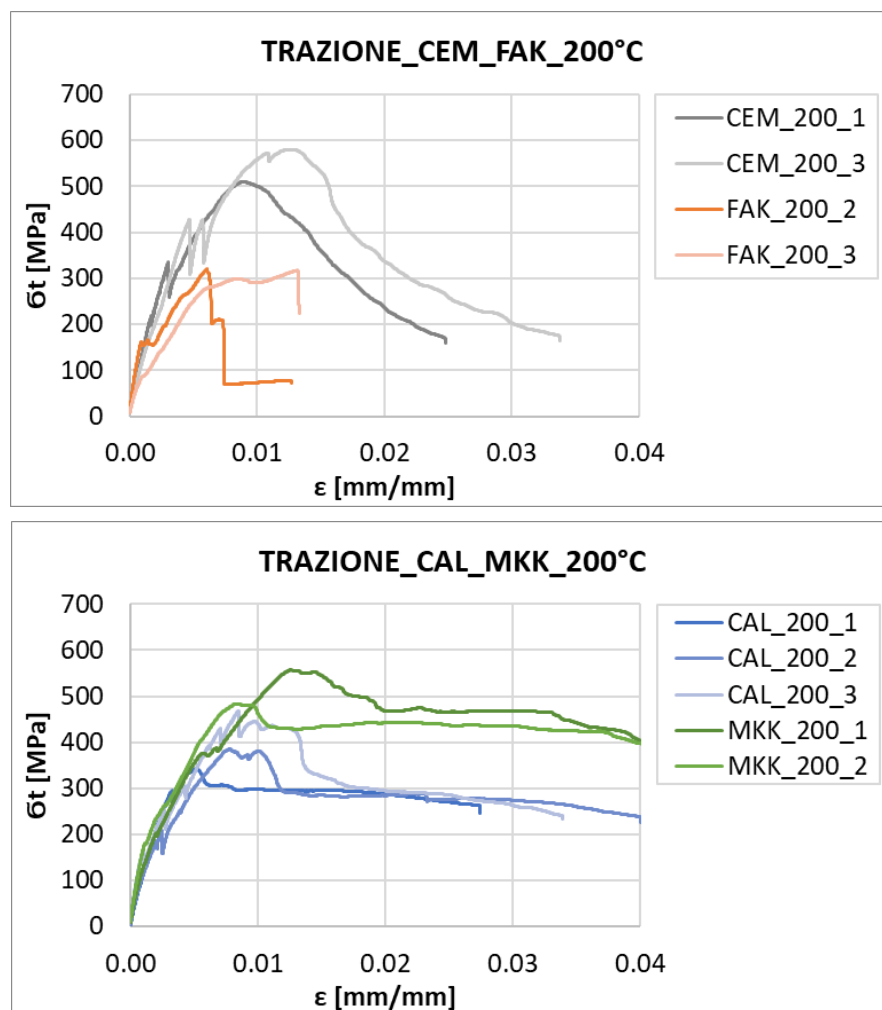


Fig. 58 - Diagrammi Tensione-Deformazione da prova di trazione svolta su provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ che hanno ricevuto il trattamento termico a 200°C.

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. 19 - 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 .

