



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

Corso di Laurea in Ingegneria Edile

**Caratterizzazione di compositi TRM con matrici alternative esposti a
temperature elevate**

**Characterization of TRM composites with alternative matrices exposed to
elevated temperatures**

Relatore:

Prof. Ing. Jacopo Donnini

Tesi di Laurea di:

Andrenelli Michele

A.A. 2022/2023

Sommario

| | |
|--|----|
| 1. STATO DELL'ARTE | 3 |
| 1.1 I materiali compositi | 3 |
| 1.1.1 Classificazione dei materiali compositi | 4 |
| 1.1.2 I sistemi compositi a base inorganica | 5 |
| 1.2 I sistemi FRCM | 6 |
| 1.2.1 I rinforzi per i sistemi FRCM | 8 |
| 1.2.2 I Sistemi FRCM: comportamento ad alte temperature | 9 |
| 1.2.3 Geopolimeri | 10 |
| 1.2.4 Qualificazione di un sistema FRCM | 12 |
| 1.2.5 Quadro normativo | 13 |
| 2. MATERIE PRIME E PREPARAZIONE | 14 |
| 2.1 Matrici commerciali | 14 |
| 2.2 Matrici Geopolimeriche | 15 |
| 2.2.1 Polveri reattive allumino-silicate | 15 |
| 2.2.2 Soluzione alcalina | 18 |
| 2.2.2 Inerte | 20 |
| 2.2.3 Mix design | 20 |
| 2.3 Rete di rinforzo in basalto | 21 |
| 2.4 Preparazione | 23 |
| 2.4.1 Provini per osservazioni al microscopio | 24 |
| 2.4.2 Provini per osservazioni al SEM | 25 |
| 2.4.3 Provini per prova di trazione su singolo yarn | 25 |

| | |
|--|----|
| 3. METODI DI PROVA E RISULTATI OTTENUTI | 27 |
| 3.1 Risultati prove sui sistemi FRCM | 28 |
| 3.1.1 Modulo elastico | 28 |
| 3.1.2 Resistenza a flessione | 29 |
| 3.1.3 Resistenza a compressione | 31 |
| 3.1.4 Resistenza a trazione (Tensile-test) | 32 |
| 3.2 Osservazioni al microscopio ottico ed elettronico | 36 |
| 3.2.1 Introduzione al microscopio ottico | 36 |
| 3.2.2 Introduzione al microscopio elettronico | 36 |
| 3.2.3 Risultati ottenuti | 37 |
| 3.2.4 Commento dei risultati ottenuti | 54 |
| 3.3 Prove di trazione su yarn in basalto | 58 |
| 3.3.1 Setup di prova | 58 |
| 3.3.2 Risultati ottenuti | 59 |
| 3.3.3 Commento dei risultati ottenuti | 64 |
| 3.3.4 Confronto dei risultati con i precedenti studi | 65 |
| 4. CONCLUSIONI | 69 |
| 4.1 Considerazioni finali | 69 |
| INDICE DELLE FIGURE | 71 |
| INDICE DELLE TABELLE | 74 |
| BIBLIOGRAFIA | 75 |

1. STATO DELL'ARTE

1.1 I materiali compositi

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

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

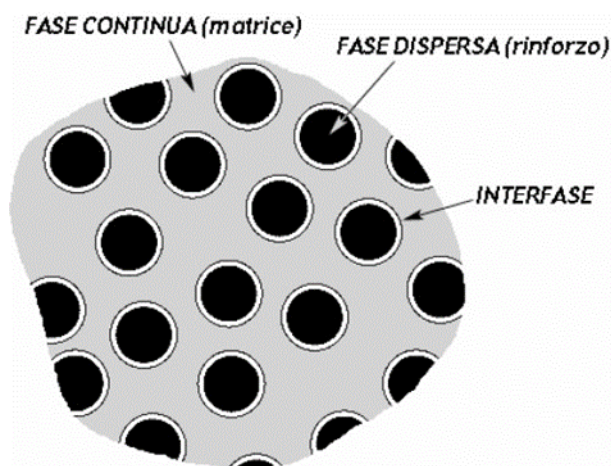


Figura 1 - Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito

1.1.1 Classificazione dei materiali compositi

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

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

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

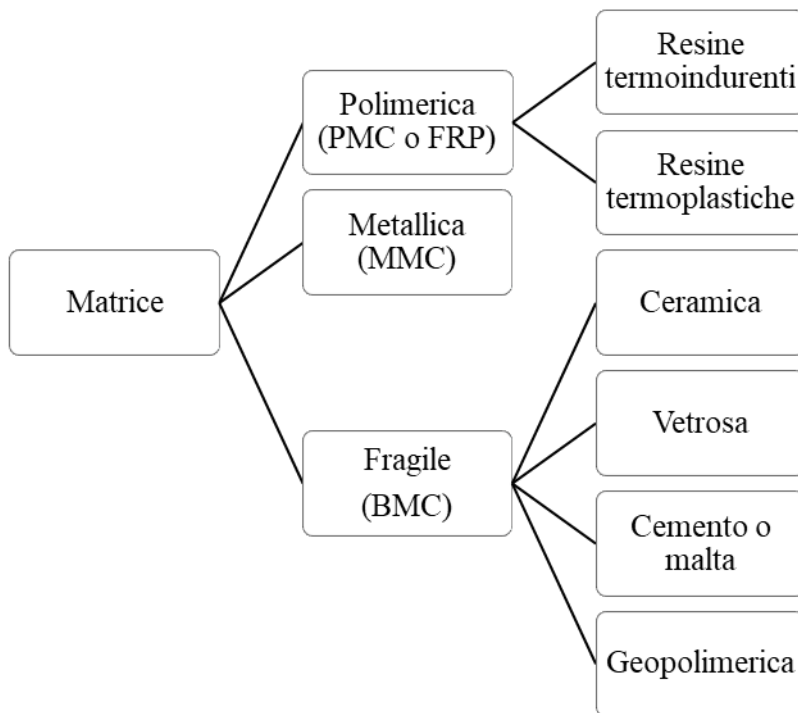


Figura 2 - Schematizzazione materiali compositi in base alla tipologia di matrice

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

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

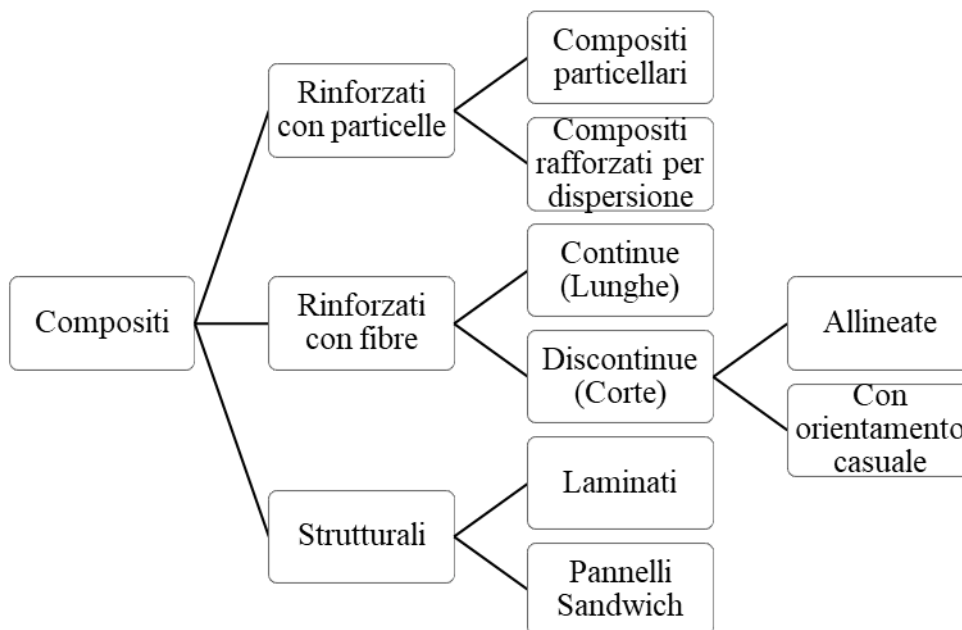


Figura 3 - Schematizzazione dei materiali compositi in funzione della tipologia di rinforzo

1.1.2 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): matrice cementizia a grana fine ad alta resistenza, rinforzata da un tessuto in fibre. Solitamente vengono impiegate fibre di vetro o di carbonio in combinazione con le prime.^{3 4 5 6}
 - TRM (Textile Reinforced Mortars): analogo al sistema TRC, vengono impiegati tessuti in fibra di carbonio e la matrice è costituita da una malta a grana fine additivata con polimeri.^{7 8}
 - FRC (Fiber Reinforced Cement): Il sistema è costituito da un foglio o tessuto fibroso, il quale viene impregnato attraverso l'immersione completa in una boiaccia. Terminata la fase di impregnazione, il tessuto viene estratto e applicato immediatamente alla superficie dell'elemento da rinforzare⁹;
 - MBC (Mineral Based Composite): si differenzia dai precedenti in quanto il rinforzo è costituito da una rete in CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer). Il rinforzo viene applicato all'elemento strutturale previa preparazione della superficie e applicazione di uno strato di primer.
 - FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix): descrive un sistema composito costituito da una matrice inorganica, tipicamente costituita da combinazioni di cemento Portland, fumo di silice e ceneri volanti come legante e con un contenuto massimo del 5% di frazioni organiche, con un rinforzo a rete. Le ottime capacità meccanica dei sistemi FRCM sono fortemente influenzate dalla capacità della matrice di legarsi alle fibre, dal legame che nasce tra matrice e fibre e dall'adesione della matrice al substrato da rinforzare. Importante sottolineare la possibilità di utilizzare questo sistema come elemento di rinforzo in costruzioni già esistenti di carattere storico e monumentale
- Tra tutti i sistemi descritti quello che è stato oggetto del nostro studio è proprio l'ultimo, ovvero i sistemi FRCM.

1.2 I sistemi FRCM

I sistemi FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) sono un sistema composito costituiti da una matrice inorganica, tipicamente costituiti da cemento Portland, fumo di silice e ceneri volanti e con un 5% di frazioni organiche, con un rinforzo in rete a maglia larga (0.6-1.5 cm) a bassa densità (0.6-1.8 kg/m²); la loro resistenza meccanica è fortemente influenzata dall'aderenza fra matrice e fibra e

dall'adesione della matrice al substrato da rinforzare. Nel caso di rinforzo in strutture in muratura, viene utilizzata una matrice a base di calce.

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

Tra i principali vantaggi dei sistemi FRCM abbiamo:

- 1) Migliorano la resistenza meccanica e la capacità di carico delle strutture in calcestruzzo armato e muratura.
- 2) Flessibilità: sono altamente adattabili, permettendo una maggiore aderenza nei punti critici della struttura, come gli angoli o le curve.
- 3) Sono molto resistenti agli agenti atmosferici, come aloni, esposizione al sole, freddo, pioggia, e umidità, aiutando a preservare la robustezza della struttura.
- 4) Sono resistenti al fuoco, offrendo una protezione supplementare contro eventuali danni causati dal calore e dalle fiamme.
- 5) Economicità: sono una soluzione molto economica per il rinforzo e la riparazione di strutture in cemento e muratura rispetto ai costi di demolizione e ricostruzione.
- 6) Affidabilità: sono considerati molto affidabili e sicuri, offrendo una lunga durata e una maggiore protezione in caso di eventi sismici.
- 7) Facilità di installazione: sono relativamente facili da installare e richiedono un tempo minimo di inattività della struttura, offrendo una soluzione rapida e conveniente per il rinforzo delle strutture.

1.2.1 I rinforzi per i sistemi FRCM

Esistono differenti tipi di rinforzi per i sistemi FRCM, in ambito edilizio i più utilizzati sono quelli a fibra continua a rete. Le fibre sono dotate di un'elevata rigidità e resistenza a trazione; pertanto, sono loro stesse a contrastare principalmente gli sforzi che nascono quando il nostro materiale è sottoposto a trazione. Esistono varie forme di fibre, in quanto sono costituite da filamenti molto sottili e quindi difficili da manipolare singolarmente (Fig.4).

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

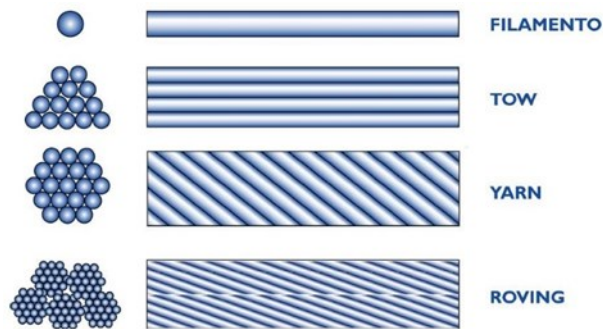


Figura 4 - Tipologie di fibre. Immagine tratta da CNR-DT 200/2004, P.11

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

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

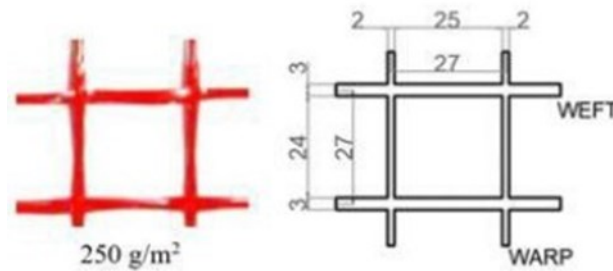


Figura 5 - Tessuto in fibra di vetro in cui sono visibili le due direzioni.

1.2.2 I Sistemi FRCM: comportamento ad alte temperature

I sistemi FRCM presentano un comportamento potenzialmente migliorato alle alte temperature. A conferma di questo prendiamo come esempio lo studio condotto da Francesca Ferretti et al.²², nel quale si è valutato il comportamento a trazione di vari sistemi FRCM sottoposti ad un aumento di temperatura. Sono state eseguite 90 prove di trazione su 6 diversi sistemi compositi, realizzati con matrice a base di calce o cemento accoppiati con fibre di acciaio o fibre in basalto. Hanno creato tre tipi di malte: CEM, NHL1 e NHL2, con 5 tipi di fibre: acciaio inossidabile(S), basalto con tre diverse densità (B1,B2,Be) e vetro(AG).

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

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

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

In tutti i casi hanno osservato un tipico comportamento trilineare (Fig.6), caratterizzato da una fase iniziale non fessurata, una fase fessurativa ed una fase completamente fessurata in cui prevaleva il ruolo della fibra.

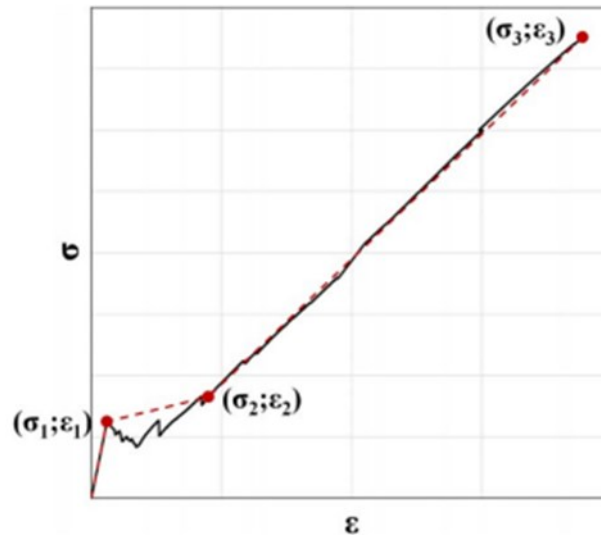


Figura 6 - Comportamento trilineare della prova di trazione UniBo

Dai risultati ottenuti si evince che:

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

1.2.3 Geopolimeri

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

Di seguito viene riportata una proposta di classificazione (avanzata da J.S.J van Deventer e J.L Provis) (Fig.7) la quale prende in considerazione il contenuto di calcio e alluminio.

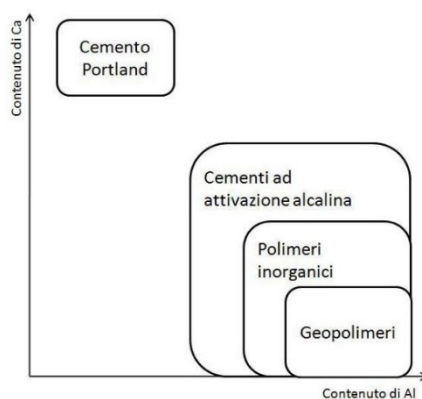


Figura 7 - Classificazione di "materiali attivati con alcali"

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

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

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

Produrre un materiale geopolimerico bisogna avere due materie prime (Fig.8):

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

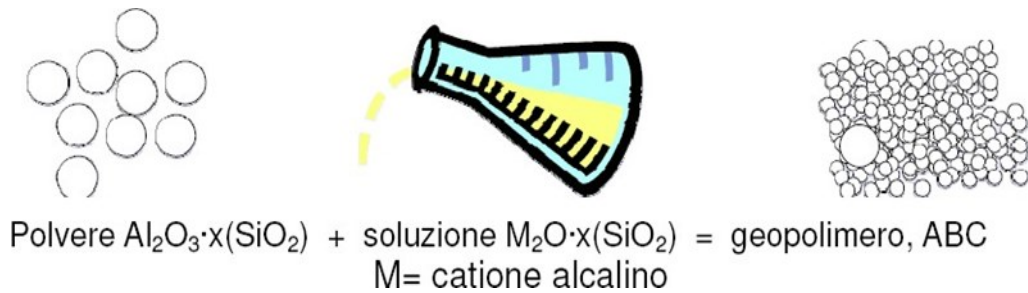


Figura 8 - Materie prime nella produzione del materiale geopolimerico.

La geopolimerizzazione si può suddividere in:

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

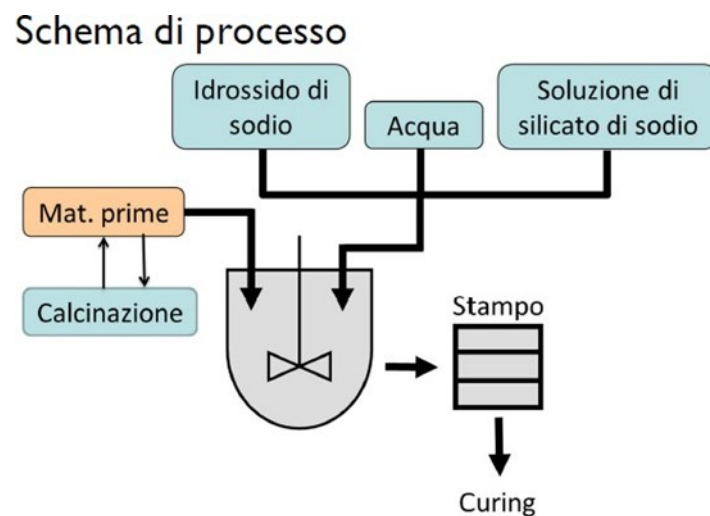


Figura 9 - Schema di processo per ottenere materiale geopolimerico.

