



Università Politecnica delle Marche

Facoltà di Ingegneria

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Edile

SIMAU – Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia,
dell’Ambiente ed Urbanistica

**SISTEMI FRM CON MATRICI GEOPOLIMERICHE PER IL RINFORZO
DELLE STRUTTURE ESISTENTI IN MURATURA E CALCESTRUZZO**

**FRM systems with geopolymeric matrices for the strengthening of
existing masonry and concrete structures**

Relatore:

Ing. Jacopo Donnini

Correlatore:

Ing. Alessandra Mobili

Correlatore:

Prof.ssa Francesca Tittarelli

Tesi di Laurea di:

Gianlorenzo Di Fabio

Anno accademico 2020/2021

INDICE

INTRODUZIONE	pag. 1
1. STATO DELL'ARTE	" 3
1.1. Geopolimeri	" 3
1.1.1. Generalità	" 3
1.1.2. Cenni storici	" 4
1.1.3. Processo di geopolimerizzazione	" 6
1.2. FRCM	" 7
1.2.1. Materiali compositi	" 7
1.2.2. Classificazione dei materiali compositi	" 8
1.2.3. Sistemi di rinforzo a matrice inorganica	" 9
1.3. Applicazioni	" 12
1.3.1. Geopolimeri	" 12
2.1.1.1. Edilizia	" 12
1.3.2. Sistemi FRCM	" 15
2.1.1.1. Applicazioni su strutture di muratura	" 15
2.1.1.1. Applicazioni su strutture in calcestruzzo armato	" 18
1.4. FRGM	" 20
1.4.1. Proprietà dei materiali	" 20
1.4.2. Comportamento statico e termico	" 22
2. MATERIALI E PREPARAZIONE	" 25
2.1. Materie prime	" 25
2.1.1. Geopolimeri	" 25
2.1.1.1. Polveri allumino-silicatiche	" 25
2.1.1.2. Soluzione alcalina	" 26
2.1.2. Materiali compositi	" 27
2.1.2.1. Le matrici	" 27

2.1.2.2. I rinforzi	pag. 28
2.2. Mix design	" 31
2.2.1. Inerte	" 32
2.2.2. Acqua	" 33
2.2.3. Leganti geopolimerici (polveri allumino-silicatiche)	" 33
2.2.3.1. Metacaolino	" 33
2.2.3.2. Cenere volante	" 37
2.2.3.3. Cemento alluminoso	" 39
2.2.4. Soluzione alcalina	" 41
2.2.4.1. Silicato di sodio	" 42
2.2.4.2. Idrossido di potassio	" 42
2.3. Preparazione	" 44
2.3.1. Supporti	" 44
2.3.2. Sabbia	" 45
2.3.3. Casseri	" 47
2.3.4. Reti di rinforzo	" 48
2.3.5. Miscele	" 49
2.3.6. Getti	" 51
3. METODI DI PROVA	" 55
3.1. Introduzione	" 55
3.2. Prove di flessione/compressione	" 55
3.3. Prove di pull-off (distacco dal supporto)	" 57
3.4. Prove di trazione (tensile test)	" 60
4. RISULTATI E CONCLUSIONI	" 62
4.1. Elaborazione dei risultati	" 62
4.1.1 Prove di flessione/compressione	" 62
4.1.1.1. Risultati sperimentali	" 62
4.1.1.2. Altre prove	" 68

4.1.2. Prove di pull-off (distacco dal supporto)	pag. 71
4.1.2.1. Risultati sperimentali	" 71
4.1.2.2. Altre prove	" 72
4.1.3. Prove di trazione (tensile test)	" 73
4.1.3.1. Risultati sperimentali	" 73
4.2. Conclusioni	" 79

BIBLIOGRAFIA

INDICE DELLE FIGURE

Fig. 1 - Classificazione di “materiali attivati con alcali” secondo J.S.J. Van Deventer e J.L. Provis	pag. 3
Fig. 2 - Numero di pubblicazioni per anno contenente la keyword	" 5
Fig. 3 - Paesi coinvolti in ricerche sui geopolimeri dal 1999 al 2010	" 5
Fig. 4 - Materie prime nella produzione del materiale geopolimerico	" 6
Fig. 5 - Schema di processo per ottenere materiale geopolimerico	" 6
Fig. 6 - Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito	" 7
Fig. 7 - Schematizzazione dei materiali compositi	" 8
Fig. 8 - Lavori di riparazione di una strada con cemento Pyrament®	" 12
Fig. 9 - Comportamento a compressione per un calcestruzzo geopolimerico (curva tratteggiata) e per un calcestruzzo tradizionale (curva continua)	" 13
Fig. 10 - Global Change Institute, Bridbane, Australia	" 14
Fig. 11 - Travi prefabbricate impiegate nella realizzazione del GCI	" 14
Fig. 12 - Rinforzo di pannelli murari con rete di basalto (a sinistra); Applicazione di fasce di tessuto metallico unidirezionale e malta per il rinforzo estradossale di volte murarie (a destra)	" 16
Fig. 13 - Cordolo sommitale realizzato con tessuti a base di reti di acciaio (a sinistra); Confinamento di pilastro in muratura con rete di vetro A.R. (a destra)	" 16
Fig. 14 - Prove di spinta sui due edifici oggetto di studio	" 18
Fig. 15 - Rinforzo a flessione di trave mediante placcaggio con strisce di tessuto unidirezionale realizzate con rete di acciaio e malta cementizia (a sinistra); Confinamento di pilastro con tessuto metallico unidirezionale e malta (a destra)	" 19
Fig. 16 - Rinforzo di nodi travi-pilastro con tessuto metallico unidirezionale e malta (a sinistra); Rinforzo antiribaltamento di pareti con rete di fibra di vetro, malta e fiocchi di fibra di vetro (a destra)	" 19
Fig. 17 - Malta GPM e struttura dell'aggregato di vetro espanso	" 20
Fig. 18 - Confronto tra i legami costitutivi a trazione dei diversi sistemi	" 21
Fig. 19 - Resistenza a taglio	" 23
Fig. 20 - Curve tensione (τ) - deformazione (γ) dei pannelli FRCM e FRGM	" 23
Fig. 21 - Set-up di prova energetica	" 24
Fig. 22 - Risultati dei test energetici	" 24

Fig. 23 - Schema del processo di produzione di soluzioni di silicati alcalini	pag. 27
Fig. 24 - Tipologie di matrici impiegate nei materiali compositi fibrorinforzati	" 28
Fig. 25 - Tipologie di fibre	" 29
Fig. 26 - Tessuto in fibra di vetro in cui sono distinguibili ordito e trama	" 29
Fig. 27 - Tipologie di fibre impiegate nella realizzazione dei materiali compositi	" 30
Fig. 28 - Confronto tra le proprietà delle fibre di rinforzo	" 30
Fig. 29 - Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: comportamento a trazione monoassiale	" 30
Fig. 30 - Sabbia fine	" 32
Fig. 31 - Struttura schematica della caolinite	" 34
Fig. 32 - Metacaolino, ingrandimento al microscopio	" 34
Fig. 33 - Schema di deidrossilazione	" 35
Fig. 34 - Polvere di metacaolino	" 36
Fig. 35 - Particelle di cenere volante	" 37
Fig. 36 - Cenere volante di classe F	" 39
Fig. 37 - Cemento alluminoso	" 40
Fig. 38 - Casseri in legno 10x10x50 cm	" 44
Fig. 39 - Supporto in calcestruzzo	" 44
Fig. 40 - Supporto in muratura	" 45
Fig. 41 - Scheda tecnica sabbia Esincalce 0/3	" 45
Fig. 42 - Fasi della verifica dell'assorbimento dell'acqua	" 46
Fig. 43 - Modi di collasso del tronco di cono	" 46
Fig. 44 - Condizione di s.s.a. dell'inerte utilizzato	" 47
Fig. 45 - Casseri in legno di dimensioni 38x6x1 cm	" 47
Fig. 46 - Casseri in legno di dimensioni 16x4x4 cm	" 48
Fig. 47 - Reti di rinforzo in fibra di vetro (rossa) e in fibra di basalto (nera)	" 48
Fig. 48 - Scheda tecnica della rete in fibra di vetro	" 49
Fig. 49 - Scheda tecnica della rete in fibra di basalto	" 49
Fig. 50 - Contenitori di idrossido di potassio e silicato di sodio	" 51
Fig. 51 - Miscele finali (R1 FAK, R3 FAK, R1 MKK, R3 MKK)	" 51