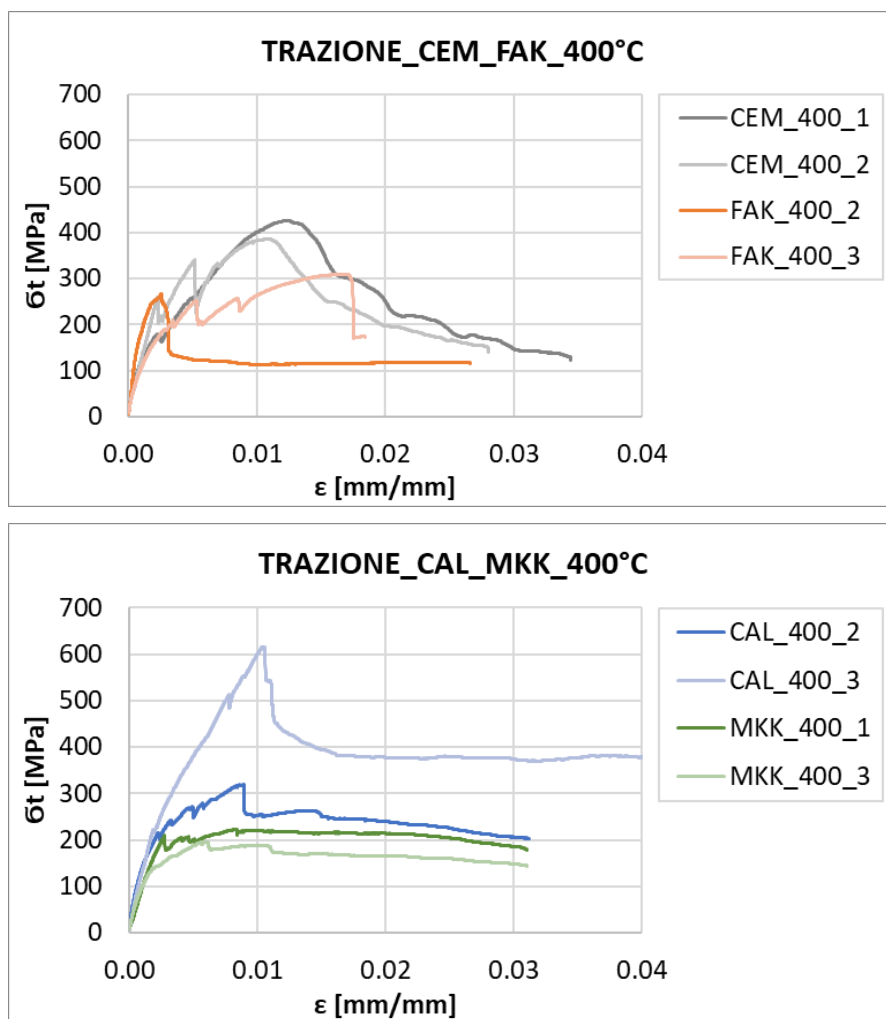


Fig. 59 - Diagrammi Tensione-Deformazione da prova di trazione svolta su provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ che hanno ricevuto il trattamento termico a 400°C .

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. 20 - 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 .