1.2.4 Qualificazione di un sistema FRCM

Seguendo la Normativa Tecnica per le Costruzioni del 2018, i materiali da costruzione impiegati per uso strutturale, devono essere certificati, identificati o in possesso di un documento di validità affinché venga accettato dal Direttore dei Lavori. Tali elementi devono avere il marchio CE o devono

avere un certificato di Valutazione Tecnica (CVT) rilasciato dal Servizio Tecnico Centrale (STC), basandosi sulle linee guida approvate dal Consiglio dei Lavori Pubblici.

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

- Prove di caratterizzazione meccanica:
 - prove di trazione sulla rete senza matrice inorganica;
 - prove di trazione sui provini di FRCM
 - prove di distacco dal supporto
 - prove di trazione in presenza di sovrapposizione delle reti
- Prove di durabilità ambientale su provini di FRCM:
 - prove cicliche di gelo e disgelo
 - prove di invecchiamento artificiale
 - prove di comportamento alle sollecitazioni termiche¹⁸.

1.2.5 Quadro normativo

I sistemi FRCM inizialmente non possedevano codici normativi o linee guida sulla messa in opera e progettazione su cui fare riferimento. La Commissione di Studio sulle norme tecniche con la diffusione di molteplici prodotti FRCM hanno redatto, nel tempo, documenti tecnici a cui possono riferirsi codici e normative nazionali. I primi paesi ad aver inserito codici e documenti sulla messa in opera sono stati gli Stati Uniti e il Giappone.

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

Nel Capitolo 12 sono presenti:

- Istruzioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
- Linee Guida del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;

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

Ad oggi quello che abbiamo sono principalmente le linee guida del CNR che descrivono l'utilizzo dei sistemi FRCM:

- Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (CNR-DT 215/2018).

2. MATERIE PRIME E PREPARAZIONE

Per il nostro studio sono state prese in esame quattro matrici: due sono le matrici geopolimeriche realizzate in laboratorio (R1 FAK, R1 MKK), le altre due sono matrici commerciali (Geolite 40, Geocalce Multiuso). Le fibre prese in esame sono invece di basalto e acciaio apprettate con un coating a base di poliestere alcali resistente.

2.1 Matrici commerciali

Le matrici commerciali utilizzate sono: Geolite e Geocalce di marca Kerakoll (Fig.10). Sono delle malte premiscelate, di conseguenza è stata aggiunta acqua alle polveri (0.9 l per 5kg la Geolite40, 1.1 l per 5 kg di Geocalce). Successivamente denominate CEM e CAL.



Figura 10 - Geolite 40 a sinistra, Geocalce Multiuso a destra, Kerakoll.

2.2 Matrici Geopolimeriche

2.2.1 Polveri reattive allumino-silicate

Come detto, nei capitoli precedenti, per la realizzazione delle matrici geopolimeriche abbiamo bisogno di due principali materie prime:

- La polvere allumino-silicato
- La soluzione acquosa di idrossidi e/o di silicati acanini

Nello studio in esame sono stati utilizzate, per quanto riguardano le polveri reattive, il Metacaolino, la Cenere volante e il Cemento alluminoso.

2.2.1.1 Metacaolino

Il metacaolino è una roccia pozzolanica naturale ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) derivante dalla cottura di argille contenenti caolino in un intervallo di temperatura compreso fra 600-900°C.

Tra le sue caratteristiche principali abbiamo sicuramente la sua forte reattività, la quale dipende da vari fattori quali le sue caratteristiche morfologiche, composizionali, mineralogiche del materiale ed infine dal suo grado di deidrossilazione.

Per il seguente studio è stato adottato il MetaStar 501.



Figura 11 - Polvere di metacaolino usata 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 |

Tabella 1 - Costituenti metacaolino MetaStar 501.

2.2.1.2 Cenere volante

Le ceneri volanti si ottengono dalla combustione di carbone in centrali termoelettriche, separando il solido dai fumi attraverso appositi filtri elettrostatici o meccanici. Si formano ad una temperatura di 1400°C circa e la loro struttura chimica è composta da silice, allumina e ossido di ferro Fe₂O₃ (tutti composti che reagiscono a temperatura ambiente).

Possiamo individuare due tipologie differenti di ceneri volanti:

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



Figura 12 - Polvere di cenere volante silico-alluminosa

| 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 |

Tabella 2 - Costituenti cenere volante silicea

2.2.1.3 Cemento alluminoso

Il cemento alluminoso viene utilizzato per definire cementi principalmente costituiti da alluminati idraulici di calcio, per la produzione di calcestruzzi altamente performanti a breve stagionatura e resistenti alle basse e alte temperature e agli attacchi chimici (Fig.13).

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



Figura 13 - Polvere di cemento alluminoso usato per ridurre i fenomeni di efflorescenza.

Quest'ultimo 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 |

Tabella 3 - Componenti cemento alluminoso (Ciment Fondu Imerys).

2.2.2 Soluzione alcalina

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

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

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

2.2.2.1 Silicato di sodio

Il silicato di sodio (Na₂SiO₃) è un composto chimico che, grazie alla sua elevata solubilità viene utilizzato per la produzione di soluzioni alcaline.

Di seguito sono riportate le caratteristiche del silicato di sodio utilizzato per il nostro studio (Tab.4)

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

Tabella 4 - Proprietà chimico-fisiche del silicato di sodio

2.2.2.2 Idrossido di potassio

L'idrossido di potassio (KOH), è un elemento corrosivo dotato di una minore solubilità in acqua. Viene prodotto tramite il processo di cloro-alcali, ovvero tramite il processo cloro-potassio. La sua sintesi è la seguente:



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

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

Tabella 5 - Proprietà chimico-fisiche dell'idrossido di potassio

2.2.2 Inerte

L'inerte utilizzato nelle seguenti sperimentazioni è la sabbia Esincalce 0/3, una sabbia calcarea, esclusivamente macinata, di granulometria fino a 3 millimetri ideale per la preparazione di malte da muratura o da intonaco. È stata utilizzata in condizioni di sabbia saturata a superficie asciutta (SSA), ovvero alla sabbia secca è stato aggiunto il 3.4% in peso di acqua (Fig.14).



Figura 14 - Sabbia usata nella sperimentazione.

2.2.3 Mix design

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

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

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

- Classe R1, per $10 \text{ MPa} \leq R_c \leq 15 \text{ MPa}$
- Classe R2, per $15 \text{ MPa} \leq R_c \leq 25 \text{ MPa}$
- Classe R3, per $25 \text{ MPa} \leq R_c \leq 45 \text{ MPa}$
- Classe R4, per $R_c \geq 45 \text{ MPa}$

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

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

Tabella 6 - Mix di sostanze utilizzate per la formazione di malte geopolimeriche

2.3 Rete di rinforzo in basalto

La rete di rinforzo utilizzata è la Glasstex Struktura BA 420, rete composta da fibre di basalto apprettata con un coating a base di poliestere alcali resistente.

Le fibre in basalto sono prodotte utilizzando direttamente rocce di basalto o da rocce che ne contengono una certa quantità. La natura della roccia di tipo vulcanica (magmatica effusiva) da cui viene estratto conferisce al materiale delle spiccate proprietà alcaline. Le fibre in basalto presentano, a parità di costo, una resistenza alla temperatura superiore a quella di altre fibre che troviamo in commercio (tra le principali tipologie di fibre utilizzate oggi giorno abbiamo quelle in vetro, AR, carbonio e basalto). Con questo possiamo assumere che le fibre in basalto si presentano come un'ottima alternativa rispetto ad altre tipologie di fibre che troviamo in commercio sia da un punto di vista economico, sia da un punto di vista prestazionale, in particolare rispetto la loro resistenza ad elevate temperature²¹.

Di seguito viene riportata una tabella in cui vengono messi a confronto alcuni parametri tra le fibre in basalto e quelle in fibra di vetro (Tab. 7):

| Proprietà termiche | Unità SI | Basalt Filaments | Fiberglass |
|---------------------------------|-----------------|-------------------------|-------------------|
| Maximum application temperature | (°C) | 982° | 650° |
| Sustained operating temperature | (°C) | 820° | 480° |
| Minimum operating temperature | (°C) | -260° | -60 |
| Thermal conductivity | (W/m K) | 0.031-0.038 | 0.034-0.04 |
| Melting temperature | (°C) | 1450° | 1120° |
| Vitrification conductivity | (°C) | 1050° | 600° |
| Glow loss | (%) | 1.91 | 0.32 |
| Thermal expansion coefficient | (ppm/ °C) | 8.0° | 5.4° |
| Price Comparison | - | \$ | \$ |

Tabella 7 - Proprietà delle fibre in basalto e fibre di vetro

Di seguito viene riportata una tabella con le caratteristiche meccaniche della rete bidirezionale bilanciata in fibra di basalto (Tab. 8) e un'immagine rappresentativa delle caratteristiche geometriche (Fig.15).

| 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 | - | - |

Tabella 8 - Caratteristiche tecniche del sistema di rinforzo in basalto.



Figura 15 - Rinforzo in basalto usato nella sperimentazione

2.4 Preparazione

Una volta finiti i 28 giorni di maturazione, i provini FRCM sono stati esposti ad alte temperature: 200°C, 400°C e 600°C. L'esposizione ad alte temperature è avvenuta nel forno elettrico a muffola (Fig. 16), programmando l'aumentare della temperatura a 10°C/min.



Figura 16 - Forno a muffola all'interno del forno



Figura 17 - Fibre posizionate

Per differenti temperature si è proceduto in vario modo:

- Temperatura ambiente: i provini non hanno subito alcun aumento di temperatura
- Temperatura di 200°C: i campioni sono stati messi all'interno del forno spento e successivamente si è programmato il forno con un andamento della temperatura 10°C/min fino al raggiungimento di 200°C in 20 min. Il forno poi ha mantenuto 200°C per due ore. Passate le due ore il forno si è spento e lasciato raffreddare con lo sportello chiuso e i campioni dentro fino a temperatura ambiente, solo allora sono stati ripresi i campioni.
- Temperatura di 400°C: medesimo procedimento dei 200°C ma la temperatura target è stata raggiunta a 40 min.
- Temperatura di 600°C: analogo a 200°C e 400°C ma la temperatura target è stata raggiunta dopo 1 ora.

La stessa procedura è stata effettuata per le sole fibre, che sono state poi sottoposte ad analisi visive e a prove di trazione (Fig.17).

2.4.1 Provini per osservazioni al microscopio

I provini utilizzati per le osservazioni al microscopio possiedono le stesse caratteristiche dei provini che sono stati utilizzati per le osservazioni al SEM.

In entrambi i casi siamo andati a tagliare i provini per una lunghezza di circa 2 cm, cercando di mantenere inalterata la superficie di taglio che poi è stata quella osservata al microscopio (Fig.18).

Inoltre, per evitare che eventuali impurità o residui di polvere andassero a depositarsi nell'interfaccia tra la matrice e le fibre, tutti i provini, a seguito del taglio, sono stati ripuliti con aria compressa.

Otteniamo alla fine sedici provini, quattro per ogni classe di temperatura:

- CEMamb, CALamb, MKKamb, FAKamb (provini a temperatura ambiente)
- CEM200, CAL200, MKK200, FAK200 (provini sottoposti ad una temperatura di 200°C)
- CEM400, CAL400, MKK400, FAK400 (provini sottoposti ad una temperatura di 400°C)

- CEM600, CAL600, MKK600, FAK 600 (provini sottoposti ad una temperatura di 600°C)



Figura 18 - Provini per osservazioni al SEM e al microscopio

2.4.2 Provini per osservazioni al SEM

I provini utilizzati per le osservazioni al SEM possiedono le stesse caratteristiche dei provini che sono stati utilizzati per le osservazioni al microscopio; infatti, anche essi sono stati sezionati al fine di andare ad osservare lo yarn, la matrice e le fibre. Questi sono stati poi fissati su dei sostegni di forma circolare, inseriti successivamente nel macchinario.

2.4.3 Provini per prova di trazione su singolo yarn

I provini utilizzati nella prova di trazione hanno una lunghezza di 25 cm e sono stati preparati incollando, alle estremità delle tabs in fibra di vetro, di una lunghezza pari a 6 cm, utilizzando una resina epossidica bicomponente.

Abbiamo una distinzione in base alla direzione dello Yarn e in base alla temperatura alla quale il provino è stato sottoposto (Fig.19-20-21-22)

- Yarn in ordito (nelle immagini rinominati con la sigla “ORD”)
- Yarn in trama (nelle immagini rinominati con la sigla “TR”)
- Classificazione in base alla temperatura (nelle immagini rinominati con valore della temperatura)

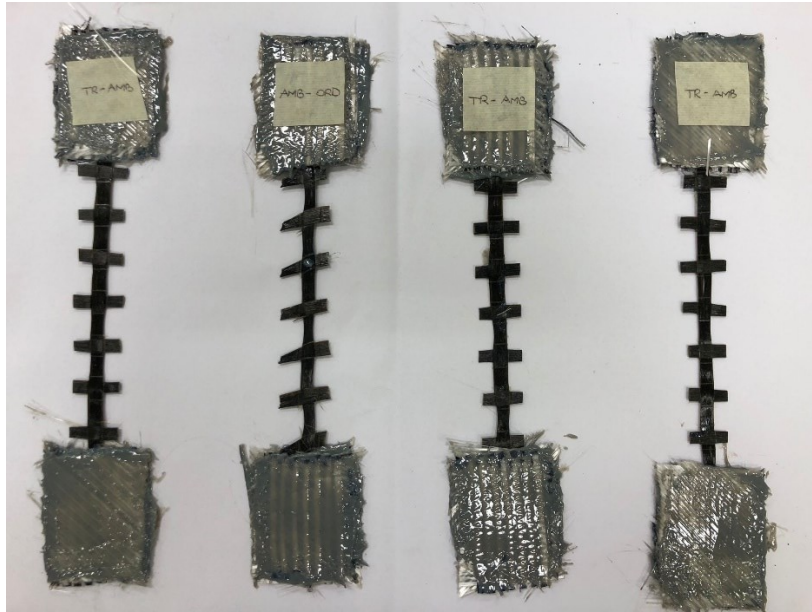


Figura 19 - Provini per la prova a trazione a temperatura ambiente

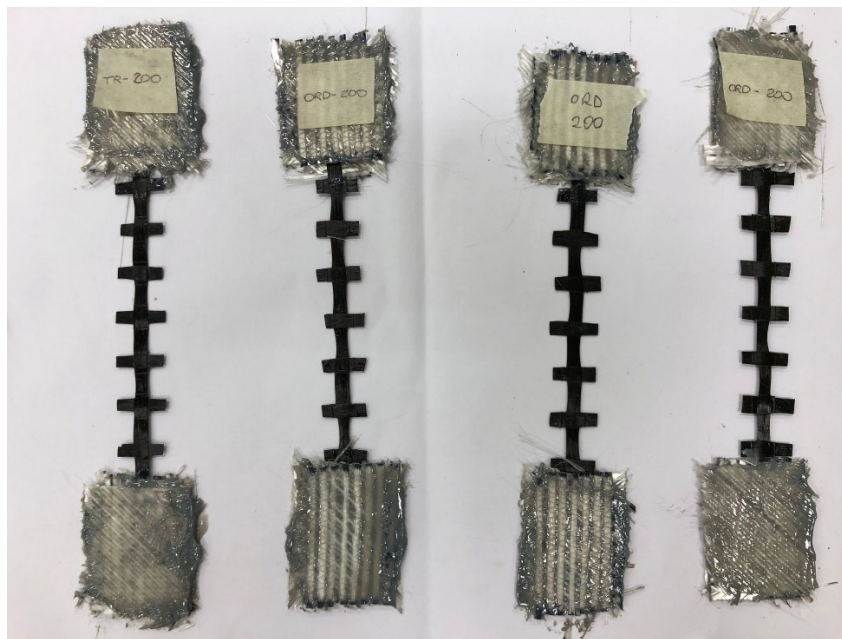


Figura 20 - Provini per la prova a trazione a 200°C



Figura 21 - Provini per la prova a trazione a 400°C

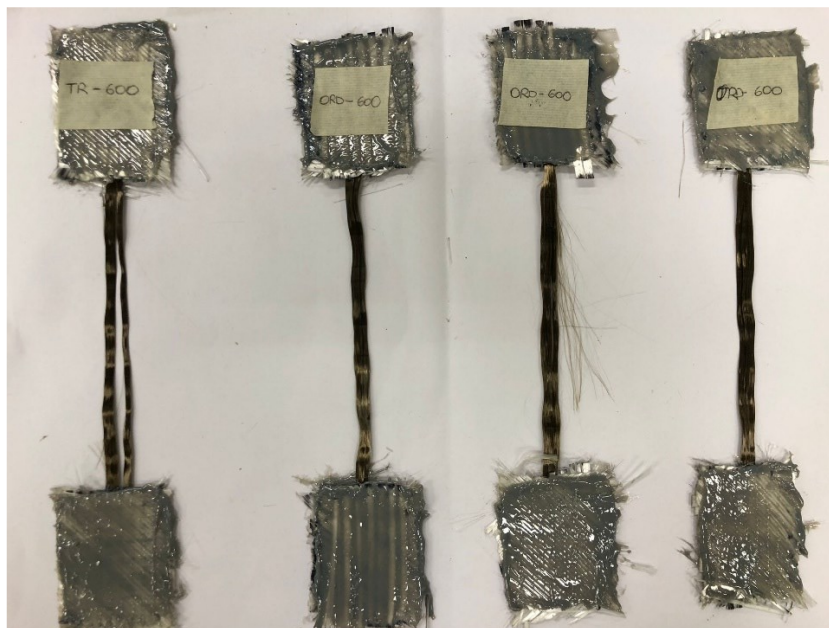


Figura 22 - Provini per la prova a trazione a 600°C

3. METODI DI PROVA E RISULTATI OTTENUTI

L'obiettivo del nostro studio è quello di andare a valutare come hanno risposto i nostri sistemi FRCM ai vari sforzi termici; oltre ad una valutazione visiva rispetto l'interfaccia tra matrice e fibre effettuata mediante l'utilizzo del microscopio elettronico ed uno studio relativo alla composizione

chimica dei nostri provini effettuata tramite SEM, verranno anche effettuate delle prove per valutare le prestazioni meccaniche a trazione delle sole fibre sottoposte a vari stadi (200°C, 400°C e 600°C). Ulteriore scopo dello studio è quello di andare a confrontare i risultati ottenuti con gli studi effettuati in precedenza rispetto al materiale composito, dove è stato valutato anche in questo caso il comportamento dei provini alle varie temperature (le stesse utilizzate nel nostro studio) concentrandosi sulle prestazioni meccaniche del materiale composito.

Di seguito viene riportata una tabella nella quale vengono sintetizzate tutte le prove che sono state fatte. In particolare:

- X: indica che la prova è stata fatta nello studio precedente
- O: indica che la prova è stata fatta e viene tratta nello studio in questione
- NO: la prova non è stata effettuata

| | ESPOSIZIONE ALTE TEMPERATURE | PROVA ULTRASONICA | PROVA A FLESSIONE | PROVA A COMPRESSIONE | PROVA DI TRAZIONE | MICROSCOPIO | SEM |
|-----------------|------------------------------|-------------------|-------------------|----------------------|-------------------|-------------|-----|
| FRCM | X | X | X | X | X | O | O |
| RETE IN BASALTO | O | NO | NO | NO | O | O | O |

Tabella 9 - Tabella riassuntiva delle prove effettuate nel precedente studio e nello studio in questione.