Fig. 52 - Esempio di preparazione del mix	pag. 52
Fig. 53 - Provini gettati sui casseri in ferro	" 53
Fig. 54 - Provini 16x4x4 cm scasserati	" 53
Fig. 55 - Provini gettati sui supporti	" 53
Fig. 56 - Fasi di getto dei provini sui casseri in legno	" 54
Fig. 57 - Provini 38x6x1 cm scasserati	" 54
Fig. 58 - Prova di resistenza a flessione	" 56
Fig. 59 - Prova di resistenza a compressione	" 56
Fig. 60 - Resina componente A	" 57
Fig. 61 - Resina componente B	" 57
Fig. 62 - Dolly incollati ai vari supporti	" 58
Fig. 63 - Prova di pull-off	" 58
Fig. 64 - Due tipologie di distacco: in ordine distacco tipo A e C	" 59
Fig. 65 - Tensile test set-up	" 60
Fig. 66 - Provini fessurati a trazione	" 61
Fig. 67 - Incollaggio delle fasce in fibra di vetro	" 61
Fig. 68 - Diagramma sforzo - spostamento a flessione	" 63
Fig. 69 - Diagramma sforzo - spostamento a compressione	" 64
Fig. 70 - Diagramma sforzo - spostamento a flessione	" 65
Fig. 71 - Diagramma sforzo - spostamento a compressione	" 66
Fig. 72 - Istogramma di confronto tra i risultati delle prove a compressione e flessione	" 67
Fig. 73 - Diagramma sforzo - spostamento a flessione	" 68
Fig. 74 - Diagramma sforzo - spostamento a compressione	" 69
Fig. 75 - Diagramma sforzo - spostamento a flessione	" 70
Fig. 76 - Diagramma sforzo - spostamento a compressione	" 70
Fig. 77 - Istogramma di confronto tra i risultati della prova di pull-off	" 72
Fig. 78 - Diagramma tensione - spostamento a trazione	" 73
Fig. 79 - Diagramma tensione - spostamento a trazione	" 74
Fig. 80 - Diagramma tensione - spostamento a trazione	" 75
Fig. 81 - Diagramma tensione - spostamento a trazione	" 76
Fig. 82 - Istogramma di confronto tra i risultati delle prove di trazione	" 77

INDICE DELLE TABELLE

Tab. 1 - Caratterizzazione meccanica a trazione dei vari sistemi	pag. 19
Tab. 2 - Composizione media di una loppa espressa in percentuali in peso	" 24
Tab. 3 - Componenti utilizzate nel mix design	" 29
Tab. 4 - Costituenti principali del metacaolino	" 35
Tab. 5 - Costituenti principali della cenere volante	" 37
Tab. 6 - Costituenti principali del cemento alluminoso	" 39
Tab. 7 - Proprietà del silicato di sodio	" 40
Tab. 8 - Proprietà dell'idrossido di potassio	" 41
Tab. 9 - Tabella delle resistenze a flessione	" 61
Tab. 10 - Tabella delle resistenze a compressione	" 62
Tab. 11 - Tabella delle resistenze a flessione	" 63
Tab. 12 - Tabella delle resistenze a compressione	" 64
Tab. 13 - Tabella delle resistenze a flessione	" 66
Tab. 14 - Tabella delle resistenze a compressione	" 67
Tab. 15 - Tabella delle resistenze a flessione	" 68
Tab. 16 - Tabella delle resistenze a compressione	" 68
Tab. 17 - Tabella delle resistenze	" 69
Tab. 18 - Tabella delle resistenze	" 70
Tab. 19 - Tabella dei risultati	" 72
Tab. 20 - Tabella dei risultati	" 72
Tab. 21 - Tabella dei risultati	" 73
Tab. 22 - Tabella dei risultati	" 74

INTRODUZIONE

Il rinforzo di una struttura si rende necessario in occasione di alcune circostanze, quali:

- il danneggiamento dovuto a un carico eccezionale (sisma, incendio, impatto, ecc.);
- la necessità di aumento dei carichi permanenti o accidentali, per adeguamento normativo o cambio di destinazione d'uso della struttura;
- l'adeguamento o miglioramento sismico;
- il degrado dei materiali, in particolare corrosione delle armature metalliche nelle strutture di calcestruzzo armato;
- gli errori di progettazione o di esecuzione (tipicamente, errata disposizione delle armature o scarsa qualità del conglomerato in strutture di calcestruzzo armato);
- prolungare la vita utile.

Le tecniche tradizionali utilizzate a tal fine consistono nell'incamiciatura in calcestruzzo armato, nell'utilizzo di piastre o lamine in acciaio incollate sulle superfici esterne. Le tecniche più innovative prevedono, invece l'utilizzo di compositi fibrorinforzati. Esse offrono indubbi vantaggi legati all'efficacia degli interventi, alla rapidità di esecuzione, al peso e ingombro contenuti. Recentemente, ai sistemi di rinforzo in FRP (Fiber Reinforced Polymers), si sono affiancati sistemi basati sull'impiego di matrici di tipo inorganico, generalmente a base minerale, cementizia o di calce. Questi sistemi in letteratura sono identificati come FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix) o TRM (Textile Reinforced Mortar) e nel caso di impiego di tessuti in acciaio come SRG (Steel Reinforced Grout).

I motivi che hanno favorito il rapido diffondersi dei sistemi a matrice inorganica, rispetto agli FRP, sono: una maggiore resistenza alle alte temperature, possibilità di applicazione su superfici umide, la permeabilità al vapore, reversibilità e compatibilità con il supporto presentando modalità di rottura sicuramente più duttili. Essi inoltre consentono il rispetto dei criteri di conservazione richiesti nelle applicazioni per il patrimonio culturale. In questo contesto inoltre, la possibilità di utilizzare matrici alternative a quelle disponibili risulta di notevole interesse.

Il rinforzo è rappresentato da reti, generalmente di tipo bidirezionale, in fibra di vetro, carbonio, PBO e tessuti unidirezionali in acciaio. Negli ultimi anni l'utilizzo di reti in fibra di basalto per la realizzazione di questi compositi è risultato efficiente nell'ambito del rinforzo strutturale ed ecocompatibile. Tali fibre, infatti, sono ottenute per fusione e filatura continua di rocce basaltiche. Inoltre il loro processo di produzione richiede un dispendio energetico minore di quello necessario per la produzione della fibra di vetro e non necessita di additivi. Ciò rende la fibra di basalto meno costosa delle fibre di vetro o di carbonio. Le fibre in basalto offrono una maggiore stabilità chimica e termica alle alte temperature rispetto alle fibre di vetro, pur esibendo proprietà meccaniche analoghe. Interventi recenti con FRCM hanno interessato edifici danneggiati dal terremoto in Abruzzo ed Emilia.

A dispetto però della loro ampia diffusione, esistono tutt'oggi informazioni non esaustive sulle problematiche di interfaccia su substrato in muratura, loro caratterizzazione meccanica, durabilità e applicazioni per il confinamento di colonne murarie. Pertanto tali materiali compositi necessitano di accurate indagini scientifiche.

Il presente lavoro è stato finalizzato a fornire un ulteriore contributo per la caratterizzazione dei compositi FRCM con matrice geopolimerica (FRGM) e in particolare alla valutazione delle prestazioni che questi possono offrire quando realizzati con rinforzi fibrosi di origine naturale, quali la fibra di basalto e di vetro.

Nel primo capitolo viene riportata una descrizione generale dei materiali compositi a matrice inorganica (in particolare i geopolimeri) fornendo una panoramica sullo stato dell'arte relativo alle diverse modalità e approcci di caratterizzazione e alle varie applicazioni. Vengono infine analizzati

gli aspetti e le potenzialità offerte dall'impiego di matrici inorganiche innovative appartenenti alla famiglia dei materiali attivati alcalinamente.

Nel secondo capitolo viene fornita una descrizione e caratterizzazione dei materiali impiegati, le procedure di realizzazione dei campioni e i setup di prova per le diverse attività sperimentali.

Nel terzo capitolo vengono discusse le varie tecniche e i metodi di prova effettuati in laboratorio con lo scopo di determinare i parametri dei materiali utilizzati.