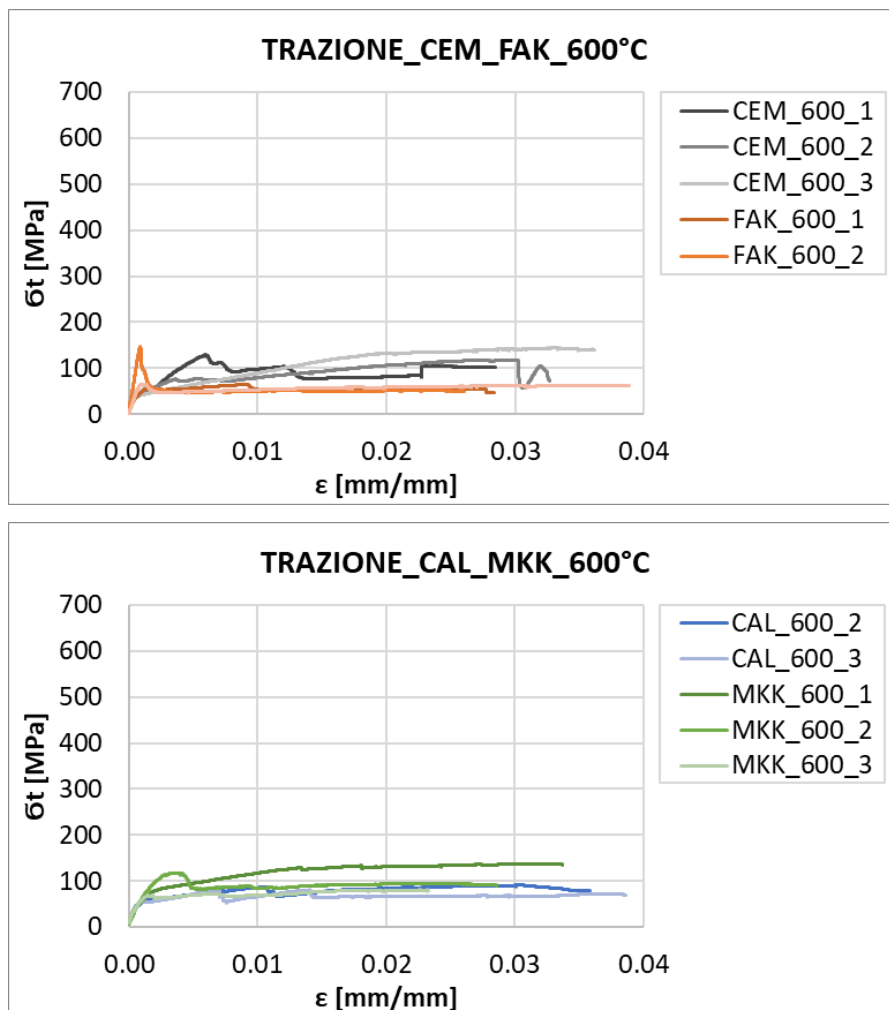


Fig. 60 - Diagrammi Tensione-Deformazione da prova di trazione svolta su provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ che hanno ricevuto il trattamento termico a 600°C .

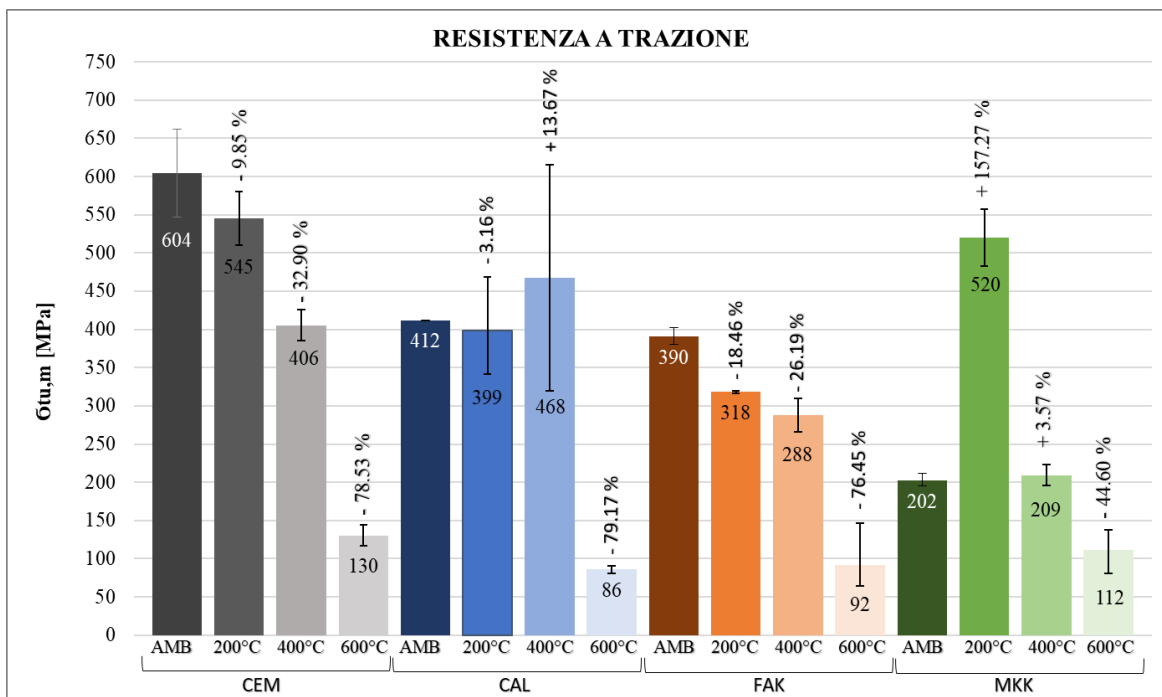


Fig. 61 - Istogramma con valori di resistenza a trazione ultima media per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura, compresi di barre di errore e percentuale di decremento / incremento.