3.1 Risultati prove sui sistemi FRCM

3.1.1 Modulo elastico

Nel grafico sottostante (Fig.23) sono riportati i valori del modulo elastico dinamico con riferimento alle diverse temperature e malte testate.

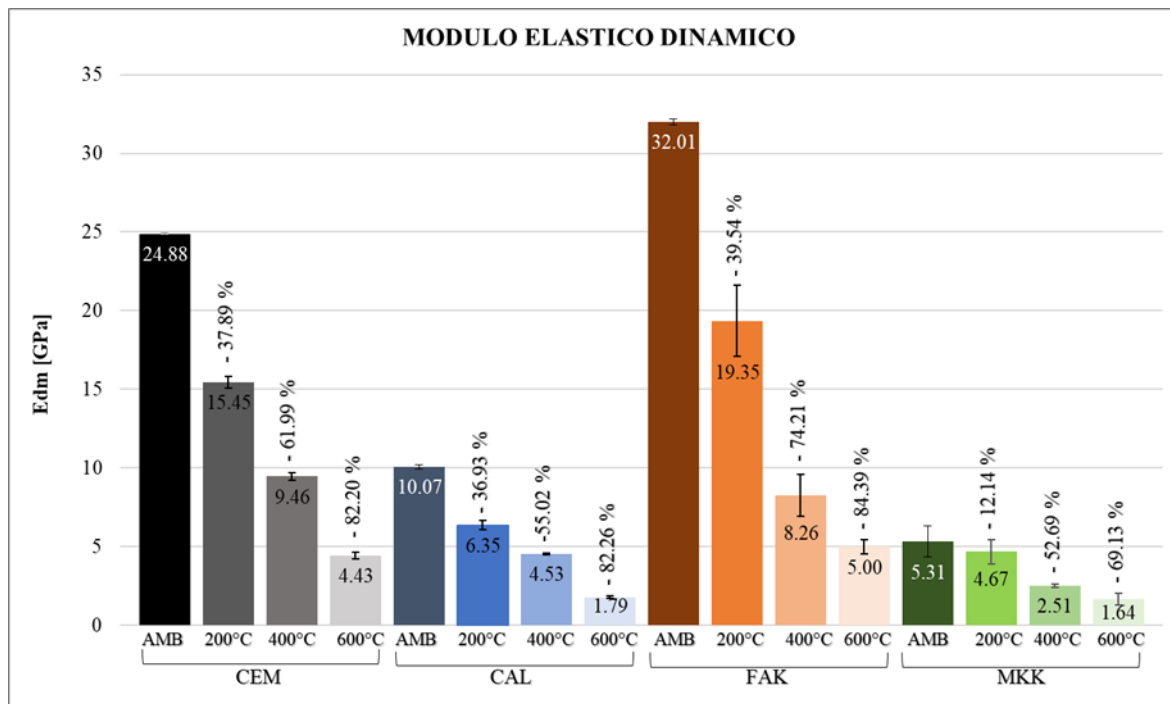


Figura 23 - Istogramma con moduli elastici dinamici medi per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura, compresi di barre di errore e percentuale di decremento.

Dal grafico osserviamo che il FAK e il CEM abbiano un modulo elastico dinamico più elevato rispetto a quello del CAL e del MKK. I risultati ottenuti risultano essere perfettamente coerenti con le tipologie di malte utilizzate e le loro prestazioni attese.

3.1.2 Resistenza a flessione

Nel grafico sottostante (Fig.24) viene riportata la resistenza a flessione misurata per tutte le tipologie di materiale a tutti i valori delle temperature prese in esame.

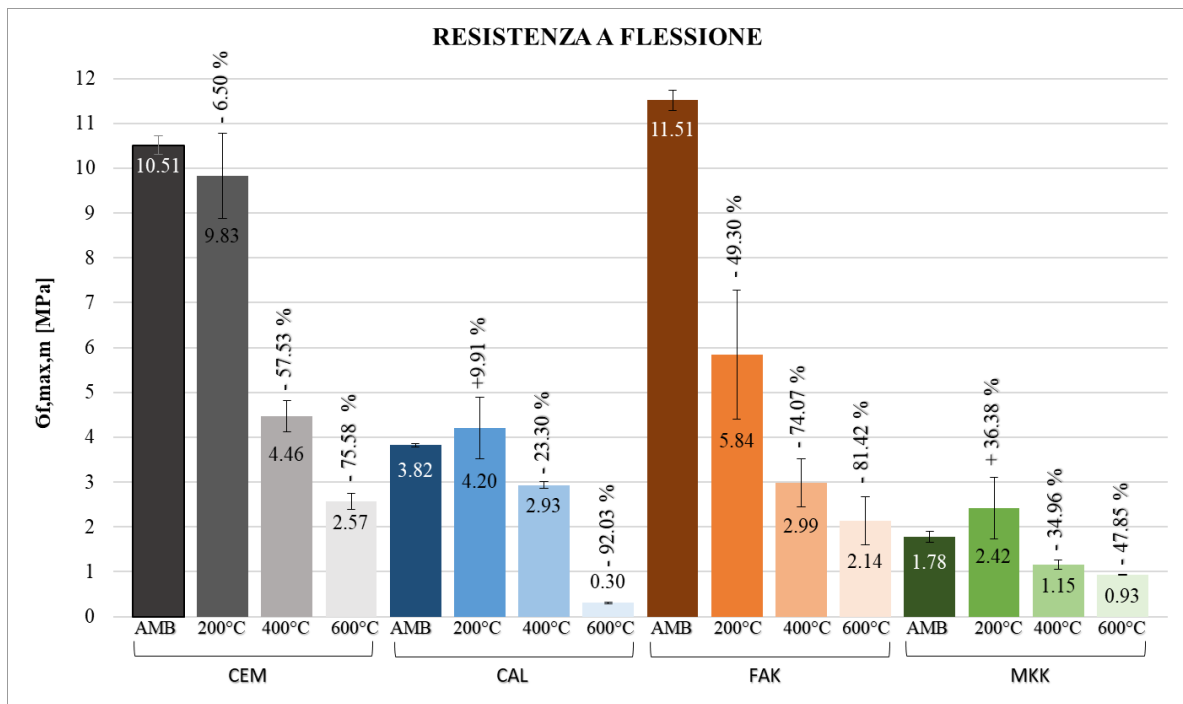


Figura 24 - Istogramma con valori di resistenza a flessione massima media per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura

Dall'osservazione dei grafici possiamo affermare che il FAK e il CEM presentino una resistenza a flessione molto più alta rispetto a quella del MKK e del CAL. Ulteriore osservazione che possiamo fare è che nel FAK abbiamo un forte decadimento della resistenza nel passaggio dalla temperatura ambiente ai 200°C, cosa che invece non accade nel CEM dove il valore si riduce con una percentuale inferiore.

Interessante è anche il comportamento del CAL e del MKK i quali entrambi, nel passaggio della condizione a temperatura ambiente e quella dei 200°C, presentano addirittura un miglioramento delle proprie prestazioni a flessione.

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

3.1.3 Resistenza a compressione

Nel grafico sottostante (Fig.25) sono riportati i risultati delle prove a compressione che sono state svolte sugli spezzoni ottenuti dalla prova a flessione.

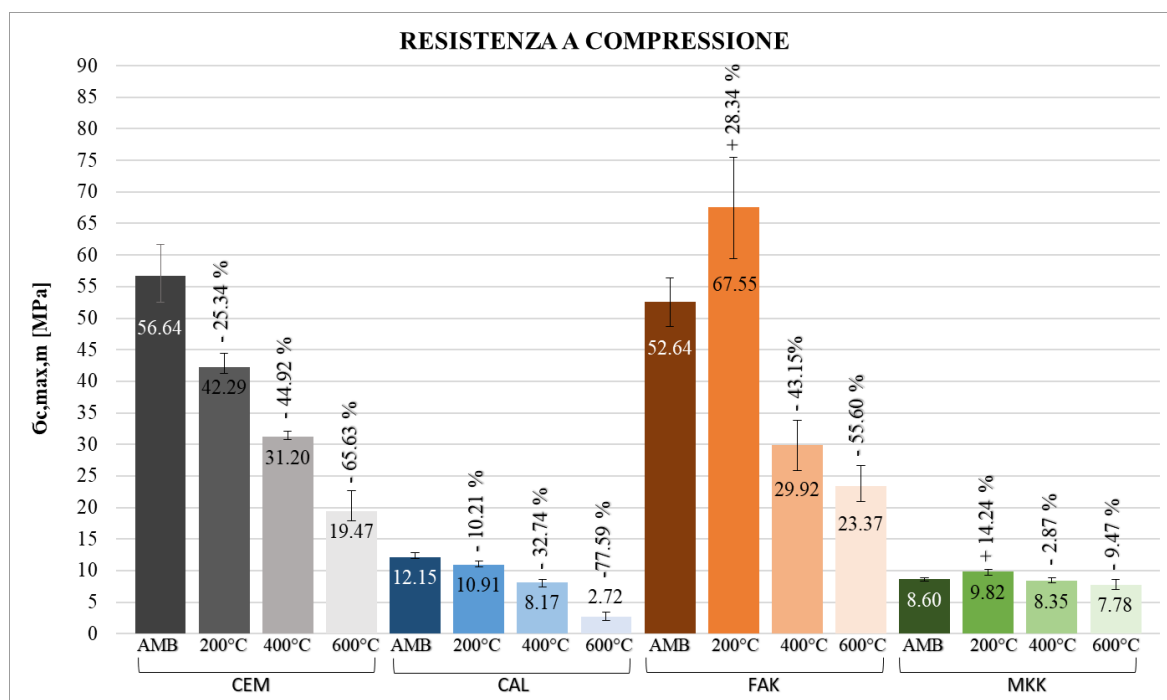


Figura 25 - Istogramma con valori di resistenza a compressione massima media per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura.

Dal grafico osserviamo che il CEM e il FAK presentano i valori più elevati rispetto al CAL e al MKK, anche in questo caso abbiamo un miglioramento delle prestazioni nel passaggio che va dalla temperatura ambiente ai 200°C che coinvolgono però il FAK e MKK.

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.

3.1.4 Resistenza a trazione (Tensile-test)

La prova a trazione è stata eseguita sui provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$, precedentemente esposti a differenti temperature. I grafici che seguono sono stati accoppiati come CEM-FAK e CAL-MKK al fine di avere un miglior confronto e una migliore sintesi di lettura (Fig. da 26 a 29).

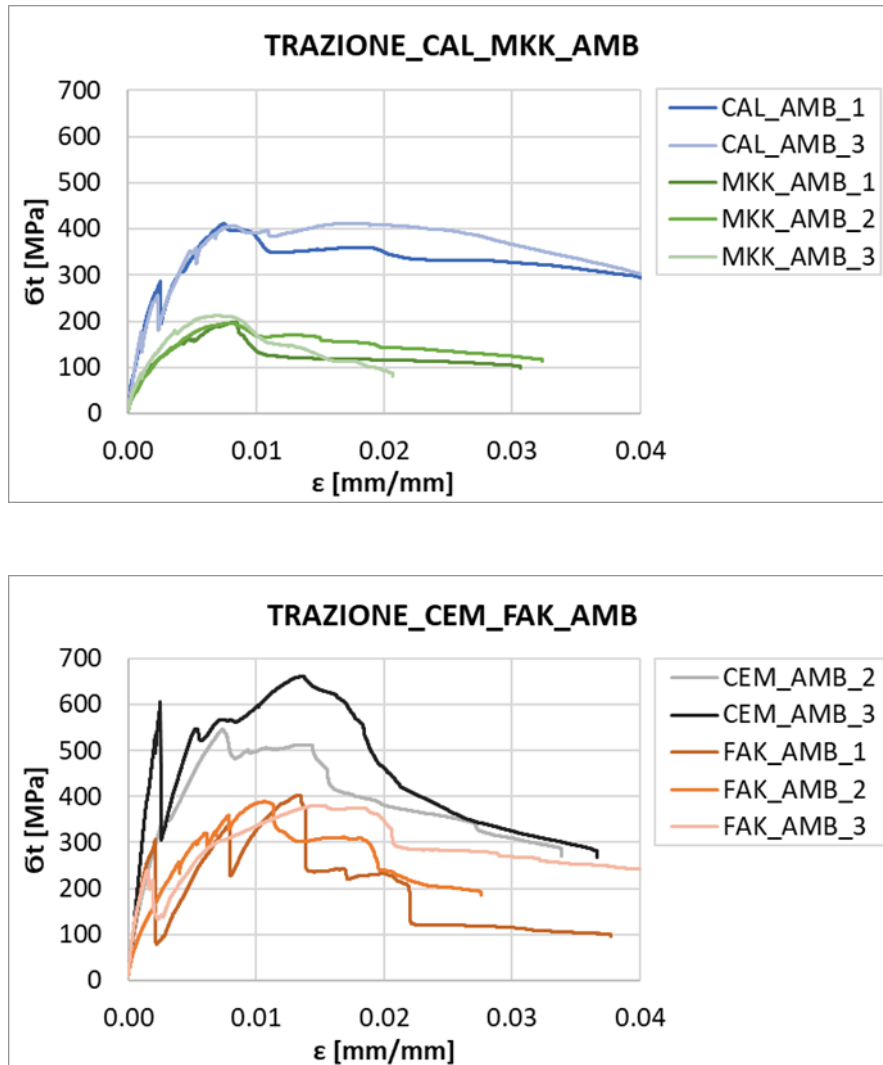


Figura 26 - Diagrammi Tensione-Deformazione da prova di trazione svolta su provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ che non hanno ricevuto il trattamento termico.

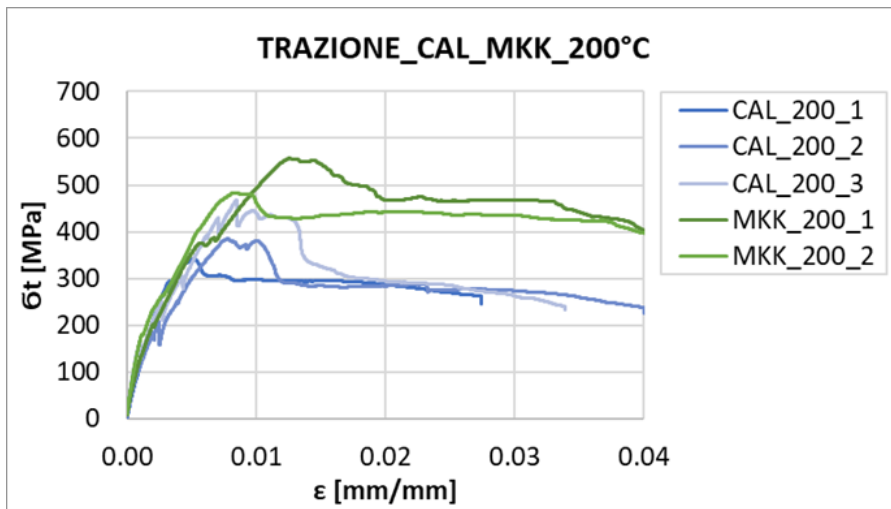
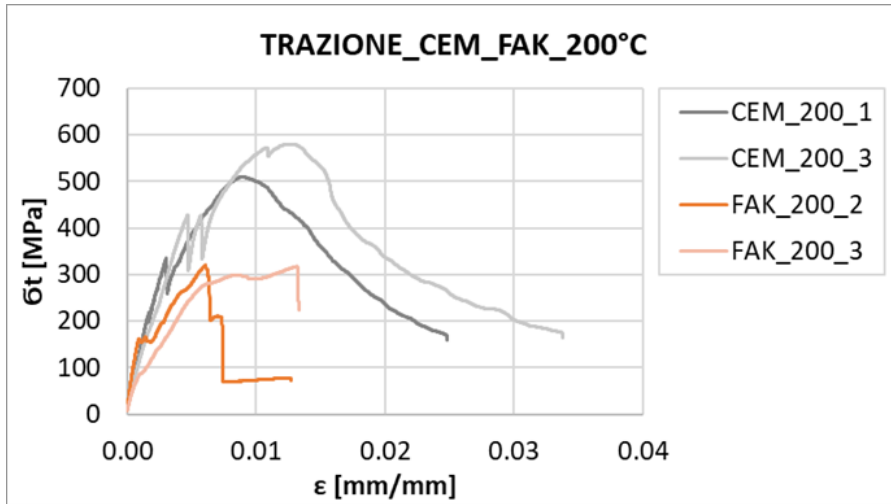
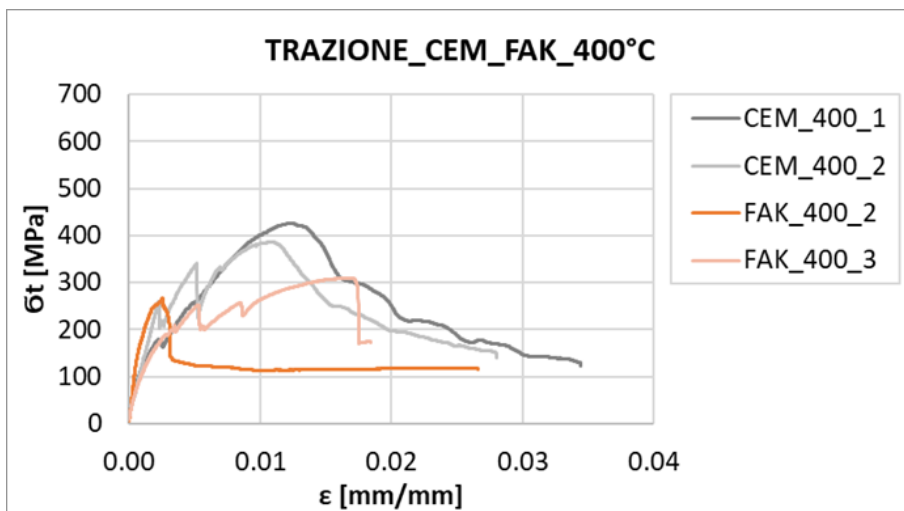


Figura 27 - Diagrammi Tensione-Deformazione da prova di trazione svolta su provini 19 x 4 x 1 cm³ che hanno ricevuto il trattamento termico a 200°C.