Nel quarto capitolo sono riportati e discussi i risultati delle campagne sperimentali.

STATO DELL'ARTE

1.1. GEOPOLIMERI

Definizione e classificazione dei geopolimeri sono argomenti ancor'oggi molto discussi e dibattuti, ma in linea di massima i geopolimeri possono essere definiti come leganti idraulici prodotti a partire da polveri inorganiche, principalmente allumino-silicatiche, disciolte in un ambiente fortemente basico [1]. Il prefisso geo- indica che si parla di un prodotto di geosintesi, cioè di un prodotto che mima materiali già presenti in natura; il suffisso -polimero si riferisce invece al processo di produzione (geopolimerizzazione), ovvero una polimerizzazione per policondensazione.

1.1.1. Generalità

Ragionando sul fatto 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") [2]; 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 Deventer e J.L. Provis e indicata in Fig. 1) prende in considerazione il contenuto di calcio e alluminio [3].

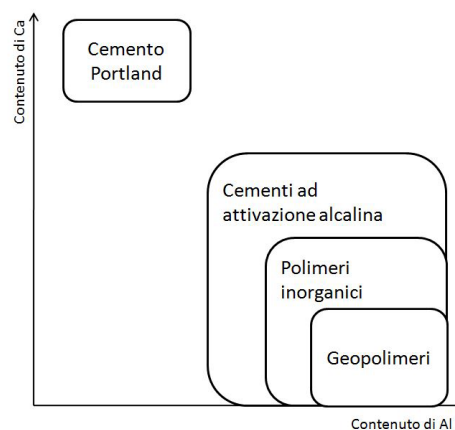


Fig. 1 - Classificazione di "materiali attivati con alcali" secondo J.S.J. Van Deventer e J.L. Provis

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 (maggior 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 o networks di molecole legate attraverso legami covalenti. Diversamente dai cementi a base di calcio (come il cemento Portland), i geopolimeri non contengono acqua di idratazione entro la struttura cristallina e sebbene siano ottenuti e lavorati a basse temperature, generalmente da 80 °C a 120 °C, con tecniche usate comunemente per la presa delle resine organiche, questi materiali, detti “resine inorganiche”, possono resistere fino a 1200 °C anche per lunghe esposizioni. Le resine inorganiche pertanto permettono la produzione di materiali simili alla ceramica e di compositi più resistenti alle alte temperature dei materiali a base cementizia, che non contengono acqua di costituzione, utilizzando un processo semplice e a bassa temperatura. Dal punto di vista della “chimica verde” 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, il cosiddetto gas serra). 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.

1.1.2. Cenni storici

Risale agli anni 50’, ad opera di Victor Glukhovsky, la sintesi dei cosiddetti “soil cements”: leganti allumino-silicatici derivanti da argille, ceneri vulcaniche, feldspati e scorie di diversi tipi che, attivati con soluzione alcalina, esibiscono proprietà del tutto superiori ai materiali cementizi allora in uso [4]. La ricerca partì dall’analisi delle differenze tra cementi antichi e calcestruzzi moderni e dall’obiettivo di trasporre nei sistemi cementizi il processo geologico di trasformazione di alcune rocce vulcaniche in zeoliti, giungendo così ad un modello di reattività composto da quattro fasi (distruzione, coagulazione, condensazione e cristallizzazione): modello non lontano da quello tuttora proposto per i materiali geopolimerici. La scoperta di questo ricercatore ucraino del Kiev Institute of Civil Engineering (KICE) diede forte ispirazione al chimico francese Joseph Davidovits, che nel 1978, all’età di 43 anni, arrivò a coniare il termine “geopolimeri” per indicare polimeri inorganici (principalmente a base di metacaolino) prodotti artificialmente a partire da alluminosilicati (contenenti gruppi SiO₄ e AlO₄), attraverso un processo definito geopolimerizzazione [5]. L’obiettivo principale della ricerca era trovare materiali non organici capaci di resistere al calore e agli attacchi di solventi organici ed acidi. Ma fu già nei primi anni 70’ che Davidovits e alcuni suoi collaboratori iniziarono a parlare di geopolimeri; risale al 1972 la fondazione di una compagnia di ricerca privata denominata Cordi SA (successivamente rinominata Cordi-Géopolymère). Nel 1979 nasce, sempre ad opera di Davidovits, un’organizzazione scientifica no-profit chiamata “Géopolymér institute” [6], che dal 2009 organizza annualmente, in una località a nord di Parigi, il “Geopolymer Camp”: si tratta di incontri, aperti a chiunque possa avere interesse all’argomento dei geopolimeri, per diffondere liberamente i progressi ottenuti e discutere in materia di eventuali nuovi campi applicativi. Facendo un passo indietro, già negli anni 30’ furono effettuati studi in questa direzione: nel 1930, H. Kunt lavorò sull’analisi del comportamento di scorie industriali in presenza di una soluzione di idrossido di potassio e nel 1937, un lavoro di ricerca di Chassevent, valutò la reattività di scorie simili con soluzioni di idrossido, potassio e sodio [7]. Agli anni 40’ risalgono invece ricerche su materiali da costruzione derivanti da attivazione alcalina di solidi in polvere diversi dal classico cemento Portland (clinker-free). Questi studi, compiuti dal belga Purdon, iniziarono anch’essi con l’impiego di scorie

industriali e di diverse tipologie di soluzioni alcaline [8,9]. Nato nel 1935, Joseph Davidovits è un chimico francese noto per la determinazione del concetto e della chimica dei geopolimeri; autore di un notevole numero di articoli e organizzatore di numerose conferenze, possiede la paternità di oltre 50 brevetti in tema. Tornando agli ultimi decenni di storia, negli anni 90' J. Wastiels scoprì che era possibile ottenere geopolimeri ad alte prestazioni attivando chimicamente carbone [10], aprendo in questo modo in ambito strutturale. Negli anni successivi, tra il 1998 e il 2002, presero il via, ad opera di Davidovits, le prime tre conferenze internazionali sul tema dei geopolimeri e nel 2005, come celebrazione dei 26 anni di attività del Geopolymer Institute, venne organizzato il "Geopolymer Word Congress". Da allora si susseguirono interessanti studi, i quali sono stati raccolti e riassunti in uno scritto di J.L. Provis e J.S.J. Van Deventer dal titolo "Geopoly properties, and industrial applications.". Il crescente interesse della comunità scientifica verso questa nuova classe di materiali è stata confermata negli anni dal sempre maggior numero di pubblicazioni contenente la keyword "geopolymer".

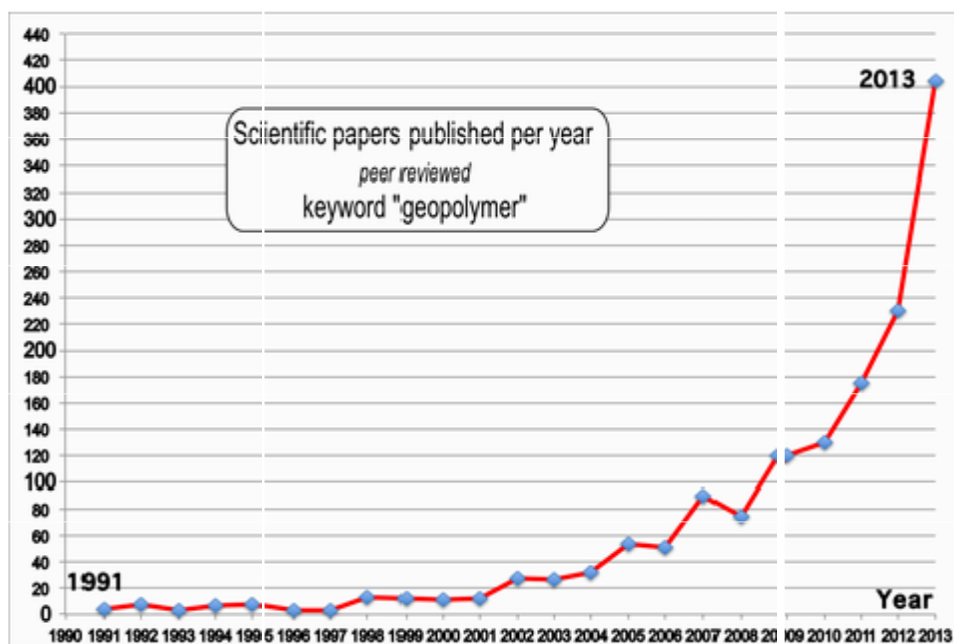


Fig. 2 - Numero di pubblicazioni per anno contenente la keyword

Anche il numero dei paesi coinvolti in ricerche sui geopolimeri (Fig. 3) risulta in crescita, a riprova del notevole interesse che il mondo accademico sta mostrando verso questa tipologia di materiali [6].