Per quanto riguarda la forza di trazione rilevata e riportata in quest'ultimo diagramma (Fig. 61) si evince che la matrice commerciale a base di geolite 40 (CEM) è la più performante in tutti i range di temperatura, con un declino maggiore di resistenza a trazione solo dopo l'esposizione ai 600°C. La matrice geopolimerica a base di cenere volante e cemento alluminoso (FAK) ha un comportamento molto simile ai CEM, ovvero una resistenza a trazione che si mantiene su valori elevati ma che degenera alla temperatura di 600°C. Questa crisi che si vede anche nei provini a base geocalce (CAL) e con metacaolino (MKK) può derivare dalla fusione del coating che copriva fino alla temperatura di 400°C la fibra in basalto.

I provini a base geocalce (CAL) sono quelli con i valori più anomali, si può notare un aumento della resistenza a trazione dopo il trattamento in forno a 400°C, ma vediamo anche

un range di valori molto variabile e quindi poco affidabile (CAL 400°C range 319.81°C – 615.91°C).

Diversamente i provini a base di metacaolino (MKK) hanno un aumento non indifferente dopo la cottura a 200°C e una variabilità di valori limitata.

Se invece ci concentriamo sui grafici a dispersione (Fig. 57 – 60), 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.

Sempre da questi grafici, si evidenzia bene come i CAL dopo il trattamento a 400°C hanno una variabilità di dati troppo elevata (Ampia barra di errore in Fig. 61) per essere considerati affidabili e come gli MKK a 200°C tendono ad aumentare la propria resistenza a trazione.

5. CONCLUSIONI

5.1 Considerazioni finali

La campagna sperimentale presentata in questa tesi ha riguardato l'analisi del comportamento meccanico e deformativo, dopo l'esposizione alle alte temperature, di matrici e sistemi FRCM con reti in fibra di basalto con malte a base geopolimerica, a base di cenere volante e cemento alluminoso (FAK) o metacaolino (MKK), confrontate con malte commerciali a base di Geolite 40 (CEM) e Geocalce multiuso (FAK).

Il lavoro sperimentale ha riguardato inizialmente la ricerca la valutazione della consistenza allo stato fresco delle malte, le malte commerciali sono risultate rigide mentre le malte geopolimeriche hanno dato un risultato plastico. Quest'ultime, in conseguenza del processo di polimerizzazione, risultano meno lavorabili nel momento dei getti a causa della rapida presa e indurimento della matrice.

Trascorso il tempo di maturazione, i provini sono stati sottoposti ai trattamenti termici di 200°C, 400°C e 600°C ed è stato monitorato tutto il processo tramite l'ausilio di un raccoglitore di dati. Saranno necessarie ulteriori indagini per interpretare al meglio i risultati ottenuti.

Poi si è passati alla caratterizzazione fisico-meccanica delle matrici inorganiche su provini 16 x 4 x 4 cm³, attraverso prove ultrasoniche, di flessione e di compressione.

In generale possiamo affermare che le resistenze meccaniche delle malte a base di cenere volante e cemento alluminoso (FAK) sono confrontabili con le resistenze meccaniche delle malte a base Geolite 40 (CEM), stesso ragionamento è valido per le malte a base Geocalce multiuso (CAL) e metacaolino (MKK).

Con la prova ultrasonica abbiamo calcolato il modulo elastico dinamico delle malte da cui è emerso che i valori più elevati sono dati dai CEM e gli FAK. Quest'ultimi hanno un valore di modulo elastico dinamico che superano i 32 GPa nei provini che non hanno subito un trattamento termico, contro il valore di 24.88 GPa dei provini CEM, ma entrambi subiscono un decremento superiore del 37% a 200°C, per poi comportarsi in maniera simile dopo i trattamenti alle temperature di 400°C (9.46 GPa CEM , 8.26 GPa FAK) e 600°C (4.43 GPa CEM , 5.00 GPa FAK). I provini CAL e MKK hanno valori di modulo elastico dinamico minori di 10 GPa e notiamo che quest'ultimi (MKK), risentono in maniera minore del trattamento termico.