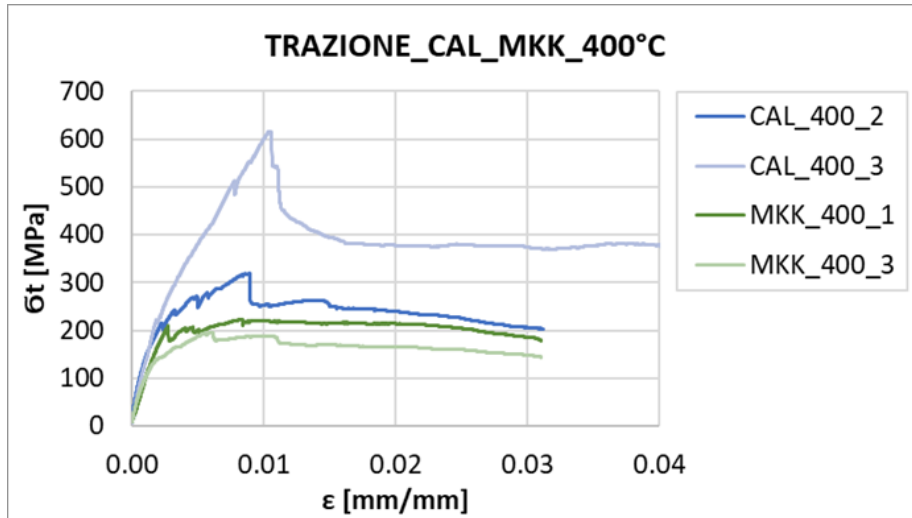
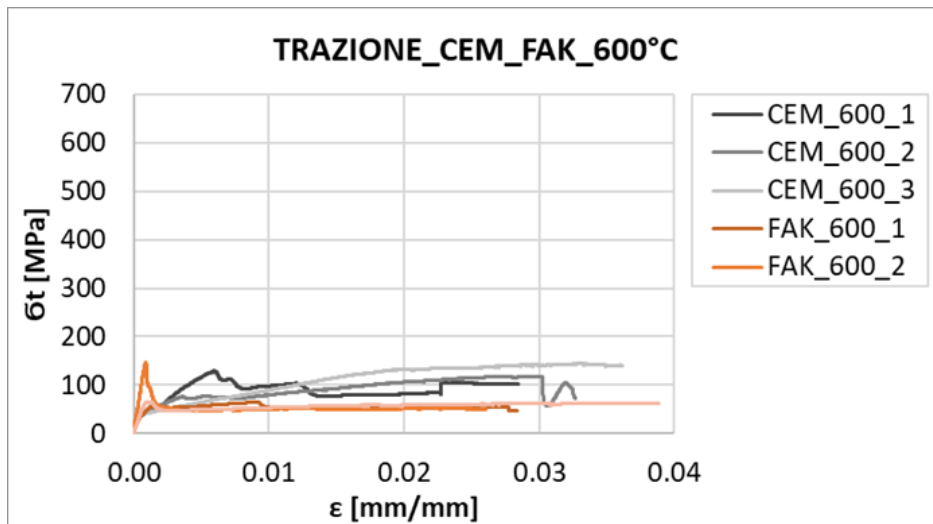


Figura 28 - Diagrammi Tensione-Deformazione da prova di trazione svolta su provini $19 \times 4 \times 1 \text{ cm}^3$ che hanno ricevuto il trattamento termico a 400°C .



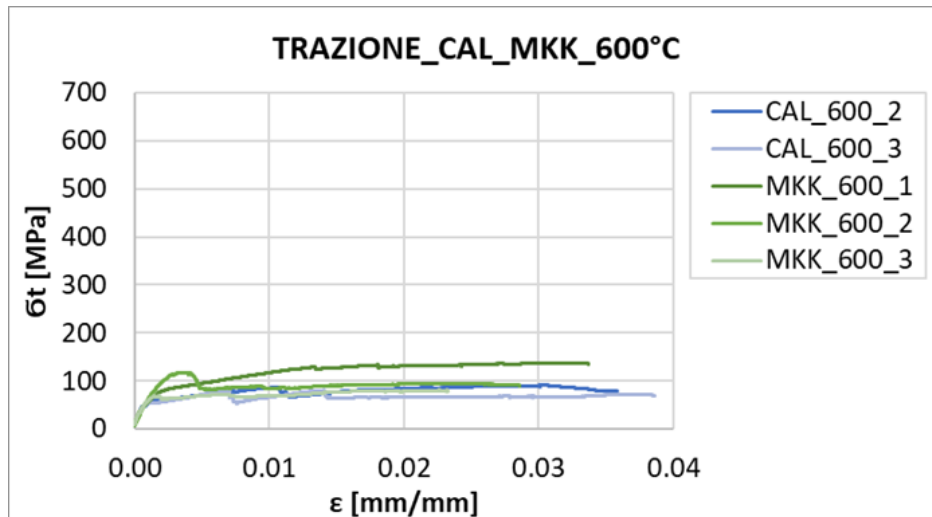


Figura 29 - Diagrammi Tensione-Deformazione da prova di trazione svolta su provini 19 x 4 x 1 cm³ che hanno ricevuto il trattamento termico a 600°C.

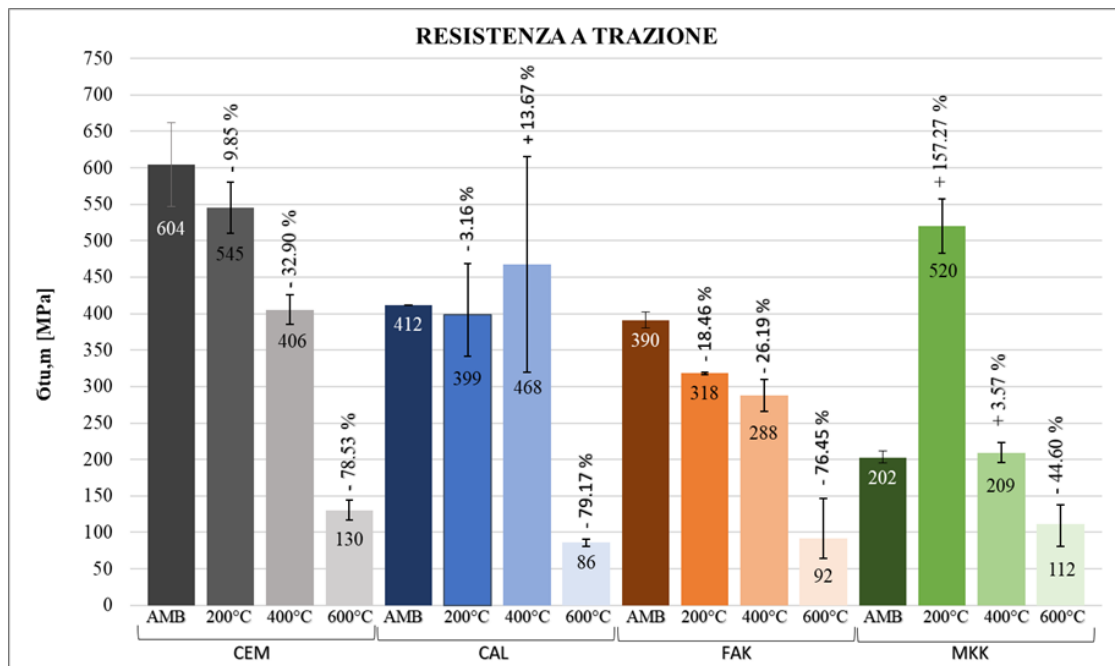


Figura 30 - Istogramma con valori di resistenza a trazione ultima media per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura, compresi di barre di errore e percentuale di decremento / incremento.

Dai vari grafici possiamo concludere che il CEM risulti essere il più performante tra tutte le matrici rinforzate in tutti i range di temperatura, presenta inoltre un forte decadimento delle prestazioni nel passaggio che vai dai 400°C ai 600°C (-78.53%).

Simile al comportamento del CEM è quello del FAK, infatti, esso mantiene dei valori abbastanza costanti fino ad una temperatura pari ai 400°C per poi avere un forte decadimento delle prestazioni nei 600°C (-76.45%).

Osserviamo invece che il CAL assume un comportamento non congruente ai precedenti casi, quest'ultimo presenta un particolare aumento della resistenza nel passaggio che vai 200°C ai 400°C. Bisogna però sottolineare che il CAL presenta anche una differenza di valori molto variabile e quindi questo ci fa trarre la conclusione di essere poco affidabile.

Infine, abbiamo il MKK, il quale presenta un aumento significativo della resistenza dopo essere stato sottoposto a 200°C, per poi avere nelle successive temperature una diminuzione della resistenza a compressione.

3.2 Osservazioni al microscopio ottico ed elettronico

3.2.1 Introduzione al microscopio ottico

Per lo studio è stato utilizzato un microscopio digitale con il quale si è andato a valutare con un approccio globale come si presentassero visivamente i vari provini sottoposti alle diverse temperature, più in particolare l'obbiettivo è stato quello di verificare se ci fossero fessurazioni importanti nella matrice e valutare in che condizione si presentassero le fibre, ovvero se il coating le mantenesse addensate tra di loro o no.

Le immagini sono state fatte ad un ingrandimento pari a 8X (Fig. da 47 a 62).

3.2.2 Introduzione al microscopio elettronico

Lo strumento utilizzato è il "SEM-FEG Zeiss SUPRA 40". Il "SEM" (il cui acronimo sta per Scanning Electron Microscopy) è uno strumento che utilizza come sonda un fascio focalizzato di elettroni, con energia compresa tra 1 e 30 keV; questi elettroni interagendo con il campione, generano altri elettroni che sono rilevati da un detector che ci restituisce un segnale. L'intensità del segnale determina la luminosità del pixel misurato. La formazione di un'immagine topografica è dovuta a una variazione locale dell'emissività elettronica del campione. Poiché gli elettroni interagiscono facilmente con la materia lo strumento deve trovarsi in vuoto.

Nello strumento utilizzato il fascio di elettroni è generato a partire da un filamento di tungsteno e viene successivamente focalizzato per mezzo di lenti elettromagnetiche, che sono particolarmente

efficaci per elettroni ad alta energia. L'interazione degli elettroni con il campione porta all'emissione di elettroni con origine differente: si possono rilevare gli elettroni che hanno subito un processo di retrodiffusione elastica e gli elettroni secondari, cioè gli elettroni che hanno subito più processi di scattering (ad esempio interazione con plasmoni, fononi, eccitazione di transizioni interbanda...) nel loro percorso verso la superficie.

Gli elettroni secondari e gli elettroni retrodiffusi (ad alta energia) provengono da zone differenti del campione. In particolare, si osserva che gli elettroni secondari provengono da una zona più vicina alla superficie e sono perciò in grado di fornire maggiori informazioni sulla morfologia del campione. Gli elettroni retro-diffusi invece forniscono principalmente informazioni sulla natura compositiva del campione.

Il SEM, infine, ci restituisce una mappa bidimensionale di intensità in cui ogni pixel dell'immagine corrisponde ad un punto del campione che viene rappresentato con un tono di grigio: tanto più chiaro quanto più elevato è il segnale (cioè, il numero di elettroni) catturato dal detector in quel punto. Con il SEM quindi non si ottengono vere immagini del campione ma ricostruzioni ottenute scansionando in modo sistematico la superficie del campione. L'ingrandimento prodotto dal microscopio elettronico a scansione è il rapporto tra le dimensioni dell'immagine finale prodotta ed il campo esplorato dal fascio elettronico sul campione e può variare da 10 a 200.000 X.

3.2.3 Risultati ottenuti

Di seguito vengono riportate le mappe bidimensionali (Fig. da 31 a 46) ottenute dalle osservazioni effettuate tramite il SEM.