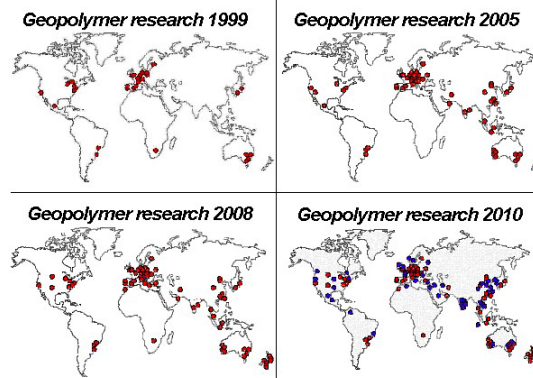


Fig. 3 - Paesi coinvolti in ricerche sui geopolimeri dal 1999 al 2010

1.1.3. Processo di geopolimerizzazione

Al fine di produrre un materiale geopolimerico devono essere selezionate due tipologie di materie prime come schematizzato in Fig. 4:

- la polvere allumino silicatica 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. 4 - 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 [11].

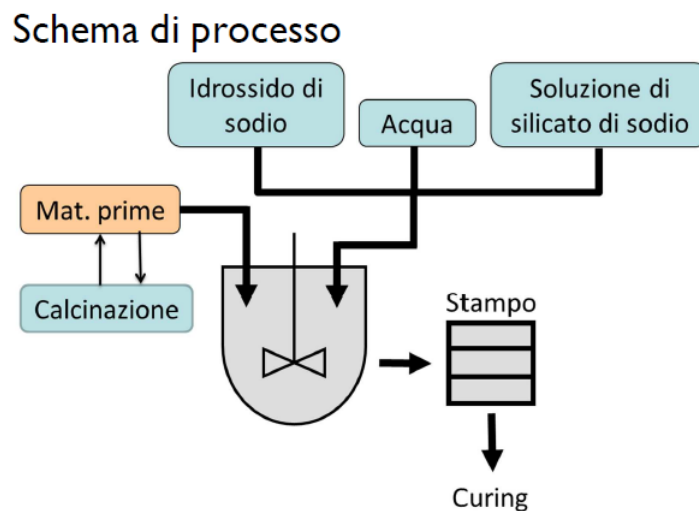


Fig. 5 - Schema di processo per ottenere materiale geopolimerico

1.2. FRCM

1.2.1. Materiali compositi

Si definisce materiale composito una miscela o combinazione di due o più materiali, definiti fasi, che differiscono nella forma, nella composizione chimica e nelle proprietà fisiche e che sono insolubili l'uno nell'altro. Il materiale ottenuto da tale combinazione è un sistema eterogeneo in cui i singoli costituenti sono fisicamente assemblati e risultano facilmente identificabili. I materiali compositi sono caratterizzati dalla presenza di una fase continua detta "matrice", materiale che agisce da legante e definisce il volume finale del composito, al cui interno è dispersa una fase discontinua chiamata "rinforzo", un materiale di natura fibrosa. Il materiale finale è caratterizzato da proprietà chimico-fisiche differenti rispetto a quelle dei singoli costituenti di base la cui sinergia determina le proprietà del composito stesso. La natura dei componenti che formano il composito contribuisce in maniera determinante alla definizione delle proprietà finali del materiale. Tuttavia, per ottenere un composito ad elevata resistenza meccanica, non è sufficiente utilizzare fibre "resistenti" è anche indispensabile garantire una buona adesione tra la matrice ed il rinforzo. Questo comporta la presenza di una terza fase, detta "interfaccia o interfase" (Fig. 6), le cui caratteristiche possono essere modificate mediante l'utilizzo di agenti chimici in grado di creare legami che migliorano l'adesione interfacciale tra le fasi, contribuendo ad un miglior trasferimento delle tensioni tra di esse. Le prestazioni finali possono essere incrementate mediante l'aggiunta di "filler", materiale in forma particellare che viene introdotto per migliorare alcune proprietà specifiche. A seconda della tipologia di filler impiegata è possibile modificare le proprietà di resistenza al fuoco, migliorare le proprietà di resistenza all'impatto e all'abrasione, ecc [12].

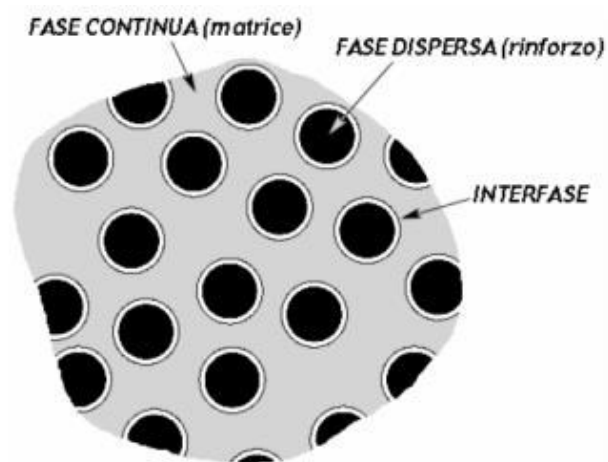


Fig. 6 - Rappresentazione schematica delle fasi costituenti un composito

1.2.2. Classificazione dei materiali compositi

In letteratura i materiali compositi fibrorinforzati vengono menzionati con diversi acronimi, una classificazione comunemente utilizzata è basata sulla tipologia di matrice che costituisce il materiale composito e dipende dalla geometria e dalla disposizione della fibra di rinforzo. In figura è riportata una schematizzazione di tale classificazione.

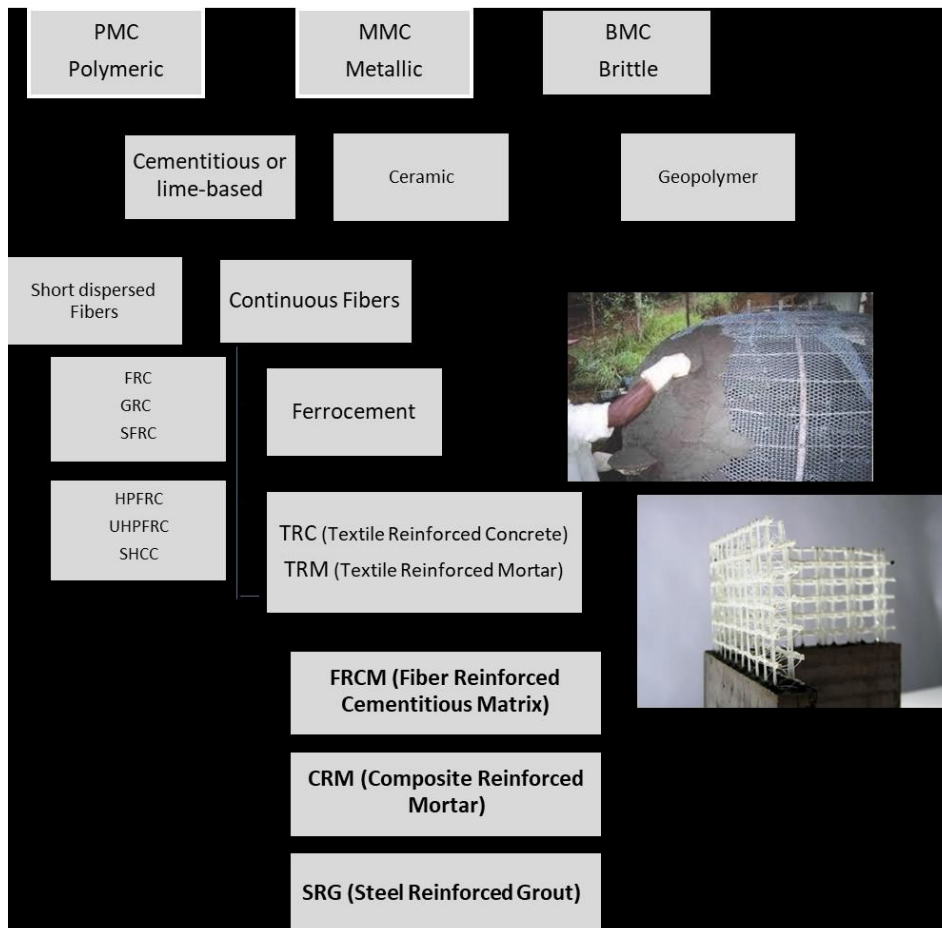


Fig. 7 - Schematizzazione dei materiali compositi

In base alla natura della matrice, i compositi fibrorinforzati si distinguono in:

- PMC (Polymer-Matrix Composite), o più comunemente FRP (Fiber Reinforced Polymer), nei quali la matrice è costituita da resine di varia natura, come ad esempio le resine termoplastiche (come nylon e ABS) o termoindurenti (come le resine epossidiche);
- MMC (Metallic-Matrix Composite), costituiti da una matrice metallica, comunemente di alluminio o titanio e suoi derivati;
- BMC (Brittle-Matrix Composite), costituiti da carburo di silicio o allumina, malte cementizie oppure materiali a base di calce o malte geopolimeriche.