Le matrici CEM e FAK hanno mostrato una resistenza a flessione più elevata (rispettivamente 10.51 MPa e 11.51 MPa), rispetto alle matrici CAL e MKK (3.82 MPa e 1.78 MPa) a temperatura ambiente. Ma quest'ultime tendono ad aumentare il loro valore di resistenza a flessione dopo l'esposizione a 200°C (CAL 200°C 4.20 MPa ma con ampia variabilità di dati, MKK 200°C 2.42 MPa) mentre le matrici CEM e FAK subiscono un decremento. Da notare il declino della resistenza a flessione della matrice FAK 200°C (-49.30%) che è molto più elevato rispetto alla matrice CEM 200°C (-6.50%).

Anche con la prova di compressione abbiamo ottenuto valori più elevati per i campioni CEM e FAK rispetto ai campioni CAL e MKK. Un dato interessante è la crescita non indifferente in termini di resistenza nei campioni FAK e MKK dopo il trattamento termico a 200°C (FAK 200°C 67.55 MPa contro FAK AMB 52.64 MPa, MKK 200°C 9.82 MPa contro MKK AMB 8.60 MPa), crescita che probabilmente è dovuta al processo di geopolimerizzazione che viene favorito dalla temperatura elevata. Mentre per i CEM e i CAL (CEM AMB 56.64%, CAL AMB 10.21%) abbiamo decrementi lineari dopo i trattamenti termici.

Come per il modulo elastico dinamico, anche in termini di resistenza a compressione, la matrice MKK è la matrice che risente in maniera minore dell'esposizione alle alte temperature.

Le prove di trazione sono state fatte sui provini FRCM, ovvero provini di dimensione $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ con annegata all'interno una rete in basalto. I risultati di questa prova hanno evidenziato una performance migliore per la matrice commerciale a base geolite in tutti i range di temperatura (resistenza ultima a trazione CEM: AMB 604 MPa, 200°C 545 MPa, 400°C 406 MPa, 600°C 130 MPa). I provini FAK hanno dato valori di resistenza ultima che sono circa il 20% minori dei provini CEM (FAK AMB 390 MPa, 200°C 318 MPa, 400°C 288 MPa, 600°C 92 MPa), mentre i provini MKK (AMB 202 MPa, 200°C 520 MPa, 400°C 209 MPa, 600°C 112 MPa) hanno avuto un aumento considerevole della resistenza a trazione dopo la cottura in forno a 200°C (+157.27%). La prova ha dato valori anomali per la malta a base geocalce (resistenza ultima a trazione CAL: AMB 412 MPa, 200°C 399 MPa, 400°C 468 MPa, 600°C 86 MPa), soprattutto dopo il trattamento in forno a 400°C dove si osserva un incremento della resistenza ultima a trazione del 13.67%.

Concludendo, l'esposizione alle alte temperature, in particolare quelle svolte a 200°C, ha portato incrementi di resistenza a compressione nelle matrici geopolimeriche FAK e MKK, e un incremento di resistenza a flessione e trazione nei provini MKK. Incrementi che non avvengono nelle matrici tradizionali. Dati rilevanti che meritano di essere approfonditi e studiati maggiormente.

5.2 Future sperimentazioni

I provini FRCM verranno testati a trazione all'interno di una camera climatica, per valutare il comportamento meccanico e deformativo durante l'esposizione a temperature elevate. Inoltre verranno rifatti dei provini con termocoppie con rivestimento più isolante per monitorare la loro temperatura all'interno del forno e verranno ritestate a trazione le matrici che hanno dato risultati anomali.

I provini FRCM $19 \times 2 \times 1 \text{ cm}^3$ che hanno già ricevuto il trattamento termico, verranno sezionati in modo da osservare al microscopio l'interfaccia fibra/matrice e quindi valutare il cambiamento alle varie temperature.