Figura 31 - Mappa bidimensionale CEMamb a 100X

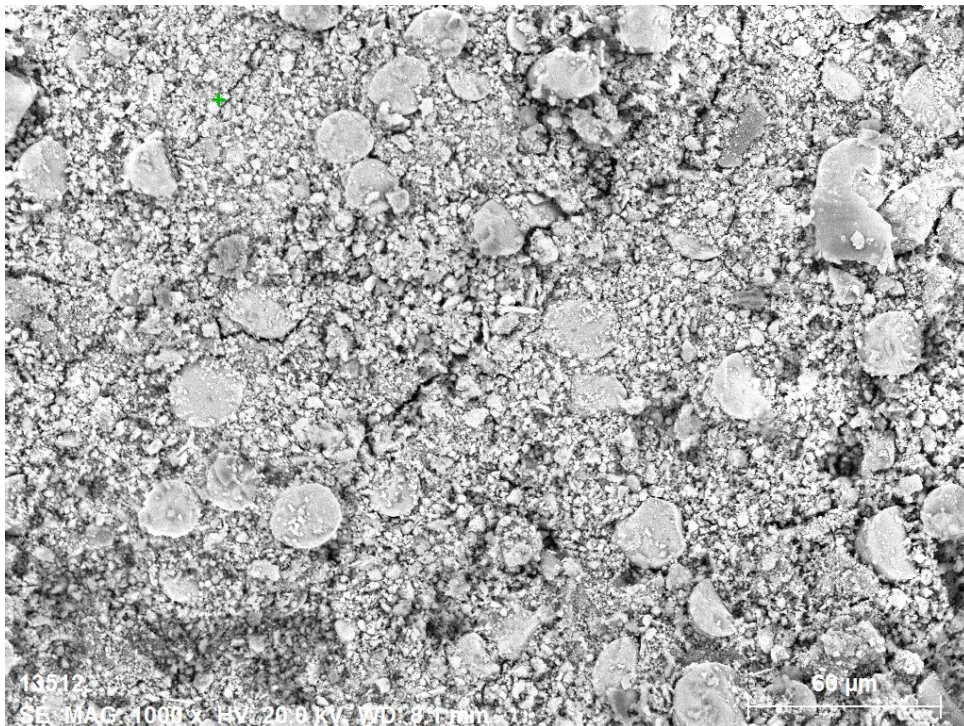


Figura 32 - Mappa bidimensionale CEM200 a 1000X



Figura 33 - Mappa bidimensionale CEM400 a 290X

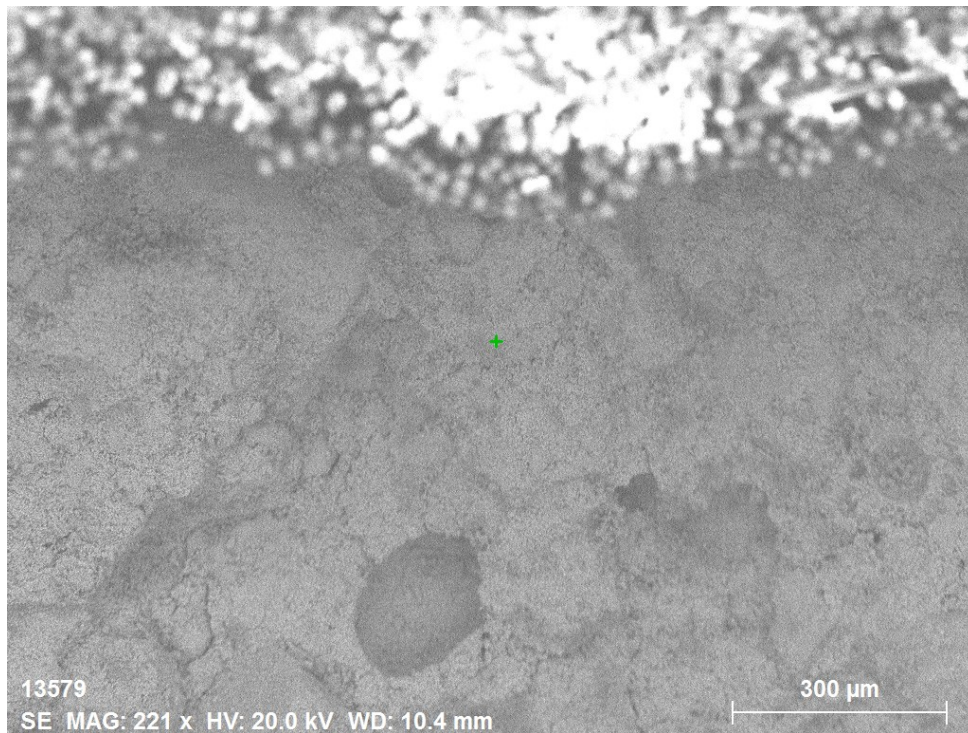


Figura 34 - Mappa bidimensionale CEM600 a 221X

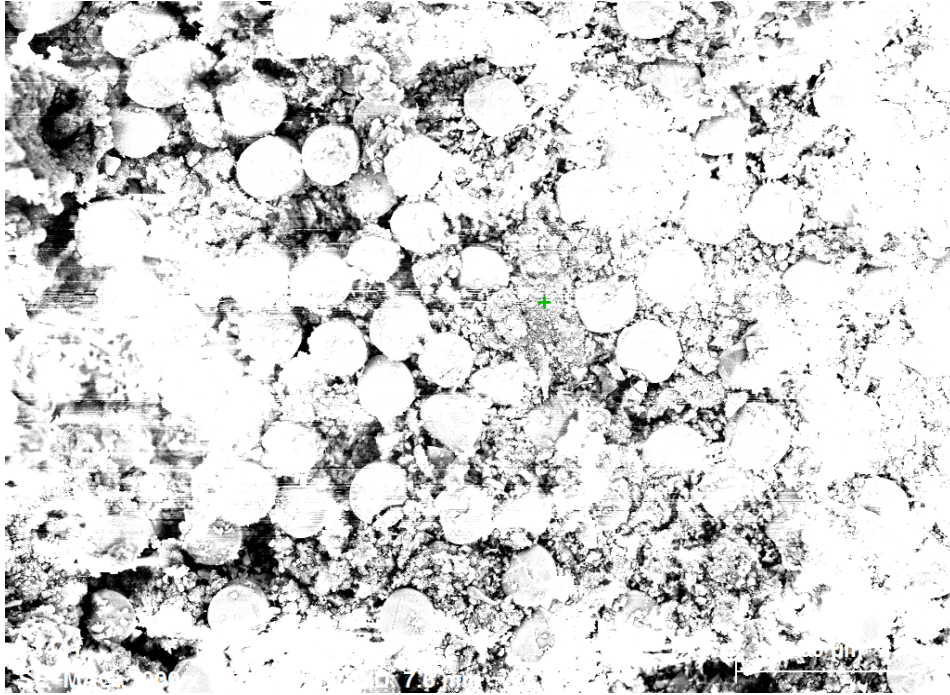


Figura 35 - Mappa bidimensionale CALamb a 900X

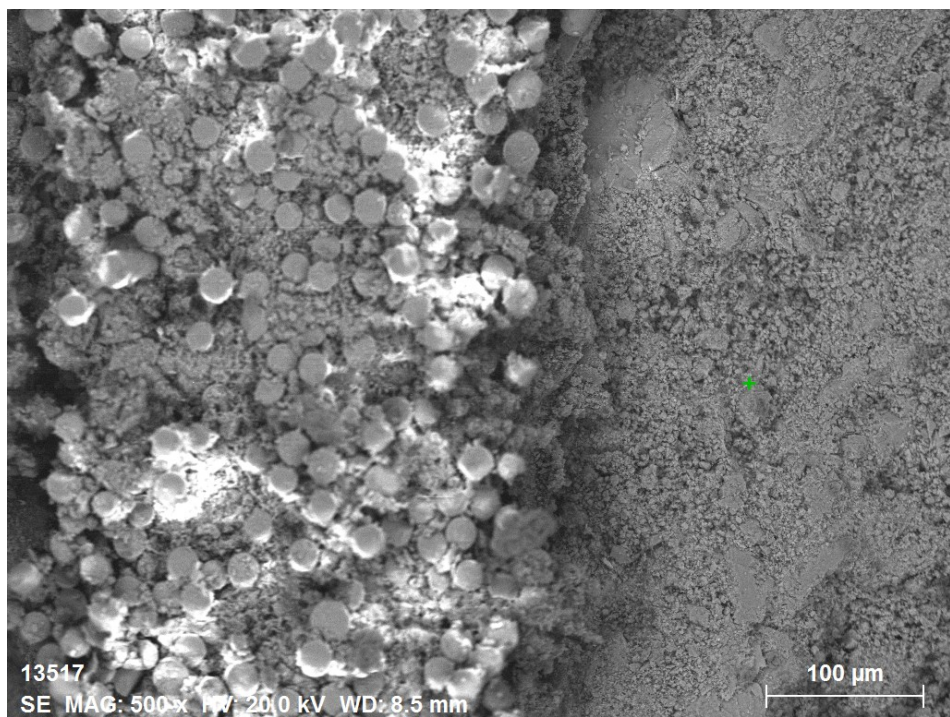


Figura 36 - Mappa bidimensionale CAL200 a 500X

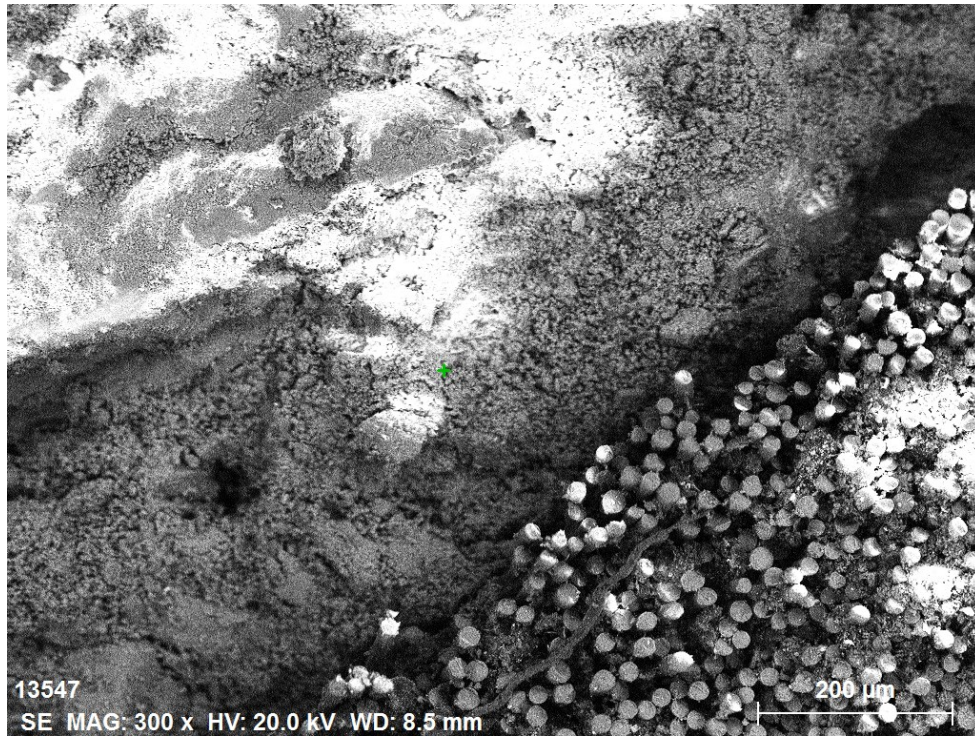


Figura 37 - Mappa bidimensionale CAL400 a 300X

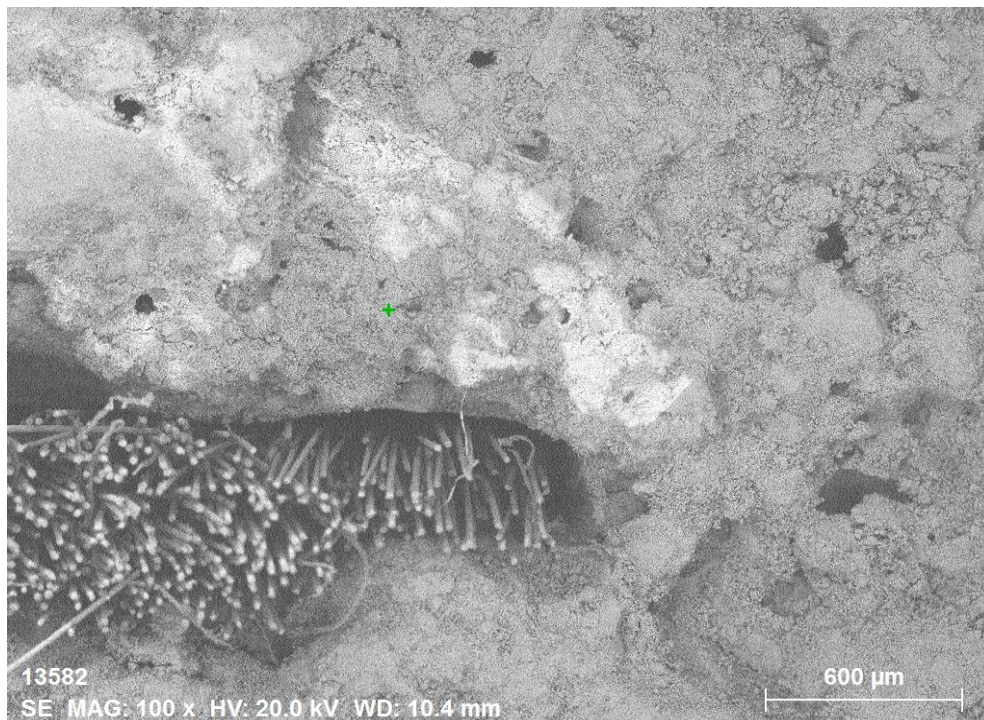


Figura 38 - Mappa bidimensionale CAL600 a 100X

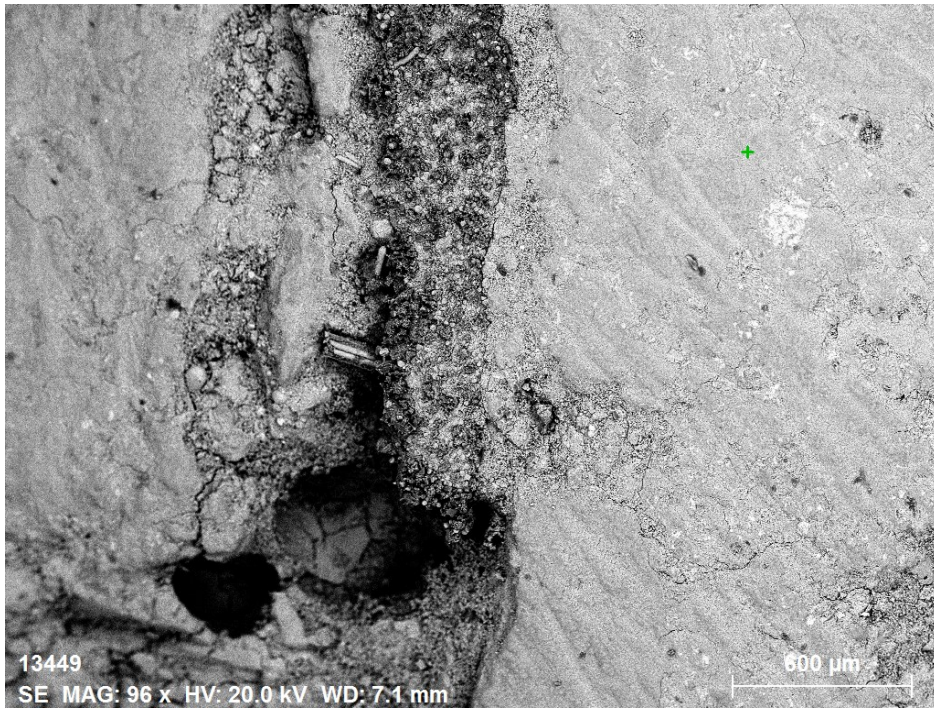


Figura 39 - Mappa bidimensionale FAKamb a 96X

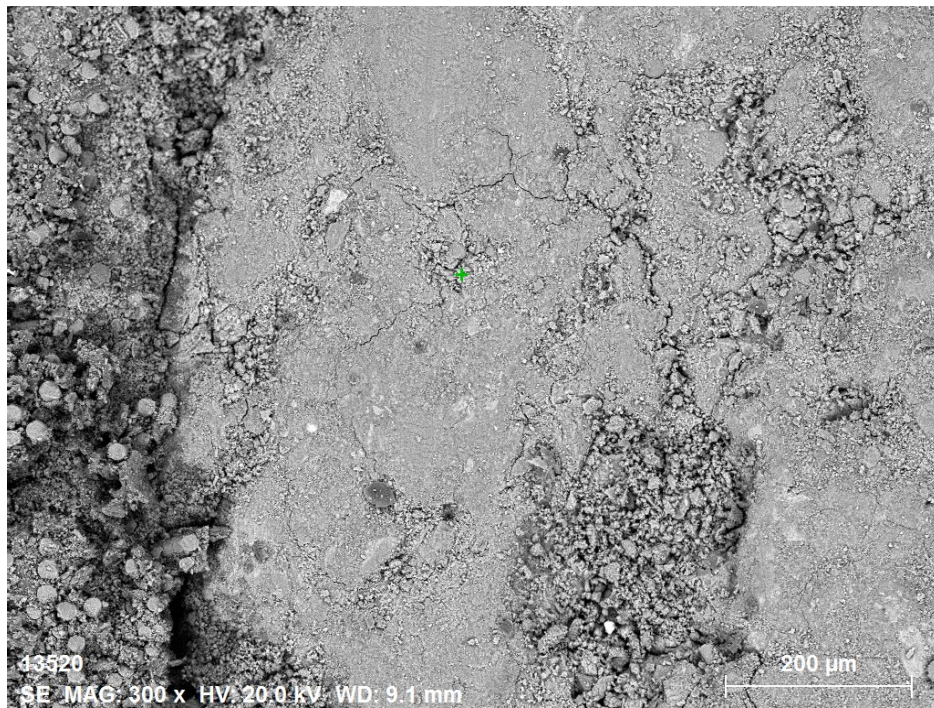


Figura 40 - Mappa bidimensionale FAK200 a 300X

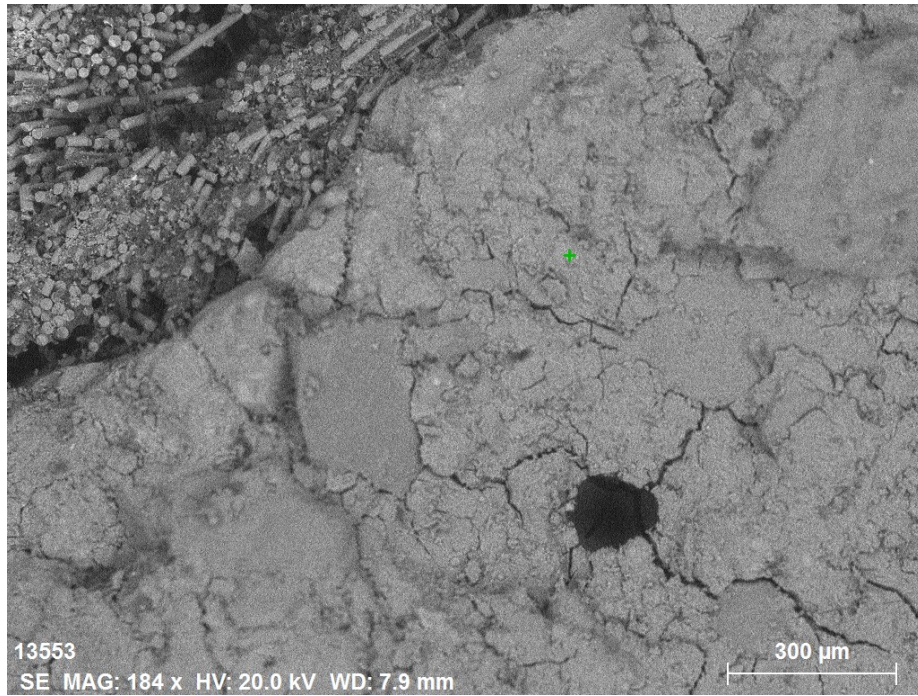


Figura 41 - Mappa bidimensionale FAK400 a 184X

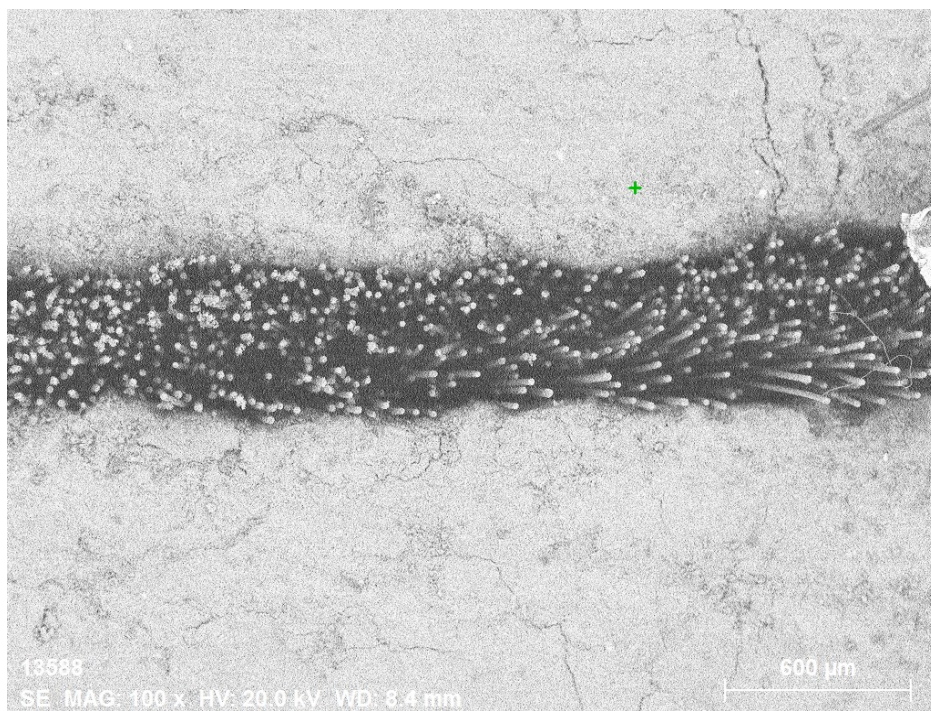


Figura 42 - Mappa bidimensionale FAK600 a 100X

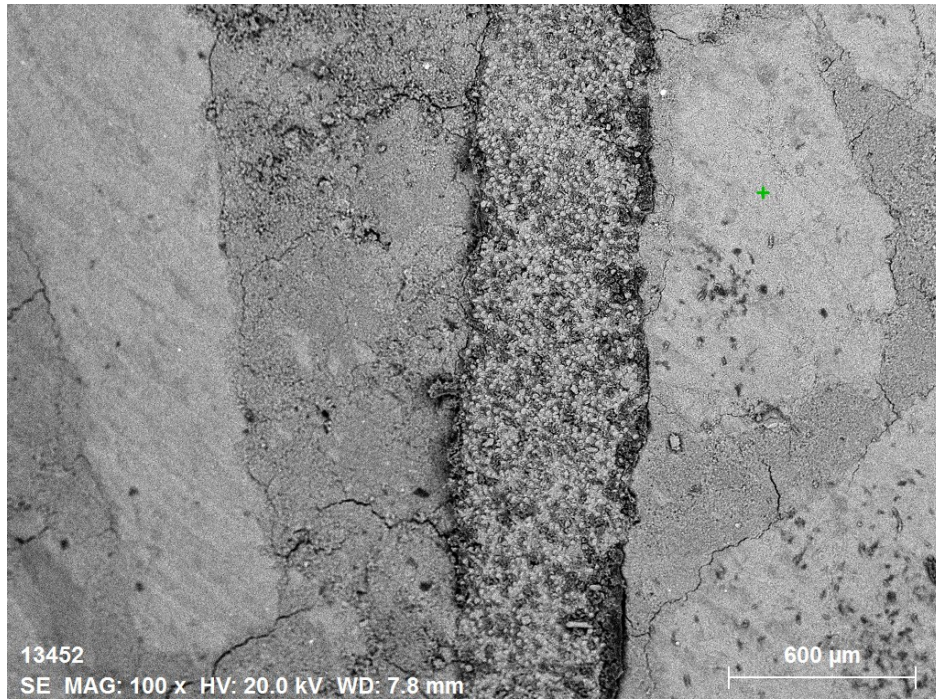


Figura 43 - Mappa bidimensionale MKKamb a 100X

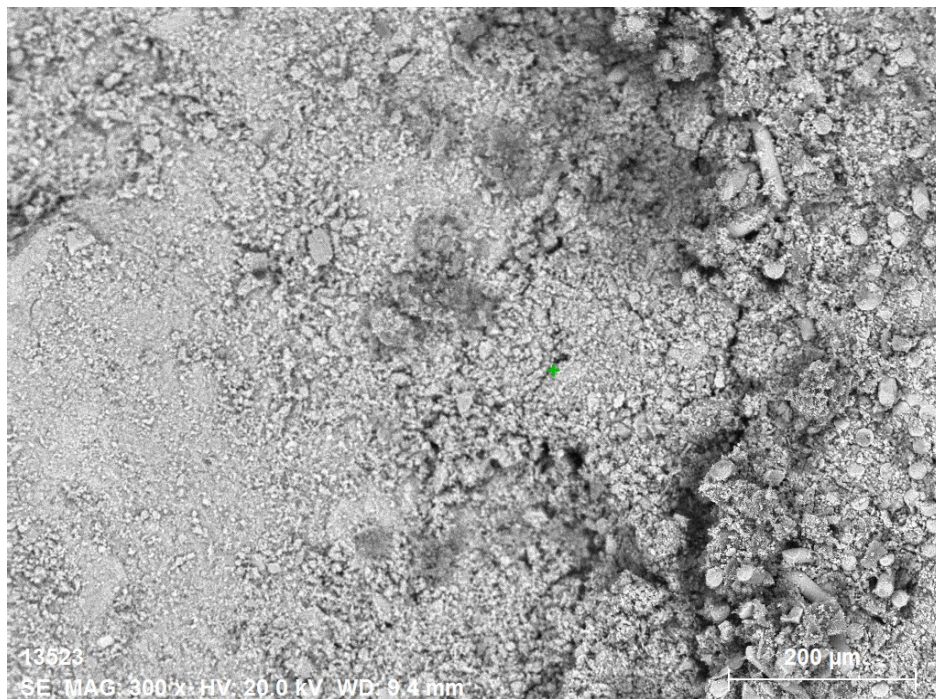


Figura 44 - Mappa bidimensionale MKK200 a 300X



Figura 45 - Mappa bidimensionale MKK400 a 74X

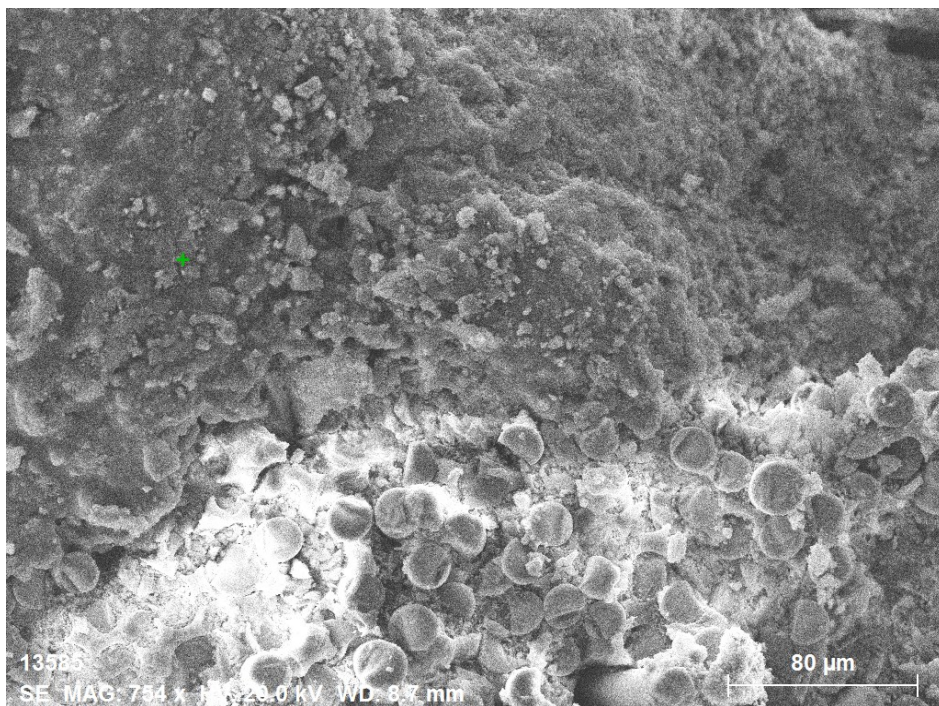


Figura 46 - Mappa bidimensionale MKK600 a 754X

Le immagini che seguono sono quelle ottenute tramite microscopio ottico e sono state fatte ad un ingrandimento pari a 8X (Fig. da 47 a 62).