All'interno della matrice il rinforzo si presenta come una fase dispersa e discontinua, responsabile delle caratteristiche di rigidità e resistenza meccanica del materiale composito. Tra i materiali compositi BMC, quelli a matrice inorganica possono essere a loro volta raggruppati in due categorie in funzione della tipologia di fibra impiegata come rinforzo:

- **Matrice inorganica rinforzata con fibre corte:**
Questa tipologia di composito è indicata con l'acronimo FRC ed include tutti i compositi nei quali la matrice è rinforzata con fibre corte disperse internamente.
- **Matrice inorganica rinforzata con fibre continue:**
Comprende tutti quei prodotti costituiti da una matrice inorganica rinforzata con fibre lunghe continue disposte in modo tale da formare un tessuto o una rete. Si possono distinguere le seguenti due grandi categorie:
 - Ferrocemento, ovvero elementi sottili in calcestruzzo costituiti comunemente da una malta cementizia idraulica rinforzata con una rete metallica continua a maglia stretta.
 - Textile Reinforced Concrete (TRC), rappresenta un'ampia categoria di compositi a matrice cementizia (costituita da malta o calcestruzzo) rinforzata con reti metalliche, tessuti secchi o tessuti impregnati a maglia larga in forma bi o tridimensionale. La fibra di rinforzo può essere costituita da materiale di diversa natura (polimerica, sintetica, metallica, organica, ecc.), mentre la composizione e la granulometria della matrice saranno funzione del sistema di rinforzo impiegato. Un altro termine comunemente usato per questo composito è Textile Reinforced Mortar (TRM) o Mineral Based Composite (MBC). In questa categoria rientrano i Fiber Reinforced Cementitious Matrix (FRCM) costituiti da uno strato di matrice inorganica, generalmente composta da una malta per muratura ed altri additivi, rinforzato con fibre secche sotto forma di tessuto a maglie larghe (rete di fibra).

1.2.3. Sistemi di rinforzo a matrice inorganica

Recentemente nell'ambito del rinforzo strutturale, ai sistemi di rinforzo FRP, si sono affiancati sistemi basati sull'impiego di matrici inorganiche, generalmente a base minerale, cementizia o di calce e fibre continue. Tali sistemi, in letteratura sono identificati come FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix). Tuttavia dalla combinazione dei tipi di leganti minerali 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 applicazione [13]. Si distinguono:

- *Textile Reinforced Concrete, TRC*: sviluppato nel 1998 da una collaborazione tra le università di Dresda e Aquisgrana, consiste in una matrice cementizia a grana fine ad alta resistenza, rinforzata da un tessuto in fibre. Solitamente vengono impiegate fibre di vetro, ma in alcuni casi sono state utilizzate anche fibre di carbonio, eventualmente in combinazione con le prime. L'orientazione delle fibre del tessuto può seguire fino a quattro diverse direzioni [14] [15] [16] [17];
- *Textile Reinforced Mortars, TRM*: sviluppato in Grecia, è 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 [18] [19];
- *Fiber Reinforced Cement, FRC*: sviluppato negli Stati Uniti, si differenzia dai sistemi TRC e TRM per la tecnica di realizzazione e applicazione. Il sistema è costituito da un foglio o tessuto fibroso, tagliato nelle dimensioni desiderate, il quale viene impregnato attraverso l'immersione completa in una boiacca, che costituisce la matrice. Terminata la fase di

impregnazione, il tessuto viene estratto e applicato immediatamente alla superficie dell'elemento da rinforzare [20];

- *Mineral Based Composite, MBC*: è un sistema sviluppato in Svezia presso l'Università di Luleå, si differenzia dai precedenti in quanto il rinforzo è costituito da una rete in CFRP. 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 strato [21];
- *Fabric Reinforced Cementitious Matrix, FRCM*: composito fibrorinforzato a matrice inorganica il cui rinforzo è costituito da una rete a fasci di fibre non impregnate, o eventualmente rivestite con polimeri, allo scopo di migliorarne le caratteristiche di durabilità e la maneggevolezza. Non si tratta in ogni caso di un tessuto impregnato da resine, come nel caso del sistema MBC. L'acronimo FRCM, come già accennato, descrive un sistema composito costituito da una matrice inorganica con un rinforzo a rete (tessuto termosaldato a maglia larga) in fibra, carbonio o PBO, o tessuti unidirezionali a media e bassa densità in fibra d'acciaio, con tecnica di impregnazione in situ dry lay up. La prima è tipicamente una malta a base di leganti inorganici stabilizzata a reazione idraulica con un basso dosaggio di polimeri in percentuale inferiore al 5% sul peso del cemento. Nel caso di rinforzo di murature, in particolare di carattere storico e monumentale, le matrici impiegate sono spesso a base di calce. La composizione della matrice influisce in maniera significativa sulle caratteristiche di adesione al supporto, migliorate dall'impiego di polimeri organici, i quali oltre a garantire la corretta lavorabilità, tempo di presa e adeguate proprietà meccaniche, incrementano la bagnabilità superficiale del supporto stesso a opera dell'impasto. Le caratteristiche della matrice influiscono anche sulla capacità di adesione al rinforzo fibroso, per cui è necessario verificare la compatibilità chimica dei due componenti. Per alcune tipologie di rinforzo, quali le fibre di PBO ad esempio, l'elevata compatibilità chimica con i composti inorganici derivanti dall'idratazione del cemento permette un trasferimento dei carichi dalla matrice al rinforzo stesso mediante meccanismi anche di tipo chimico oltre che, come in genere avviene, meccanico. Si riassumono di seguito i vantaggi offerti dalla tecnologia FRCM:
 - buona resistenza alle elevate temperature e resistenza al fuoco: manifesta una reazione analoga a quella del supporto, ovvero risulta incombustibile, al contrario delle resine, per le quali superata la temperatura di transizione vetrosa (60°- 80°C) si ha in generale un decadimento delle proprietà meccaniche, se non adeguatamente protette.
 - permeabilità al vapore acqueo: comparabile con quella della muratura che permette uno scambio termo-igrometrico con l'esterno e quindi una certa traspirabilità dell'elemento rinforzato, molto importante nelle strutture in muratura e maggiormente negli edifici di interesse storico-artistico;
 - elevata resistenza ai cicli di gelo e disgelo;
 - applicabilità su supporti umidi: anziché inficiare le caratteristiche del composito, come nei sistemi FRP dove le resine non reticolano in presenza dell'acqua, l'umidità favorisce l'adesione al supporto;
 - durabilità anche con elevata umidità ambientale di esercizio: la matrice inorganica non modifica le sue caratteristiche di adesione al supporto; la resina epossidica, al contrario, degrada per esposizione prolungata all'umidità dell'ambiente;
 - atossicità: la matrice non è un prodotto nocivo per la salute degli operatori né per l'ambiente, quindi può essere applicata senza l'uso di protezioni speciali e può essere smaltita senza particolari precauzioni;

- semplicità di manipolazione e applicazione: la matrice è un premiscelato, deve essere mescolata solo con acqua e non richiede l'impiego di manodopera altamente specializzata per la messa in opera, rende più facile l'applicazione su superfici scabre e irregolari senza necessità di una preventiva rasatura;
- elevata affidabilità del sistema di rinforzo anche dopo il raggiungimento del carico di rottura: il comportamento duttile post-fessurazione evita il distacco del sistema FRCM dalla struttura rinforzata;
- lavorabilità in un ampio range di temperatura: tra +5 °C e +40 °C non esistono sostanziali differenze nei tempi di lavorabilità, presa e indurimento;
- reversibilità del sistema: il meccanismo di adesione della matrice inorganica consente l'eventuale rimozione del rinforzo.