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1 - Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito.....	4
Fig. 2 - Schematizzazione materiali compositi in base alla tipologia di matrice.	5
Fig. 3 - Schematizzazione materiali compositi in funzione della tipologia di rinforzo.....	6
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.	11
Fig. 6 - Classificazione di “materiali attivati con alcali” secondo J.S.J. Van Deventer e J.L. Provis.	13
Fig. 7 - Materie prime nella produzione del materiale geopolimerico.	15
Fig. 8 - Schema di processo per ottenere materiale geopolimerico.....	16
Fig. 9 – Comportamento trilineare della prova di trazione – UniBo.....	22
Fig. 10 – Setup di prova single shear test – UniCal.	23
Fig. 11 – Geolite 40 a sinistra, Geocalce Multiuso a destra, Kerakoll.	25
Fig. 12 – Polvere di metacaolino usato nella sperimentazione.	27
Fig. 13 - Polvere di cenere volante usata nella sperimentazione.....	29
Fig. 14 - Polvere di cemento alluminoso usato nella sperimentazione.	31
Fig. 15 – Sabbia usata nella sperimentazione.....	35
Fig. 16 – Rinforzo in basalto usato nella sperimentazione.....	38
Fig. 17 – Casseri in metallo 16 x 4 x 4 cm ³ con disarmante.....	39
Fig. 18 – Casseri in metallo 16 x 4 x 4 cm ³ con scotch.....	39
Fig. 19 – Casseri in legno 38 x 6 x 1 cm ³ con disarmante.....	40
Fig. 20 – Casseri in legno 38 x 6 x 1 cm ³ con scotch.....	40
Fig. 21 – Casseri in legno 19 x 4 x 1 cm ³ per malta commerciale a sinistra, per malta geopolimerica a destra.	41
Fig. 22 - Rete in basalto per provini 38 x 6 x 1 cm ³ (3 yarn).	42
Fig. 23 – Rete in basalto per provini 19 x 4 x 1 cm ³ con termocoppia (2 yarn).	42
Fig. 24 – Silicato di sodio (a sinistra) e idrossido di potassio (a destra) usati nella sperimentazione.	43

Fig. 25 – Bilancia di precisione usata nella sperimentazione a sinistra; Contenitori con le soluzioni attivatrici a destra	44
Fig. 26 – Miscelatore elettrico usato nella sperimentazione.	45
Fig. 27 : (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).....	45
Fig. 28 – Fase di stesura del primo strato di malta e successiva posa della rete di rinforzo.	46
Fig. 29 : (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).....	46
Fig. 30 – Provini 16 x 4 x 4 cm ³ (in figura in mm ³) con termocoppia.	47
Fig. 31 Provini 19 x 4 x 1 cm ³ (in figura in mm ³) con termocoppia.	48
Fig. 32 – Tavola vibrante usata nella sperimentazione.	49
Fig. 33 – Efflorescenze causate dall'esposizione all'aria di una malta geopolimerica in sperimentazioni passate.....	49
Fig. 34 – Sega circolare per il taglio dei provini 38 x 6 x 1 cm ³	50
Fig. 35: (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.....	50
Fig. 36 – Forno elettrico a muffola usato nella sperimentazione.	51
Fig. 37 – Tavola a scosse e stampo troncoconico come da normativa UNI.....	53
Fig. 38 – Disposizione dei provini in forno per la cottura a 200°C	54
Fig. 39 – Registratore di dati a sinistra; Esempio di collegamento di due termocoppie a destra.	55
Fig. 40 – 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.	56
Fig. 41- Ispezione visiva dei campioni dopo il trattamento termico, Formazione di fessure in un provino CAL 600°C a sinistra, Imbarcamento dei provini MKK 600°C a destra.....	57
Fig. 42 – Calibrazione dello strumento e misura delle onde ultrasoniche su un provino 16 x 4 x 4 cm ³	58
Fig. 43 - Schema della prova di flessione come da normativa UNI EN 1015-11:2007.....	60
Fig. 44 – Macchina di compressione Galbadini usata nella sperimentazione a sinistra; Setup di prova a flessione a destra prima e dopo la rottura.....	60