Figura 47 - Immagine a 8X del provino CEMamb

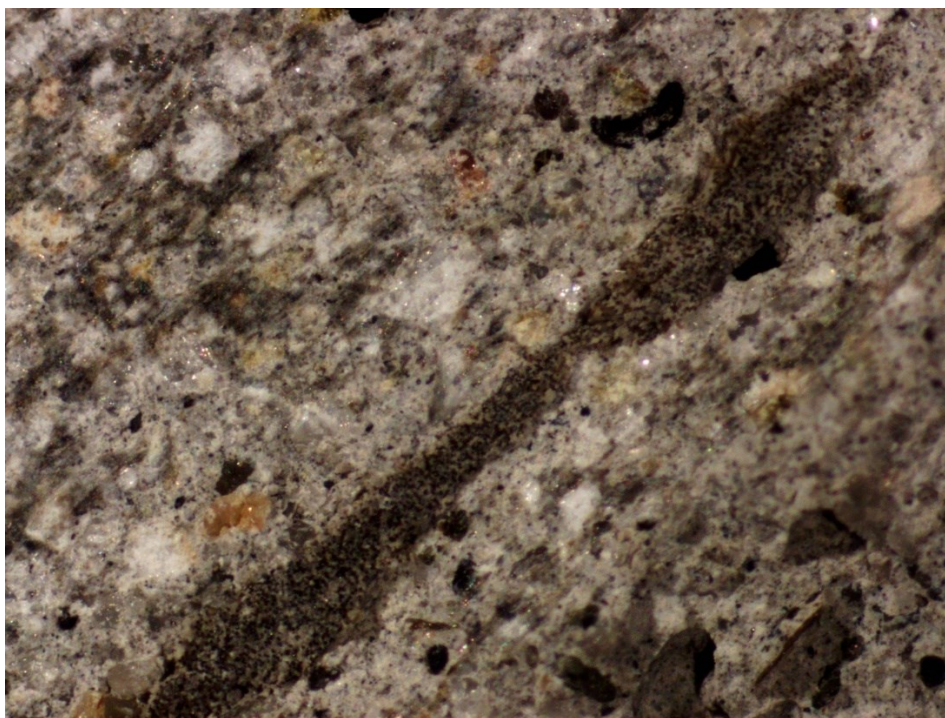


Figura 48 - Immagine a 8X del provino CEM 200°C



Figura 49 - Immagine a 8X del provino CEM 400°C



Figura 50 - Immagine a 8X del provino CEM 600°C- fibra



Figura 51 - Immagine a 8X del provino FAKamb



Figura 52 - Immagine a 8X del provino FAK-200°C



Figura 53 - Immagine a 8X del provino FAK-400°C



Figura 54 - Immagine a 8X del provino FAK-600°C



Figura 55 - Immagine a 8X del provino LIMEamb



Figura 56 - Immagine a 8X del provino LIME-200°C



Figura 57 - Immagine a 8X del provino LIME-400°C



Figura 58 - Immagine a 8X del provino LIME-600°C



Figura 59 - Immagine a 8X del provino MKKamb



Figura 60 - Immagine a 8X del provino MKK-200°C



Figura 61 - Immagine a 8X del provino MKK-400°C



Figura 62 - Immagine a 8X del provino MKK-600°C

3.2.4 Commento dei risultati ottenuti

In questa fase è stata effettuata un'analisi visiva dei vari provini; per andarli a caratterizzare in maniera più chiara e per andare a descrivere al meglio le condizioni in cui si presentano, sono state costruite le seguenti tabelle (Tab. da 10 a 13) nel quale troviamo le seguenti voci:

- Provino: nel quale viene specificato la tipologia di provino presa in considerazione
- Temperatura: identifica la classe termica del provino preso in esame
- Matrice: descrizione su base visiva delle condizioni della matrice (eventuale presenza di fessurazioni, valutazione rispetto l'interfaccia con le fibre ecc...)
- Fibre: descrizione su base visiva delle condizioni delle fibre (presenza o no del coating esterno, analisi relativa alla disposizione delle fibre quindi se addensate o no ecc...)

| TIPOLOGIA PROVINO | TEMPERATURA | MATRICE | FIBRE |
|-------------------|-------------|---|--|
| CEM | Ambiente | Assenza di fessurazioni dovute a stress termico, presenza di porosità dovute dalla natura della matrice, stato generale della matrice buono | Perfettamente addensate, presenza del coating esterno, perfetta aderenza con la matrice circostante |
| | 200°C | Assenza di fessurazioni dovute a stress termico, presenza di porosità dovute dalla natura della matrice, stato generale della matrice buono | Perfettamente addensate, presenza del coating esterno, perfetta aderenza con la matrice circostante |
| | 400°C | Assenza di fessurazioni dovute a stress termico, aumento delle porosità rispetto ai casi precedenti, colore generale della matrice più chiaro | Discreto addensamento delle fibre (piccoli vuoti presenti soprattutto nella zona centrale), coating esterno presente a tratti alterni, interfaccia con la matrice discreta (presenza di vuoti tra matrice e fibre) |
| | 600°C | Assenza di fessurazioni dovute a stress termico, porosità pressoché identiche rispetto ai 400°C, colore generale della matrice più chiaro | Basso addensamento delle fibre dovuto dalla perdita del coating esterno, interfaccia con la matrice discreta (presenza di vuoti tra matrice e fibre) |

Tabella 10 - Tabella descrittiva della matrice e delle fibre del provino CEM a tutte le temperature

| TIPOLOGIA PROVINO | TEMPERATURA | MATRICE | FIBRE |
|-------------------|-------------|--|---|
| FAK | Ambiente | Assenza di fessurazioni dovute a stress termico, presenza di porosità dovute dalla natura della matrice, stato | Perfettamente addensate, presenza del coating esterno, perfetta aderenza con la matrice circostante |

| | | | |
|--|-------|--|---|
| | | generale della matrice buono | |
| | 200°C | Distacco di una porzione della matrice rispetto le fibre centrali, stato generale della matrice discreto. Dal SEM registriamo anche nascita di piccole fessure nella matrice. | Perfettamente addensate, presenza del coating esterno, aderenza con la matrice discreta influenzata dal distaccamento di una porzione con la matrice stessa |
| | 400°C | Presenza di microfessurazioni (soprattutto nella zona in basso a destra), insorgenza di fori dovute probabilmente dal distacco di alcuni grani di inerte | Discreto addensamento delle fibre (piccoli vuoti presenti soprattutto nella zona centrale), coating esterno presente a tratti alterni (notiamo infatti tratti più chiari e tratti più scuri), interfaccia con la matrice discreta |
| | 600°C | Alto degrado della matrice descritto dal distacco di una porzione di matrice stessa, colorazione della matrice in generale più chiaro rispetto ai casi precedenti. Dal SEM registriamo aumento in lunghezza e ampiezza delle fessurazioni presenti nella matrice | Basso addensamento delle fibre dovuto dalla perdita del coating esterno, interfaccia con la matrice discreta nella zona superiore ed assente in quella inferiore (dovuta dal distacco di una porzione di matrice) |

Tabella 11 - Tabella descrittiva della matrice e delle fibre del provino FAK a tutte le temperature

| TIPOLOGIA PROVINO | TEMPERATURA | MATRICE | FIBRE |
|-------------------|-------------|--|---|
| CAL | Ambiente | Assenza di fessurazioni dovute a stress termico, presenza di piccole porosità dovute dalla natura della matrice, | Perfettamente addensate, presenza del coating esterno, perfetta aderenza con la matrice circostante |

| | | | |
|--|-------|---|--|
| | | stato generale della matrice ottimo | |
| | 200°C | Assenza di fessurazioni dovute a stress termico, presenza di porosità più elevate rispetto al caso precedente (in particolare nella zona centrale sotto le fibre), stato generale della matrice buono | Perfettamente addensate, presenza del coating esterno, aderenza con la matrice discreta influenzata dalla presenza di alcune porosità in prossimità delle fibre stesse |
| | 400°C | Assenza di fessurazioni dovute a stress termico, presenza di porosità pressoché identiche al caso precedente, stato generale della matrice buono | Buon addensamento delle fibre, coating esterno presente a tratti alterni (notiamo infatti tratti più chiari e tratti più scuri), interfaccia con la matrice discreta |
| | 600°C | Assenza di fessurazioni dovute a stress termico, aumento in quantità e grandezza delle porosità rispetto al caso precedente, stato generale della matrice discreto | Basso addensamento delle fibre, interfaccia con la matrice discreta con parte critica nella zona in bassa dove abbiamo porosità più grandi |

Tabella 12 - Tabella descrittiva della matrice e delle fibre del provino CAL a tutte le temperature

| TIPOLOGIA PROVINO | TEMPERATURA | MATRICE | FIBRE |
|-------------------|-------------|--|--|
| MKK | Ambiente | Assenza di fessurazioni dovute a stress termico, stato generale della matrice ottimo | Perfettamente addensate, presenza del coating esterno, perfetta aderenza con la matrice circostante |
| | 200°C | Assenza di fessurazioni dovute a stress termico, stato generale della matrice ottimo | Perfettamente addensate, presenza del coating esterno (anche se non in maniera omogenea), perfetta aderenza con la matrice circostante |
| | 400°C | Assenza di fessurazioni dovute a stress termico, | Discreto addensamento delle fibre, coating esterno |

| | | | |
|--|-------|---|---|
| | | leggero distacco della matrice dalle fibre centrali | presente a tratti alterni (peggiore della situazione precedente), interfaccia con la matrice discreta |
| | 600°C | Assenza di fessurazioni dovute a stress termico, distacco generale di porzione di matrice che influenzano anche l'interfaccia con le fibre stesse | Discreto addensamento delle fibre, interfaccia con la matrice discreta |

Tabella 13 - Tabella descrittiva della matrice e delle fibre del provino MKK a tutte le temperature

3.3 Prove di trazione su yarn in basalto

3.3.1 Setup di prova

Il provino è stato fissato sulle due estremità alle ganasce del macchinario lasciando la zona centrale libera. La prova a trazione consiste nel sottoporre un provino, fissato al macchinario con un afferraggio a morsetto, ad uno sforzo continuo crescente fino alla rottura, con una velocità di spostamento di 1,5 mm/min. In figura (Fig.63) è riportato il setup di prova.

La macchina di prova è collegata ad un computer, il quale mediante l'utilizzo di un programma, è in grado di registrare tutti i valori del carico e dello spostamento che si ottengono in tempo reale. Il termine della prova si ottiene quando il provino arriva a rottura.

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

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

Dove:

- σ è la resistenza di trazione in MPa
- F è la forza di trazione in N

- A è l'area nominale del singolo yarn in mm² pari a 1.33 mm²

Per calcolare la deformazione invece abbiamo usato la formula:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{s}{l_0}$$

Dove:

- ε è la deformazione di trazione adimensionale mm/mm
- l_0 è la lunghezza iniziale del provino in mm
- l è la lunghezza finale del provino in mm dopo lo svolgimento della prova
- s 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.



Figura 63 - Setup prova a trazione

3.3.2 Risultati ottenuti

A seguito dei test effettuati è stata costruita la seguente tabella (Tab.14), la quale racchiude le seguenti informazioni:

- F_{\max} è la forza massima in Newton registrata durante la prova
- $s (F_{\max})$ è il valore dell'allungamento del provino riferito alla forza massima ad esso applicata
- σ_{\max} è il valore della tensione massima in MPa registrata durante la prova

- $\varepsilon (\bar{\sigma}_{\max})$ è la deformazione di trazione adimensionale mm/mm riferita alla tensione massima
- F_m è la forza massima media registrata (per ogni temperatura abbiamo quattro campioni)
- $\text{Max}-F_m$ è la differenza tra il valore della forza massima registrata e la media tra le varie forze massime nello stesso range termico
- $F_m\text{-min}$ è la differenza tra la media dei valori della forza registrati nello stesso range termico e il valore minimo della forza registrato nei quattro provini facenti parti anche essi dello stesso range termico
- s_m è il valore medio dell'allungamento in mm registrato per i quattro provini facenti parti dello stesso range termico
- $\bar{\sigma}_m$ è il valore della tensione media in MPa registrata per i quattro provini facenti parti dello stesso range termico
- $\text{Max}-\bar{\sigma}_m$ è la differenza tra la media dei valori della tensione registrati nello stesso range termico e il valore massimo della tensione registrato nei quattro provini facenti parti dello stesso range termico
- $\bar{\sigma}_m\text{-min}$ è la differenza tra la media dei valori della tensione registrati nello stesso range termico e il valore minimo della tensione registrato nei quattro provini facenti dello stesso range termico
- ε_m è la media tra i valori di deformazioni registrati nei quattro campioni riferita alla tensione massima

| | F_{\max} | $s(F_{\max})$ | σ_{\max} | $\varepsilon(\sigma_{\max})$ | F_m | $\text{Max}-F_m$ | $F_m\text{-min}$ | s_m | $\bar{\sigma}_m$ | $\text{Max}-\bar{\sigma}_m$ | $\bar{\sigma}_m\text{-min}$ | ε_m |
|--------|------------|---------------|-----------------|------------------------------|----------|------------------|------------------|-------|------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| | [N] | [mm] | [MPa] | [mm/mm] | [N] | [N] | [N] | [mm] | [MPa] | [MPa] | [MPa] | [mm/mm] |
| AmbTr1 | 1.731,77 | 7,85 | 1.302,08 | 0,06 | 1.790,19 | 162,48 | 223,13 | 7,61 | 1.346,01 | 122,16 | 167,77 | 0,06 |
| AmbTr2 | 1.909,27 | 7,12 | 1.435,54 | 0,05 | | | | | | | | |
| AmbTr3 | 1.952,67 | 6,77 | 1.468,17 | 0,05 | | | | | | | | |
| AmbOr1 | 1.567,06 | 8,69 | 1.178,24 | 0,07 | | | | | | | | |
| 200Tr1 | 1.793,61 | 6,46 | 1.348,58 | 0,05 | 1.736,38 | 72,42 | 112,32 | 7,59 | 1.305,55 | 54,45 | 84,45 | 0,06 |
| 200Or1 | 1.719,05 | 7,69 | 1.292,52 | 0,06 | | | | | | | | |
| 200Or2 | 1.808,80 | 8,46 | 1.360,00 | 0,07 | | | | | | | | |
| 200Or3 | 1.624,06 | 7,75 | 1.221,10 | 0,06 | | | | | | | | |
| 400Tr1 | 475,54 | 3,29 | 357,55 | 0,03 | 369,92 | 105,62 | 102,43 | 3,16 | 278,14 | 79,41 | 77,01 | 0,02 |
| 400Or1 | 377,23 | 3,60 | 283,63 | 0,03 | | | | | | | | |
| 400Or2 | 267,49 | 2,78 | 201,12 | 0,02 | | | | | | | | |
| 400Or3 | 359,41 | 2,96 | 270,24 | 0,02 | | | | | | | | |
| 600Tr1 | 49,68 | 0,61 | 37,35 | 0,00 | 58,84 | 14,09 | 11,06 | 0,93 | 44,24 | 10,59 | 8,32 | 0,01 |
| 600Or1 | 47,78 | 1,12 | 35,92 | 0,01 | | | | | | | | |
| 600Or2 | 64,98 | 0,89 | 48,85 | 0,01 | | | | | | | | |
| 600Or3 | 72,93 | 1,09 | 54,83 | 0,01 | | | | | | | | |

Tabella 14 - Tabella riassuntiva dei dati ottenuti dalle prove a trazione delle fibre in basalto sottoposte a diverse temperature

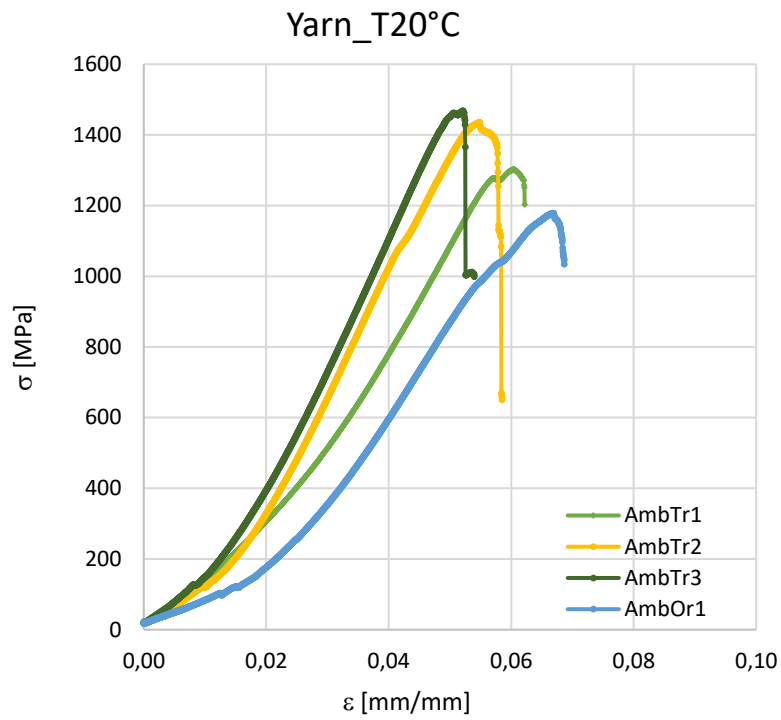


Figura 64 - Diagrammi Tensione–Deformazione da prova di trazione svolta sulle fibre in basalto che non hanno ricevuto il trattamento termico.