Sono state eseguite ormai molte applicazioni sul campo le quali si sono rivelate molto interessanti e promettenti, dimostrando che la tecnologia FRCM risulta affidabile. Nonostante ciò studi di ricerca, sia teorici che sperimentali, come molti articoli scientifici degli ultimi anni lo confermano, sono orientati a caratterizzare completamente il sistema FRCM e quantificare la sua efficacia meccanica in relazione a parametri quali il tipo e la disposizione delle fibre, tipo di matrice cementizia, e le condizioni del substrato.

1.3. APPLICAZIONI

1.3.1. Geopolimeri

Risulta riduttivo e per nulla facile inquadrare questo innovativo materiale in ben definiti e ristretti campi applicativi. Questo paragrafo vuole quindi solamente fornire un quadro del tutto indicativo su alcuni degli utilizzi più investigati, innovativi e comprovati dei materiali geopolimerici. I primi utilizzi dei geopolimeri in applicazioni industriali risalgono agli anni 70' e nacquero per sfruttare la notevole resistenza termica di questi (all'epoca) "nuovi" materiali.

1.3.1.1. Edilizia

E' nel settore dell'edilizia che i geopolimeri vengono utilizzati maggiormente perché hanno buone proprietà meccaniche, sono economici, duraturi, più leggeri (minore densità) e possiedono una maggior resistenza agli attacchi chimici rispetto a molti altri materiali tradizionali. Un altro vantaggio dato dall'utilizzo dei geopolimeri è la rapidità con cui il materiale colato è in grado di acquisire resistenza meccanica, che già dopo poche ore raggiunge livelli discreti. È importante però sottolineare che oggi in Italia e nel contesto europeo le applicazioni studiate non si sono ancora affermate a livello di utilizzo comune, a differenza di quanto accade in Australia (paese, primo fra tutti, all'avanguardia in questo ambito) e Stati Uniti, che presentano molte applicazioni concrete dei geopolimeri. In questi paesi gli impieghi più comuni sono stati e sono tuttora la realizzazione e riparazione di fondi autostradali e di piste di atterraggio: in entrambi i casi la velocità con cui il materiale indurisce e acquisisce proprietà meccaniche permette di ridurre al minimo la durata dei lavori, rendendo molto celere la realizzazione di nuove opere o, nel caso di lavori di manutenzione, creando disagi molto meno marcati al traffico veicolare e aereo. Uno dei prodotti maggiormente di successo per questo tipo di applicazioni è stato il cemento geopolimerico Pyrament®, sviluppato a cavallo tra il 1980 e il 1990 da una delle principali compagnie americane produttrici di cemento, la Lone Star Industries. Tra i suoi primi impieghi c'è quello nella realizzazione di un aeroporto militare temporaneo durante la Guerra del Golfo ad opera della US Air Force Engineering.



Fig. 8 - Lavori di riparazione di una strada con cemento Pyrament®

Scendendo nel dettaglio, il Pyrament® è costituito in parte da normale cemento Portland ed in parte da cemento geopolimerico e, nel caso dell'impiego in piste di atterraggio, sono sufficienti dalle 4 alle 6 ore di indurimento perché sopporti le sollecitazioni di un Boeing in fase di atterraggio. Il suo

impiego continuò con successo fino al 1996, anno in cui problematiche finanziarie della società produttrice (non legate in alcun modo a ragioni tecniche) portarono alla cessazione della produzione. Più recentemente il gruppo australiano Zeobond Group lanciò sul mercato l'E-Crete™, un cemento geopolimerico a base di cenerei volanti e non contenente Portland per usi più generici, come pavimentazioni di marciapiedi o sentieri, elementi prefabbricati, barriere acustiche, ecc. Analogie in termini di comportamento meccanico sono state evidenziate tra calcestruzzi geopolimerici e calcestruzzi tradizionali a base di cemento Portland [22].

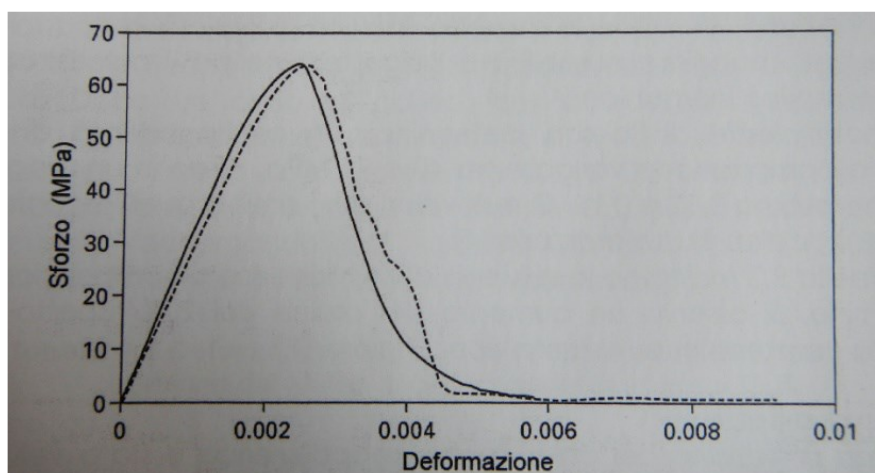


Fig. 9 - Comportamento a compressione per un calcestruzzo geopolimerico (curva tratteggiata) e per un calcestruzzo tradizionale (curva continua)

I calcestruzzi geopolimerici sono generalmente preparati con una piccola aggiunta nell'impasto di un superfluidificante, al fine di migliorare la lavorabilità dell'impasto permettendo di mantenere contenuti i quantitativi di acqua: l'acqua in eccesso andrebbe infatti ad inficiare sulle caratteristiche meccaniche finali del manufatto. I cementi geopolimerici possiedono inoltre:

- Buona aderenza alle barre d'acciaio [23];
- Ottima resistenza alle alte temperature [24], in processi degradativi con reazioni alcali-silice, e se esposti ad attacchi acidi, a solfati e ad'acqua marina [25];
- Maggior livello protettivo dalla corrosione nei confronti dell'armatura in acciaio [26].

Questi punti di forza rendono molto adatti i materiali geopolimerici per applicazioni edili e strutturali. A livello di ulteriori esempi applicativi, è possibile citare i rinforzi strutturali in matrice geopolimerica, ovvero compositi fibro-rinforzati (Externally Bonded - Fiber Reinforced Polymer, EB-FRP) applicati esternamente per opere di ripristino di strutture già esistenti. Al giorno d'oggi l'impiego degli EB-FRP rappresenta una tecnica molto consolidata, i cui materiali d'impiego sono regolati da normative, codici e linee guida internazionali. Tuttavia non mancano in questi materiali compositi alcuni punti di debolezza, come ad esempio il degrado delle proprietà meccaniche con l'aumento di temperatura (influenzato dalla temperatura di transizione vetrosa della resina). Questi svantaggi sono tuttavia un potente incentivo alla ricerca per il perfezionamento tecnico dei materiali in questo ambito. Inoltre, in campo edile c'è uno spiccato interesse più in generale sui materiali ibridi organico-inorganici a base di geopolimeri, che offrirebbero un interessante connubio tra proprietà chimico-fisiche innovative e la nota eco sostenibilità dei materiali a base geopolimerica. I geopolimeri sono stati anche utilizzati per realizzazioni di impianti fognari, grazie alla maggior resistenza agli attacchi chimici e alla maggiore stabilità in presenza di acido solfidrico. Per quanto riguarda componenti architettonici prefabbricati è possibile trovare sul mercato numerose proposte

come gli Eco-Panel Insulpor, formati da un impasto geopolimerico al cui interno sono disperse sferette di poraver, oppure i prodotti della Banah Cem (UK) [27] che consistono in diverse combinazioni a sandwich tra geopolimeri e svariati materiali isolanti. Rimanendo in ambito architettonico, spicca tra tutte l'applicazione dei geopolimeri nella costruzione del Global Change Institute (GCI), primo edificio al mondo che abbia utilizzato con successo il calcestruzzo geopolimerico per scopi strutturali, in cui 33 grandi travi prefabbricate in questo materiale permettono lo sviluppo di quattro piani fuori terra, tre dei quali sospesi.