Fig. 45 – Setup di prova a compressione.....	61
Fig. 46 – Resina Bicomponente e fibra di vetro usata nella sperimentazione.....	62
Fig. 47 – Esempio dei provini con estremità in fibra di vetro.....	62
Fig. 48 – Setup di prova a trazione eseguito con la macchina Zwick/Roell Z050	63
Fig. 49 – Misura dei diametri di spandimento delle malte nelle due direzioni ortogonali.	66
Fig. 50 – 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.	68
Fig. 51 - 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.	69
Fig. 52 - 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.	70
Fig. 53 – 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.	74
Fig. 54 - 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.....	76
Fig. 55 – Provini dopo l’esecuzione della prova di flessione.....	77
Fig. 56 - 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.....	80
Fig. 57 - Diagrammi Tensione–Deformazione da prova di trazione svolta su provini 19 x 4 x 1 cm ³ che non hanno ricevuto il trattamento termico.....	82
Fig. 58 - 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.....	83
Fig. 59 - 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.....	84
Fig. 60 - 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.....	85
Fig. 61 - 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.....	86

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 1 –Costituenti metacaolino MetaStar 501.....	27
Tab. 2 – Costituenti cenere volante.....	30
Tab. 3 – Componenti cemento alluminoso (Ciment Fondu Imerys).....	32
Tab. 4 - Proprietà chimico-fisiche del silicato di sodio.....	33
Tab. 5 – Proprietà chimico-fisiche dell'idrossido di potassio.....	34
Tab. 6 – Mix per un litro per la creazione delle miscele geopolimeriche.....	36
Tab. 7 – Caratteristiche tecniche del sistema di rinforzo in basalto.....	37
Tab. 8 – Tabella come da normativa UNI EN 1015-3:2007.....	53
Tab. 9 – Valori dei diametri di spandimento delle malte e definizione di consistenza.....	66
Tab. 10 – Test di monitoraggio in forno svolti.....	67
Tab. 11 – Temperature massime raggiunte dai diversi provini 16 x 4 x 4 cm ³ con termocoppia che hanno ricevuto il trattamento a tutte le temperature.....	68
Tab. 12 - Temperature massime raggiunte dai diversi provini 19 x 4 x 1 cm ³ con termocoppia che hanno ricevuto il trattamento a tutte le temperature.....	69
Tab. 13 - 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.....	70
Tab. 14 – 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.....	73
Tab. 15 – 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.....	76
Tab. 16 - Dati ottenuti e rielaborati da prova di compressione per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura.....	79
Tab. 17 - 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.....	82
Tab. 18 - 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.....	83
Tab. 19 - 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.....	84
Tab. 20 - 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.....	85

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, Schicktanz 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 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

¹⁷ 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.

¹⁸ Norme tecniche per le costruzioni approvate con Decreto Ministeriale del 17 Gennaio 2018 (nel seguito NTC 2018), Capitolo 8.6.

¹⁹ NTC 2018, Capitolo 12.

²⁰ Francesca Ferretti; Anna Rosa Tilocca; Andrea Incerti; Claudio Mazzotti; and Marco Savoia -, Effects of Thermal Variations on the Tensile Behavior of FRCM Strengthening Systems ,

-
- ²¹ Luciano Ombres, Antonio Iorfida, Stefania Mazzuca, Salvatore Verre -Bond analysis of thermally conditioned FRCM-masonry joints.
- ²² Jimenez, A. Palomo. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel*. 82. Fasc. 18 pp. 2259-2265 (2003).
- ²³ Paragrafo 11.2.9.1 NTC 2018.
- ²⁴ Roy, P.J., Schilling, Eaton, Alkali activated class C fly ash cement.
- ²⁵ Effect of silicate activator ph on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers. *Minerals Engineering*. 14. Fasc. 3 pp. 289-304 (2001).
- ²⁶ The geopolymerization of alumino-silicate minerals. *J. Mineral Process*. 59. pp. 247-266 (2000).
- ²⁷ Composite cold ceramic geopolymer in a refractory application *Ceramic Transactions*. 153. pp.211-225 (2003).
- ²⁸ L. Bell, Formation of ceramics from metakaolin-based geopolymers. Part II: Kbased geopolymer *Am. Ceram. Soc.* 92. Fasc. 1 pp. 1-8 (2009).