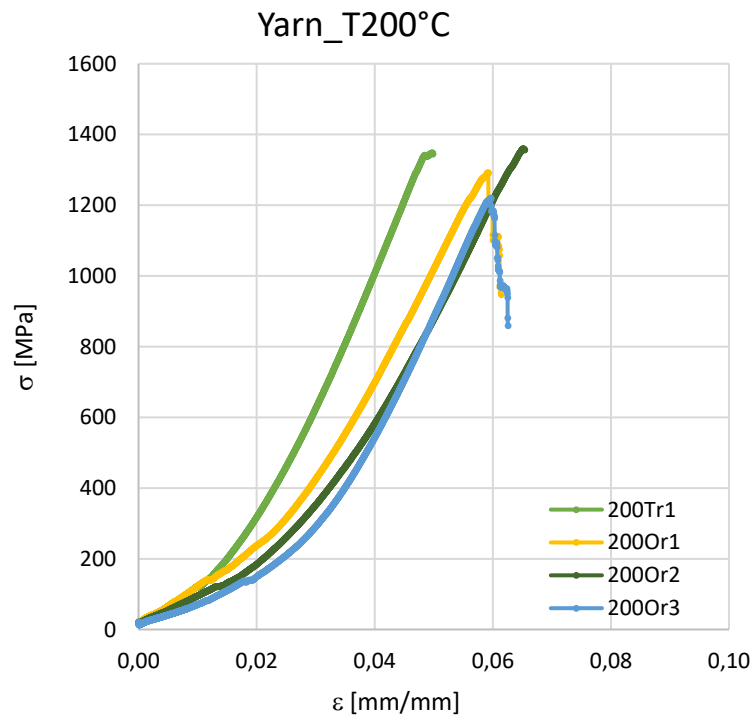


Figura 65 - Diagrammi Tensione–Deformazione da prova di trazione svolta sulle fibre in basalto che hanno ricevuto il trattamento termico a 200°C.

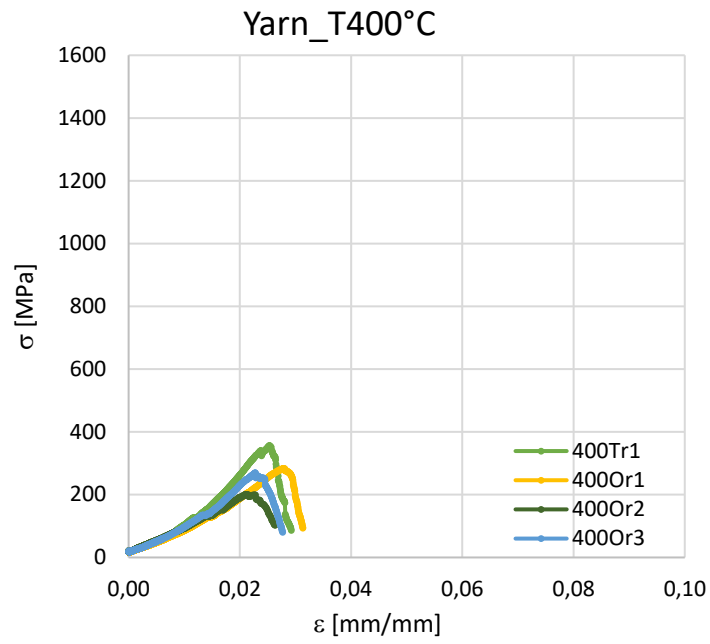


Figura 66 - Diagrammi Tensione-Deformazione da prova di trazione svolta sulle fibre in basalto che hanno ricevuto il trattamento termico a 400°C.

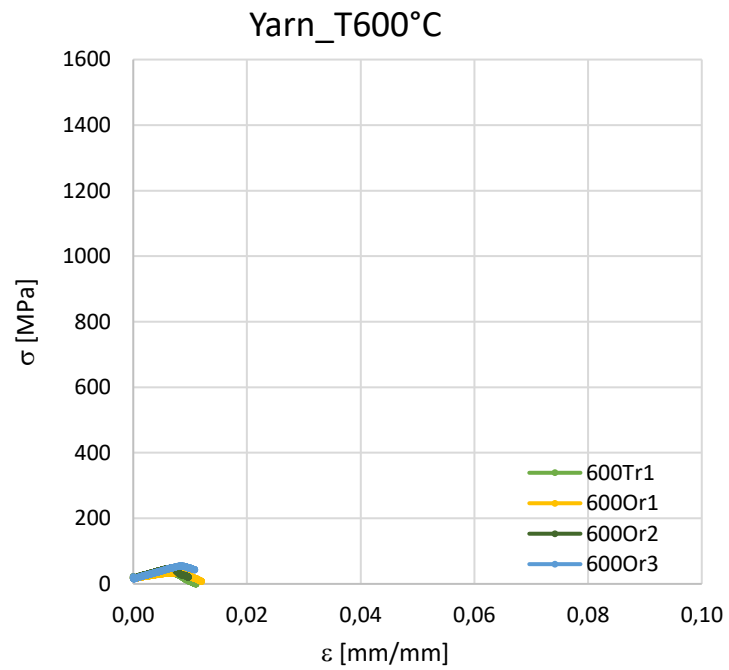


Figura 67 - Diagrammi Tensione-Deformazione da prova di trazione svolta sulle fibre in basalto che hanno ricevuto il trattamento termico a 600°C.

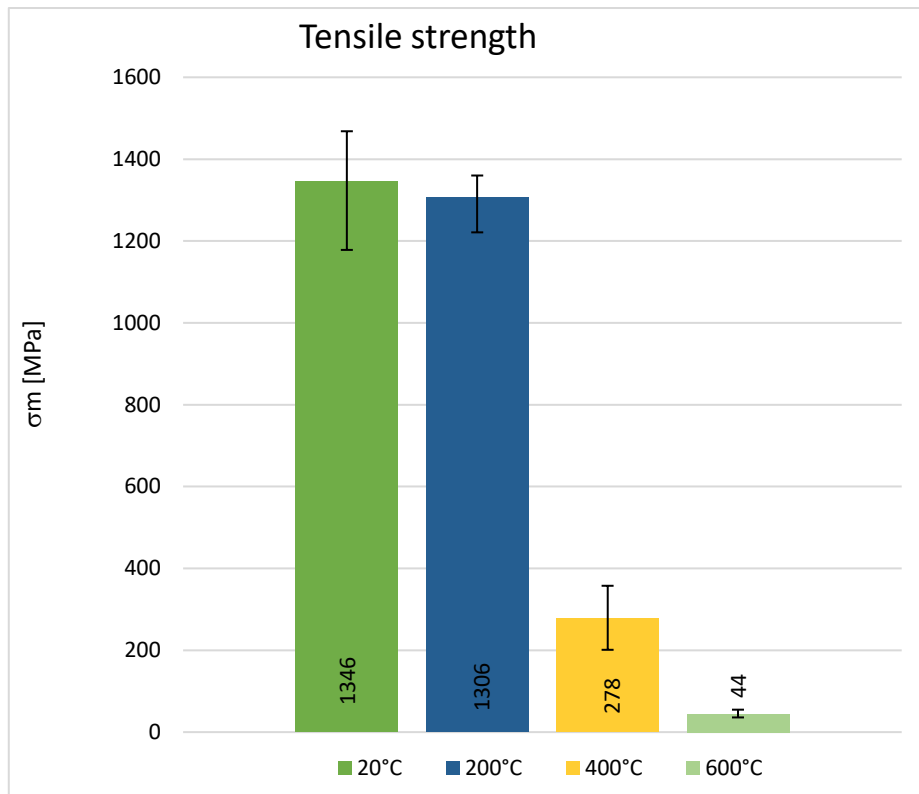


Figura 68 - Istogramma riassuntivo dei dati ottenuti dalle prove a trazione (Tensile-strength) sulle fibre dopo l'esposizione alle diverse temperature.

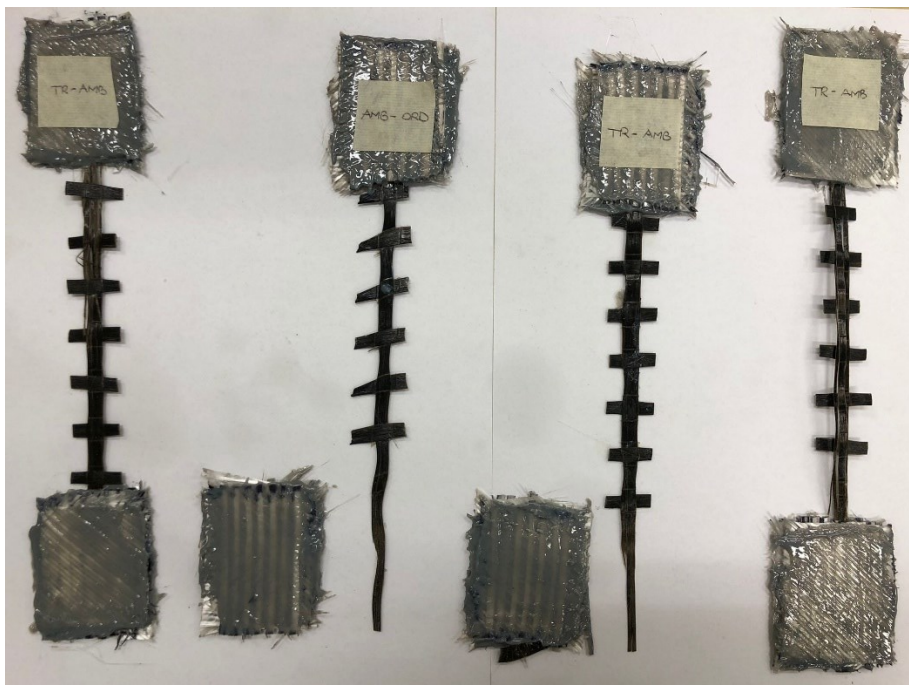


Figura 69 - Provini a temperatura ambiente dopo la prova di trazione



Figura 70 - Provini a 400°C dopo la prova di trazione



Figura 71 - Provini a 600°C dopo la prova di trazione

3.3.3 Commento dei risultati ottenuti

Dai grafici soprastanti possiamo osservare che la rottura del provino è sempre una rottura di tipo fragile, come potevamo aspettarci in quanto le fibre sottoposte a trazione sono fibre in basalto.

Per quanto riguarda i risultati ottenuti possiamo dire che nel passaggio dalla temperatura ambiente ai 200°C i valori di resistenza risultano essere pressoché identici, questo ci permette di dire che anche a 200°C le fibre possiedono ancora delle ottime proprietà meccaniche.

A 400°C, invece, si registra una forte riduzione della resistenza a trazione; infatti, passiamo da un valore della tensione media pari a 1305,55 MPa (a 200°C) ad un valore di 278,14 MPa (a 400°C) che in percentuale corrisponde al 21.3%. Tale risultato sta a descriverci un forte decadimento delle fibre ed un elevato degrado del coating esterno, cosa che avevamo già visto in precedenza dall'analisi visiva effettuata sia al microscopio che al SEM.

Infine, a 600°C si registrano valori molto bassi della tensione, abbiamo fatti un valore medio pari a 44,24 MPa, che significa la perdita completa di resistenza da parte dei nostri provini.

In conclusione, quello che possiamo affermare è che sicuramente, fino a 200°C le fibre in basalto presentano ancora degli ottimi valori di resistenza a trazione che vanno poi, con l'aumentare della temperatura, ad abbassarsi fino ad ottenere dei valori molto bassi quando superiamo i 400°C.

3.3.4 Confronto dei risultati con i precedenti studi

Il confronto dei risultati ottenuti dal nostro studio, in cui abbiamo valutato principalmente le proprietà meccaniche delle sole fibre di rinforzo, rispetto allo studio fatto precedentemente dai miei colleghi, nel quale si è studiato, invece, il sistema composito nel suo complesso, può essere fatto andando a caratterizzare quello che viene chiamato "Exploitation Rate".

Questo parametro ci permette di andare a valutare quanto le fibre, nella condizione in cui il nostro materiale è sottoposto a trazione, abbiano lavorato in percentuale nel sistema composito.

Per far questo dobbiamo andare a confrontare i risultati della tensione media che abbiamo ottenuto dalle prove fatte alle singole fibre e quelle fatte al materiale composito nello stesso range termico.

Di seguito viene riportata una tabella (Tab. 15) nel quale abbiamo le seguenti voci:

- Tipologia: viene specificata la matrice presa in esame
- Temperatura: viene specificata la temperatura presa in esame
- $\bar{\sigma}_m$: viene specificata la tensione media registrata dalle prove a trazione effettuate nel materiale composito e nelle sole fibre

- Exploitation Rate: viene riportato il valore in percentuale del parametro ottenuto andando a fare la differenza tra il valore della tensione media delle sole fibre e quello del materiale composito.

| Tipologia | Temperatura | σ_m | Exploitation rate |
|-----------|-------------|------------|-------------------|
| CEM | Ambiente | 604,00 | 55% |
| | 200°C | 545,00 | 58% |
| | 400°C | 406,00 | -46% |
| | 600°C | 130,00 | -194% |
| CAL | Ambiente | 412,00 | 69% |
| | 200°C | 399,00 | 65% |
| | 400°C | 468,00 | -68% |
| | 600°C | 86,00 | -94% |
| FAK | Ambiente | 390,00 | 71% |
| | 200°C | 318,00 | 76% |
| | 400°C | 288,00 | -3% |
| | 600°C | 92,00 | -108% |
| MKK | Ambiente | 202,00 | 85% |
| | 200°C | 520,00 | 61% |
| | 400°C | 209,00 | 84% |
| | 600°C | 112,00 | -153% |

Tabella 15 - Exploitation rate dei provini alle diverse temperature

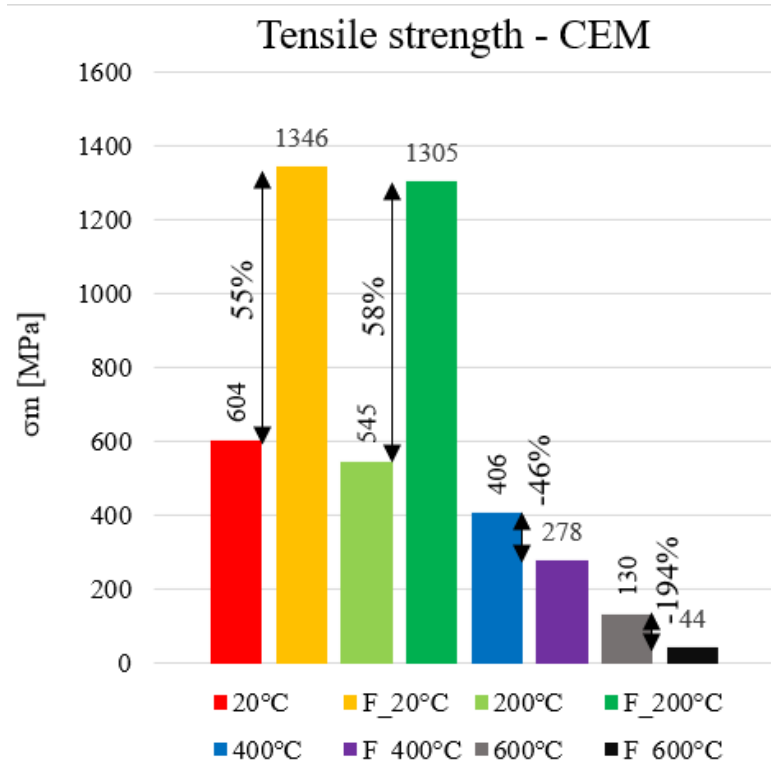


Figura 72 - Istogramma con confronto dei risultati delle prove a trazione dei sistemi FRCM con matrice di tipo CEM e delle solo fibre

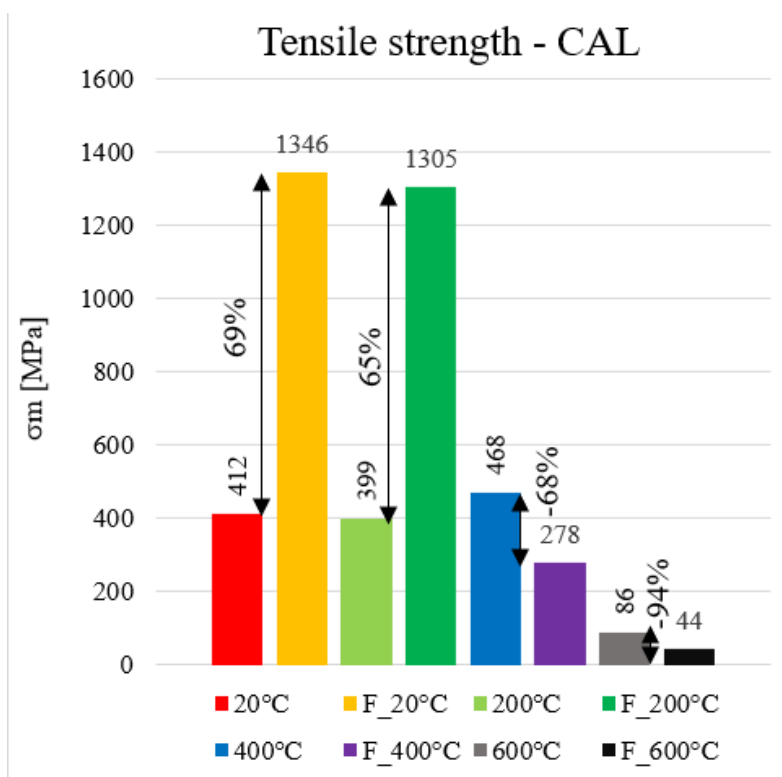


Figura 73 - Istogramma con confronto dei risultati delle prove a trazione dei sistemi FRCM con matrice di tipo CAL e delle solo fibre

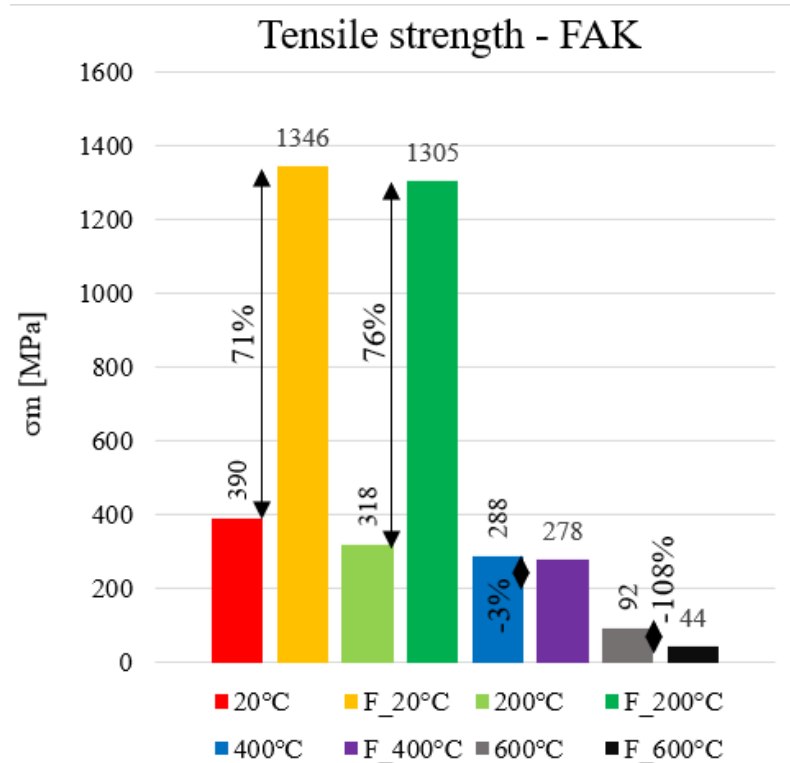


Figura 74 - Istogramma con confronto dei risultati delle prove a trazione dei sistemi FRCM con matrice di tipo FAK e delle solo fibre