Fig. 10 - Global Change Institute, Brisbane, Australia

Queste enormi travi sono state realizzate a partire da cemento geopolimerico EFC (Earth Friendly Concrete) prodotto dalla Wagners e a base di ceneri volanti e scorie d'altoforno con aggiunta di sabbia e aggregati. Realizzato nel 2013, l'istituto è gestito dall'University of Queensland con sede a Brisbane, Australia e vanta il primato di essere uno degli edifici a più alto livello di sostenibilità nel mondo.



Fig. 11 - Travi prefabbricate impiegate nella realizzazione del GCI

La realizzazione di quest'opera segna di fatto un grande passo avanti nell'utilizzo dei geopolimeri in ambito strutturale, anticipando di fatto le previsioni dei ricercatori a riguardo. Le ultime frontiere di studio per altre applicazioni in questo settore riguardano soprattutto la tematica del raffreddamento naturale degli edifici, per la quale sono tuttora oggetto di studio numerose formulazioni geopolimeriche.

1.3.2. Sistemi FRCC

I sistemi di rinforzo FRCC possono essere efficacemente utilizzati come strumento di riabilitazione delle strutture in muratura ed in calcestruzzo armato. Vengono utilizzati nei casi in cui si presenta una di queste condizioni:

- Degrado dei materiali: che può provocare sia la diminuzione della sezione resistente che il decadimento delle caratteristiche meccaniche della struttura;
- Variazione della destinazione d'uso di un edificio, che può provocare un aumento dei carichi negli elementi portanti;
- Danni causati da eventi imprevedibili come cedimenti delle fondazioni, forti impatti, incendi e terremoti;
- Richiesta di adeguamento sismico della struttura alle nuove norme tecniche delle costruzioni.

1.3.2.1. Applicazioni su strutture di muratura

Si riportano di seguito alcune applicazioni significative di rinforzo di strutture murarie mediante compositi a matrice inorganica:

- Rinforzo di pannelli murari: applicando il rinforzo con FRCC sulle superfici murarie può essere incrementata la capacità portante a taglio e a pressoflessione di un maschio murario. La stesura del tessuto può avvenire sia con continuità che per fasce.
- Rinforzo di volte e archi: l'obiettivo è quello di sopperire alla mancanza di resistenza a trazione dell'apparecchio murario contenendo la formazione delle cerniere. Per perseguire questo obiettivo gli FRCC possono essere applicati su volte ed archi murari sia al loro estradosso che all'intradosso. Il rinforzo può essere diffuso o applicato per fasce e può essere collegato ai vari elementi oltre che per adesione, con particolari connettori. In genere, se possibile, questo intervento è abbinato alla costruzione di frenelli in muratura di mattoni e all'inserimento di catene in acciaio.
- Cordolature di piano e sommitali: si può realizzare una cordolatura esterna costituita da fasce di tessuto che cingono l'edificio con la finalità di scongiurare cinematismi di ribaltamento di macroelementi murari. Inoltre, si possono realizzare cordoli sommitali in muratura armata inserendo nei giunti orizzontali di malta dei tessuti di rinforzo.
- Confinamento di pilastri di muratura: fasciando elementi sottoposti a compressione centrata o in presenza di piccole eccentricità si può incrementare la duttilità e la capacità portante degli elementi stessi. Gli avvolgimenti possono essere realizzati in continuo o con fasce fra loro discontinue [28].



Fig. 12 - Rinforzo di pannelli murari con rete di basalto (a sinistra); Applicazione di fasce di tessuto metallico unidirezionale e malta per il rinforzo estradossale di volte murarie (a destra)



Fig. 13 - Cordolo sommitale realizzato con tessuti a base di reti di acciaio (a sinistra); Confinamento di pilastro in muratura con rete di vetro A.R. (a destra)

Progetto push'o ver

Nella pratica degli interventi di rinforzo strutturale con FRCM è stato creato un progetto chiamato "Push'o ver", nato dalla collaborazione delle tre società DOING Ingegneria, EAS Ingegneria e Di Emidio Progetti, impegnate da tempo nelle ricostruzioni a seguito di eventi sismici. L'occasione di fare un test sul campo è arrivata: disponibile un edificio in muratura di due piani a Castel di Lama (AP) da demolire e ricostruire. L'edificio aveva subito danni nel corso della sequenza sismica iniziata ad agosto 2016 che ha interessato l'Italia centrale. A dare seguito all'idea del progetto, diversi partner. L'Impresa edile Gaspari Gabriele Srl di Ascoli Piceno, affidataria dei lavori di demolizione e ricostruzione, ha eseguito le attività in cantiere. Fibre Net SpA di Pavia di Udine (UD) ha fornito sia il Sistema CRM - Composite Reinforced Mortar per il miglioramento della struttura a fronte delle azioni sismiche che gli strumenti di misura per la valutazione dell'evoluzione del danneggiamento degli elementi strutturali. La CMP Srl di Osimo (AN) ha messo a disposizione la struttura di acciaio di contrasto per la spinta. L'Università di Camerino e l'ENEA hanno dato il supporto tecnico-scientifico al progetto, collaborando da tempo su diversi progetti di ricerca e attività sperimentali: con le loro dotazioni di laboratorio, si è esercitata la forza di spinta sull'edificio, monitorando la risposta nelle diverse fasi della prova e interpretando le misure raccolte. Il progetto "Push 'o ver" ha avuto il

patrocinio dell'Ordine degli Ingegneri di Ascoli Piceno e del Comune di Castel di Lama. La Regione Marche è stata coinvolta attraverso enti e istituzioni partecipanti al progetto. Il lavoro si è svolto per fasi suddivise in:

- *Campagna indagine e rilievi*: nelle fasi preliminari del progetto, indagini e rilievi hanno garantito i presupposti per un corretto svolgimento del test di spinta dal vero. La simmetria dell'edificio ha permesso di ricavare due porzioni quasi identiche rispetto alla struttura originaria tramite una demolizione controllata del vano scala. Questa azione ha permesso anche di fare prove conoscitive in situ (compressione diagonale e con martinetti piatti) sulle murature.
- *Messa in sicurezza di una porzione e consolidamento*: una porzione è stata ripristinata, ricucendo le lesioni formatesi durante gli eventi sismici. L'altra è stata migliorata sismicamente con un sistema composito FRCC con fibre di vetro, applicato in maniera differente: su entrambe le facce dei muri portanti al primo livello e soltanto sulle facce esterne al secondo livello. In entrambi i casi, gli orizzontamenti al primo piano sono stati consolidati e sono state realizzate strutture reticolari orizzontali in copertura, per garantire una ripartizione realistica delle azioni orizzontali. Le masse della copertura sono state simulate posizionando alcuni serbatoi pieni di acqua.
- *Prove iniziali di caratterizzazione dinamica*: le prove iniziali di caratterizzazione dinamica sono servite per rilevare le vibrazioni ambientali e quelle prodotte dall'impulso di una massa di circa 1 tonnellata, lasciata cadere in prossimità della struttura da varie altezze. I dati ottenuti hanno fornito informazioni sulle proprietà dinamiche delle due strutture in termini di frequenze proprie, forme modali e smorzamenti.
- *Prove pushover*: su entrambe le porzioni sono state eseguite prove di spinta fino al collasso, con una struttura di spinta in acciaio e simulando azioni sismiche orizzontali. I risultati sperimentali saranno utili per validare le tecniche di miglioramento sismico messe in campo, valutando i benefici apportati rispetto all'edificio semplicemente ripristinato. Il confronto tra i risultati sperimentali e quelli numerici forniranno indicazioni utili sulla validità dei modelli adottati a vantaggio delle future progettazioni di miglioramento sismico.

Il progetto "Push'over" è un traguardo importante perché fornisce soluzioni estremamente convenienti per gli interventi di miglioramento sismico e possono diventare una opportunità da cogliere in ottica del Superbonus 110%.