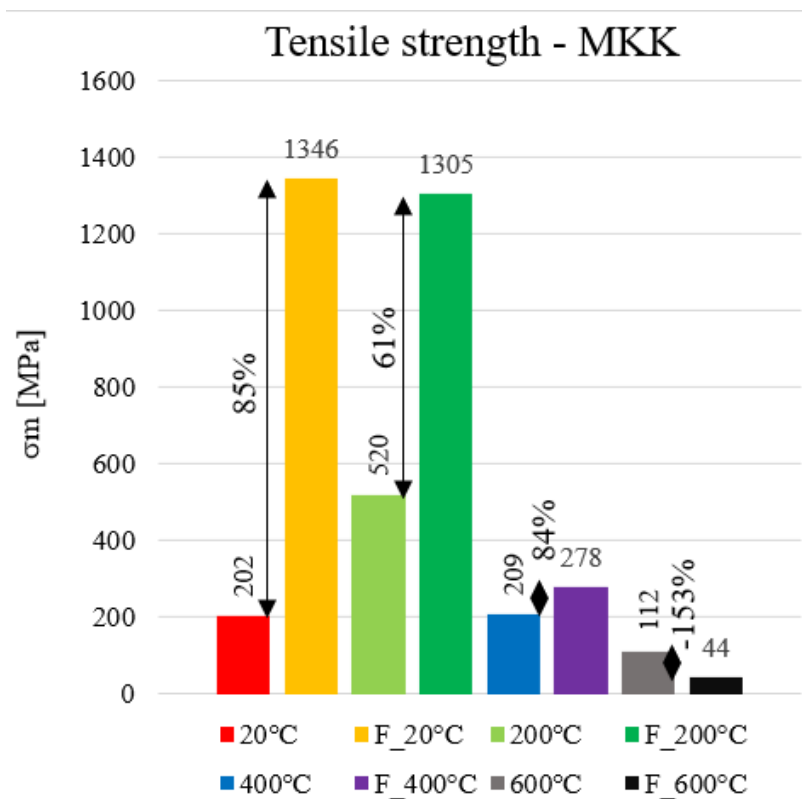


Figura 75 - Istogramma con confronto dei risultati delle prove a trazione dei sistemi FRCM con matrice di tipo MKK e delle solo fibre

Osserviamo che in tutte quattro le matrici fino alla temperatura di 200°C abbiamo un valore dell'Exploitation Rate positivo, cosa che invece non accade dai 400°C in poi (nel MKK solo la condizione a 600°C risulta avere un valore in percentuale negativo).

Tale risultato è condizionato probabilmente da due fattori: il primo è che rispetto ai dati rilevati nelle prime due condizioni termiche, quelli a 400°C e a 600°C assumono dei valori decisamente più bassi (in particolare quelli a 600°C), il secondo è che probabilmente durante la messa in forno le matrici abbiano protetto in parte le fibre dal calore, portando così le fibre dei sistemi FRCM ad avere una resistenza superiore rispetto alle sole fibre che invece sono state sottoposte alla stessa temperatura ma senza nessuno strato che le avvolgessero.

Sia i provini del tipo FRCM che le sole fibre presentano valori accettabili della resistenza fino ai 200°C, oltre questa temperatura presentano entrambi un decadimento abbastanza importante delle loro proprietà meccaniche; tale risultato è stato ottenuto anche dall'analisi visiva effettuata tramite microscopio e SEM, nei quali notavamo, dopo i 200°C, un degrado più o meno importante del coating esterno delle fibre a 400°C per poi averne la perdita definitiva a 600°C dove notavamo un assente addensamento delle fibre.

Un'altra osservazione che possiamo fare è che tra le quattro matrici il MKK, nell'intervallo che va tra i 20°C e i 200°C, presenta un valore dell'Exploitation rate prima del 85%, poi del 61%; questi ci va a dire che, se a temperatura ambiente le fibre hanno lavorato al 15%, a 200°C hanno invece lavorato al 39% (specifichiamo però che questo miglioramento delle prestazioni è dovuto anche dal fatto che a 200°C nel MKK migliorano le prestazioni meccaniche della malta).

4. CONCLUSIONI

4.1 Considerazioni finali

La tesi ha riguardato lo studio del comportamento meccanico delle fibre di rinforzo in basalto utilizzate nei sistemi FRCM con matrici geopolimeriche a base di cenere volante (FAK) e metacaolino (MKK) e di malte commerciali a base di geocalce (CAL) e geolite (CEM), sistemi che sono state studiati e caratterizzati in precedenza dai miei colleghi. Si è proceduto prima con un'analisi

visiva (tramite microscopio e SEM), in seguito con una prova a trazione ed i dati ottenuti sono stati confrontati con il precedente studio.

Sia dall'analisi visiva, mediante uso del microscopio e del SEM, che dalle prove a trazione abbiamo visto che le fibre, superati i 200°C, presentano un forte decadimento delle proprie prestazioni fino ad arrivare ai 600°C, dove i valori di tensione registrati sono fortemente bassi.

Dall'analisi visiva abbiamo osservato anche che oltre all'interfaccia tra matrice e fibra, a peggiorare con l'avanzamento della temperatura, è anche il coating esterno delle fibre, il quale comporta un maggior addensamento delle fibre stesse fino ai 200°C, un discreto addensamento a 400°C per poi avere assenza di coating a 600°C. Nelle matrici, con l'avanzare della temperatura, abbiamo un aumento delle loro porosità e nascita di piccole fessure dovute probabilmente allo stress termico alle quali sono state sottoposte.

Tale degrado crescente con la temperatura è stato identificato anche dalla prova a trazione, i cui dati hanno confermato quanto detto dalle osservazioni sperimentali, ovvero che fino a 200°C abbiamo dei buoni valori di resistenza a trazione, a 400°C tali valori decadono fortemente fino a diventare quasi nulli a 600°C.

Dal confronto dei valori della resistenza registrata delle sole fibre e dei sistemi FRCM abbiamo visto che il valore dell'Exploitation rate risulta essere positivo fino ai 200°C per tutti i provini escludendo il MKK, dove il valore risulta essere positivo anche nella condizione a 400°C (quest'ultimo presenta anche un miglioramento delle prestazioni nel passaggio dalla temperatura ambiente ai 200°C).

Concludendo, dalla prova sperimentali si è osservato che le matrici geopolimeriche risultano in generale più resistenti alle alte temperature rispetto alle matrici a base calce e cemento (l'esposizione ad una temperatura di 200 °C ha portato addirittura ad un incremento della resistenza meccanica nelle matrici geopolimeriche), che le fibre, con l'aumentare della temperatura, perdono le loro proprietà meccaniche (con un forte salto tra i 200°C e i 400°C) a causa del degrado del coating esterno e del degrado stesso delle fibre e che tra le quattro matrici, andando a valutare le prestazioni delle fibre

insieme alle varie matrici, il MKK ha un comportamento diverso dalle altre tre, presentando un aumento delle prestazioni a 200°C.

INDICE DELLE FIGURE

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito..... | 3 |
| Figura 2 - Schematizzazione materiali compositi in base alla tipologia di matrice..... | 4 |
| Figura 3 - Schematizzazione dei materiali compositi in funzione della tipologia di rinforzo | 5 |
| Figura 4 - Tipologie di fibre. Immagine tratta da CNR-DT 200/2004, P.11 | 8 |
| Figura 5 - Tessuto in fibra di vetro in cui sono visibili le due direzioni. | 9 |
| Figura 6 - Comportamento trilineare della prova di trazione UniBo | 10 |
| Figura 7 - Classificazione di “materiali attivati con alcali” | 11 |
| Figura 8 - Materie prime nella produzione del materiale geopolimerico. | 12 |
| Figura 9 - Schema di processo per ottenere materiale geopolimerico. | 12 |
| Figura 10 - Geolite 40 a sinistra, Geocalce Multiuso a destra, Kerakoll. | 14 |
| Figura 11 - Polvere di metacaolino usata nella sperimentazione..... | 15 |
| Figura 12 - Polvere di cenere volante silico-alluminosa..... | 16 |
| Figura 13 - Polvere di cemento alluminoso usato per ridurre i fenomeni di efflorescenza. | 17 |
| Figura 14 - Sabbia usata nella sperimentazione..... | 20 |
| Figura 15 - Rinforzo in basalto usato nella sperimentazione..... | 23 |
| Figura 16 - Forno a muffola posizionate all'interno del forno | 23 |
| Figura 17 - Fibre | |
| Figura 18 - Provini per osservazioni al SEM e al microscopio | 25 |
| Figura 19 - Provini per la prova a trazione a temperatura ambiente..... | 26 |
| Figura 20 - Provini per la prova a trazione a 200°C | 26 |
| Figura 21 - Provini per la prova a trazione a 400°C | 27 |
| Figura 22 - Provini per la prova a trazione a 600°C | 27 |
| Figura 23 - 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. | 29 |

| | |
|--|----|
| Figura 24 - Istogramma con valori di resistenza a flessione massima media per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura | 30 |
| Figura 25 - Istogramma con valori di resistenza a compressione massima media per tutte le tipologie di materiale e tutti i valori di temperatura | 31 |
| Figura 26 - Diagrammi Tensione–Deformazione da prova di trazione svolta su provini 19 x 4 x 1 cm ³ che non hanno ricevuto il trattamento termico..... | 32 |
| Figura 27 - 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. | 33 |
| Figura 28 - 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. | 34 |
| Figura 29 - 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. | 35 |
| Figura 30 - 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..... | 35 |
| Figura 31 - Mappa bidimensionale CEMamb a 100X | 38 |
| Figura 32 - Mappa bidimensionale CEM200 a 1000X | 38 |
| Figura 33 - Mappa bidimensionale CEM400 a 290X | 39 |
| Figura 34 - Mappa bidimensionale CEM600 a 221X | 39 |
| Figura 35 - Mappa bidimensionale CALamb a 900X..... | 40 |
| Figura 36 - Mappa bidimensionale CAL200 a 500X..... | 40 |
| Figura 37 - Mappa bidimensionale CAL400 a 300X..... | 41 |
| Figura 38 - Mappa bidimensionale CAL600 a 100X..... | 41 |
| Figura 39 - Mappa bidimensionale FAKamb a 96X..... | 42 |
| Figura 40 - Mappa bidimensionale FAK200 a 300X..... | 42 |
| Figura 41 - Mappa bidimensionale FAK400 a 184X..... | 43 |
| Figura 42 - Mappa bidimensionale FAK600 a 100X..... | 43 |
| Figura 43 - Mappa bidimensionale MKKamb a 100X | 44 |
| Figura 44 - Mappa bidimensionale MKK200 a 300X | 44 |

| | |
|---|----|
| Figura 45 - Mappa bidimensionale MKK400 a 74X | 45 |
| Figura 46 - Mappa bidimensionale MKK600 a 754X | 45 |
| Figura 47 - Immagine a 8X del provino CEMamb | 46 |
| Figura 48 - Immagine a 8X del provino CEM 200°C..... | 47 |
| Figura 49 - Immagine a 8X del provino CEM 400°C..... | 47 |
| Figura 50 - Immagine a 8X del provino CEM 600°C- fibra..... | 48 |
| Figura 51 - Immagine a 8X del provino FAKamb..... | 48 |
| Figura 52 - Immagine a 8X del provino FAK-200°C | 49 |
| Figura 53 - Immagine a 8X del provino FAK-400°C | 49 |
| Figura 54 - Immagine a 8X del provino FAK-600°C | 50 |
| Figura 55 - Immagine a 8X del provino LIMEamb | 50 |
| Figura 56 - Immagine a 8X del provino LIME-200°C | 51 |
| Figura 57 - Immagine a 8X del provino LIME-400°C | 51 |
| Figura 58 - Immagine a 8X del provino LIME-600°C | 52 |
| Figura 59 - Immagine a 8X del provino MKKamb | 52 |
| Figura 60 - Immagine a 8X del provino MKK-200°C..... | 53 |
| Figura 61 - Immagine a 8X del provino MKK-400°C..... | 53 |
| Figura 62 - Immagine a 8X del provino MKK-600°C..... | 54 |
| Figura 63 - Setup prova a trazione | 59 |
| Figura 64 - Diagrammi Tensione–Deformazione da prova di trazione svolta sulle fibre in basalto che non hanno ricevuto il trattamento termico. | 61 |
| Figura 65 - Diagrammi Tensione–Deformazione da prova di trazione svolta sulle fibre in basalto che hanno ricevuto il trattamento termico a 200°C. | 61 |
| Figura 66 - Diagrammi Tensione–Deformazione da prova di trazione svolta sulle fibre in basalto che hanno ricevuto il trattamento termico a 400°C. | 62 |
| Figura 67 - Diagrammi Tensione–Deformazione da prova di trazione svolta sulle fibre in basalto che hanno ricevuto il trattamento termico a 600°C. | 62 |
| Figura 68 - Istogramma riassuntivo dei dati ottenuti dalle prove a trazione (Tensile-strenght) sulle fibre dopo l’esposizione alle diverse temperature..... | 63 |

| | |
|---|----|
| Figura 69 - Provini a temperatura ambiente dopo la prova di trazione..... | 63 |
| Figura 70 - Provini a 400°C dopo la prova di trazione | 64 |
| Figura 71 - Provini a 600°C dopo la prova di trazione | 64 |
| Figura 72 - Istogramma con confronto dei risultati delle prove a trazione dei sistemi FRCC con matrice di tipo CEM e delle solo fibre..... | 67 |
| Figura 73 - Istogramma con confronto dei risultati delle prove a trazione dei sistemi FRCC con matrice di tipo CAL e delle solo fibre..... | 67 |
| Figura 74 - Istogramma con confronto dei risultati delle prove a trazione dei sistemi FRCC con matrice di tipo FAK e delle solo fibre..... | 68 |
| Figura 75 - Istogramma con confronto dei risultati delle prove a trazione dei sistemi FRCC con matrice di tipo MKK e delle solo fibre | 68 |

INDICE DELLE TABELLE

| | |
|--|----|
| Tabella 1 - Costituenti metacaolino MetaStar 501..... | 16 |
| Tabella 2 - Costituenti cenere volante silicea | 17 |
| Tabella 3 - Componenti cemento alluminoso (Ciment Fondu Imerys). | 18 |
| Tabella 4 - Proprietà chimico-fisiche del silicato di sodio..... | 19 |
| Tabella 5 - Proprietà chimico-fisiche dell'idrossido di potassio..... | 19 |
| Tabella 6 - Mix di sostanze utilizzate per la formazione di malte geopolimeriche | 21 |
| Tabella 7 - Proprietà delle fibre in basalto e fibre di vetro | 22 |
| Tabella 8 - Caratteristiche tecniche del sistema di rinforzo in basalto. | 22 |
| Tabella 9 - Tabella riassuntiva delle prove effettuate nel precedente studio e nello studio in questione. | 28 |
| Tabella 10 - Tabella descrittiva della matrice e delle fibre del provino CEM a tutte le temperature | 55 |
| Tabella 11 - Tabella descrittiva della matrice e delle fibre del provino FAK a tutte le temperature. | 56 |
| Tabella 12 - Tabella descrittiva della matrice e delle fibre del provino CAL a tutte le temperature. | 57 |
| Tabella 13 - Tabella descrittiva della matrice e delle fibre del provino MKK a tutte le temperature | 58 |

| | |
|---|----|
| Tabella 14 - Tabella riassuntiva dei dati ottenuti dalle prove a trazione delle fibre in basalto sottoposte a diverse temperature | 60 |
| Tabella 15 - Exploitation rate dei provini alle diverse temperature..... | 66 |

BIBLIOGRAFIA

- ¹ Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibro-rinforzati. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Roma, CNR 13 luglio 2004, p. 8-11
- ² Strengthening of concrete structures with cement based bonded composites. Blanksvärd T, Täljsten B. 2008, Journal of Nordic Concrete Research, 38(2): 133- 153.
- ³ Material and bonding characteristics for dimensioning and modeling of textile reinforced concrete (TRC) elements. Banholzer B, Brockmann T, Brameshuber W. 2006, Materials and Structures, 39: 749–763.
- ⁴ Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear. Brückner A, Ortlepp R, Curbach M. 2006, Materials and Structures, 39: 741-748.
- ⁵ Influence of bond properties on the tensile behaviour of Textile Reinforced Concrete. Hartig J, Häuler-Combe U, 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 recuperodelle strutture in c.a. CLEAN edizioni, 2009.
- ¹² Classificazione tratta da CNR-DT 200/2004, p.12.
- ¹³ RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages. www.rilem.net
- ¹⁴ M. Gordon, J. Bell, W.M. Kriven. "Geopolymers: Alkali Bonded Ceramics (ABCs) for high-tech applications". Ceram. Trans. (2006). Vol. 175: pp.215-24.
- ¹⁵ J.S.J. van Deventer, J.L. Provis, P. Duxson, D.G. Brice. "Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials". Waste Biomass Valor. (2010). Vol. 1: pp. 145-55.
- ¹⁶ Luciano Ombres, Antonio Iorfida, Stefania Mazzuca, Salvatore Verre -Bond analysis of thermally conditioned FRCM-masonry joints.
- ¹⁷ E. Papa, "Produzione e caratterizzazione di schiume inorganiche a base geopolimerica", Tesi di laurea magistrale, Dipartimento di Chimica Industriale e dei Materiali, Università degli Studi di Bologna, 2010-2011.
- ¹⁸ Linea Guida per la identificazione, la qualificazione ed il controllo di accettazione di compositi fibrorinforzati a matrice inorganica (FRCM) da utilizzarsi per il consolidamento strutturale di costruzioni esistenti, Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, Servizio Tecnico Centrale, Luglio 2018.
- ¹⁹ Norme tecniche per le costruzioni approvate con Decreto Ministeriale del 17 Gennaio 2018 (nel seguito NTC 2018), Capitolo 8.6.
- ²⁰NTC 2018, Capitolo 12.

²¹ Landucci, Rossi, Nicoletta, Zanelli,” Materiali compositi in fibra di basalto per la protezione passiva di apparecchiature soggette a getti incendiati”, Dipartimento di ingegneria chimica, chimica industriale e scienza dei materiali, Università di Pisa.

²² Hamidreza Asghari, Zkaria Omeman, Martin Noel, Hamzeh Hajiloo, “Tensile properties of carbon fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) at high temperatures”, Department of Civil Engineering, University of Ottawa, Canada - Department of Civil and Environmental Engineering, Carleton University, Ottawa, Canada