Fig. 14 - Prove di spinta sui due edifici oggetto di studio

1.3.2.2. Applicazioni su strutture in calcestruzzo armato

La versatilità del rinforzo permette l'utilizzo di sistemi FRCM su supporti in c.a. in diverse tipologie di intervento:

- Rinforzo a flessione di travi, pilastri e travetti di solaio: si applicano strisce di tessuto al lembo teso dell'elemento di cui si vuole incrementare la capacità flessionale. In questo modo si riducono le deformazioni sotto i carichi di servizio e si limitano gli stati fessurativi;
- Rinforzo a taglio di travi e pilastri: applicando strisce di tessuto alla superficie esterna dell'elemento si realizza il rinforzo a taglio. Questo può essere continuo, applicando ogni striscia di tessuto in adiacenza alla precedente, o discontinuo, intervallando con spazi vuoti le strisce di rinforzo. È inoltre possibile avvolgere completamente la sezione o creare una configurazione ad U.
- Confinamento di pilastri: la fasciatura di elementi sottoposti a compressione centrata o in presenza di piccole eccentricità permette, come per le murature, di aumentare la duttilità e la capacità portante degli elementi.
- Rinforzo di nodi trave-pilastro: avvolgendo in continuo le estremità degli elementi che convergono nei nodi travi-pilastri si può incrementare la duttilità dei nodi.
- Rinforzo di setti in calcestruzzo armato.
- Rinforzo di solai (antifondellamento): l'applicazione del sistema FRCM permette di rinforzare i travetti in calcestruzzo danneggiati o sottodimensionati. Inoltre, dopo aver terminato il rinforzo statico dei travetti, risulta utile procedere alla posa del rinforzo su tutta la superficie del solaio come protezione attiva rispetto all'eventualità di distacco di parti di pignatta in laterizio.
- Rinforzo antiribaltamento delle tamponature: le tamponature possono essere rinforzate e rese solide al telaio strutturale in c.a. attraverso i sistemi FRCM, scongiurando possibili ribaltamenti causati da eventi sismici.
- Rinforzo di ponti.



Fig. 15 - Rinforzo a flessione di trave mediante placcaggio con strisce di tessuto unidirezionale realizzate con rete di acciaio e malta cementizia (a sinistra); Confinamento di pilastro con tessuto metallico unidirezionale e malta (a destra)



Fig. 16 - Rinforzo di nodi travi-pilastro con tessuto metallico unidirezionale e malta (a sinistra); Rinforzo antiribaltamento di pareti con rete di fibra di vetro, malta e fiocchi di fibra di vetro (a destra)

1.4. FRGM

Il presente studio è stato effettuato per approfondire la tematica dei sistemi FRCM integrati con interventi di retrofitting meccanico-energetico, poiché è considerato un tema di ricerca molto attuale. Le soluzioni proposte sono basate sulla combinazione dei sistemi FRCM con materiali in grado di garantire l'isolamento termico, oppure sull'utilizzo di malte con elevate proprietà di isolamento termico. Nel primo caso, l'impiego di differenti strati (layers di rinforzo e layers di isolamento) comporta un incremento degli ingombri e, spesso, il problema di superare le criticità legate ai ponti termici e alla condensa interstiziale. Nel secondo caso risulta difficile contemperare due esigenze contrapposte, ovvero la capacità isolante della malta e le prestazioni meccaniche attese. Di recente, presso l'Università del Salento, in collaborazione con ITC-CNR (Istituto per le Tecnologie della Costruzione del Consiglio Nazionale delle Ricerche), è stata sviluppata una malta, 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 Geopolymer 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 ed un incremento della resistenza termica sino al 50%.

1.4.1. Proprietà dei materiali

La malta sviluppata presso l'Università del Salento, in collaborazione con ITC-CNR (Fig. 16), denominata GPM (GeoPolymer Mortar) è ottenuta dalla combinazione di cenere volante, metacaolino, attivatori alcalini e aggregati leggeri di vetro espanso. Nella Fig. 16 si riporta un'immagine rilevata mediante SEM (Scanning Electron Microscope) dell'aggregato leggero utilizzato, ottenuto da vetro riciclato.

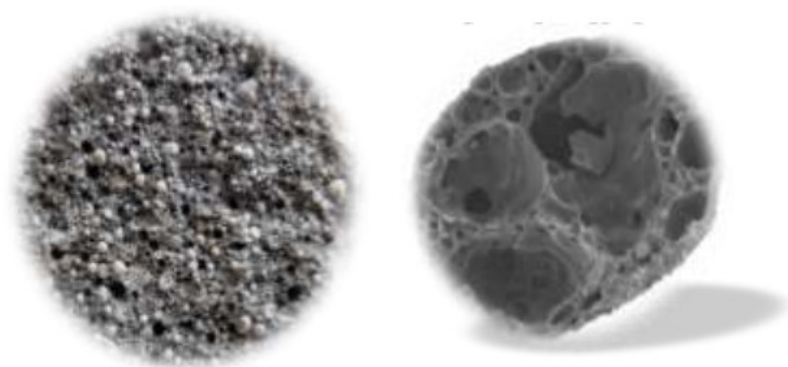


Fig. 17 - Malta GPM e struttura dell'aggregato di vetro espanso

Al fine di confrontarne le prestazioni è stata usata anche una malta di calce disponibile in commercio (NHL - Natural Hydraulic Lime), costituita da un premiscelato secco composto da calce idraulica, sabbia e additivi chimici a cui aggiungere il 17% di acqua in peso. Sono state numerose le indagini sperimentali condotte sui materiali al fine di determinarne le proprietà fisico-meccaniche

(resistenza a compressione, resistenza a flessione, resistenza a trazione, densità a secco, densità in condizioni di saturazione, conducibilità termica, ecc.) In particolare, si evidenzia una riduzione di circa il 33% della densità e del 73% della conducibilità termica. Relativamente alle proprietà meccaniche, sono state determinate la resistenza a compressione a 7, 14 e 28 giorni, la resistenza a trazione e il modulo elastico secante a 28 giorni. La resistenza a compressione e a trazione, ottenute a 28 giorni, della malta geopolimerica ($10.09 \text{ MPa} \pm 7\%$ e $1.17 \text{ MPa} \pm 10\%$, rispettivamente) sono comparabili con i corrispondenti valori relativi alla malta NHL ($9.13 \text{ MPa} \pm 3\%$ and $1.26 \text{ MPa} \pm 7\%$, rispettivamente). Per i compositi utilizzati sono state determinate le proprietà meccaniche a trazione e i relativi legami costitutivi. In particolare, è stato testato un composito FRCM realizzato con una rete in fibra di vetro AR, ed un composito SRG; per entrambi i test hanno riguardato sia il materiale ottenuto utilizzando la malta specifica fornita dal fabbricante, sia quello ottenuto con l'impiego della malta geopolimerica proposta. I compositi FRCM e FRGM hanno evidenziato un legame costitutivo di tipo bilineare, mentre per i sistemi SRG e SRGG il legame costitutivo può essere assimilato ad una trilatera (Fig. 17). La resistenza a trazione e la deformazione ultima sono comparabili, confrontando i compositi realizzati con malta innovativa e tradizionale, come riportato in Tab. 1. D'altra parte anche i legami costitutivi sono simili, tenendo conto della dispersione dei risultati sperimentali (Fig. 17).

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

Tab. 1 - Caratterizzazione meccanica a trazione dei vari sistemi

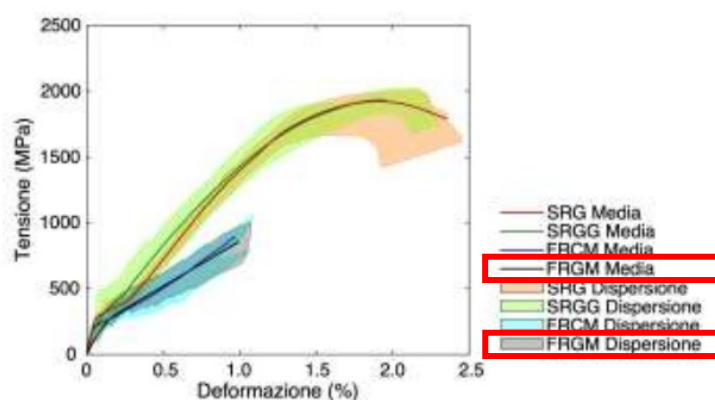


Fig. 18 - Confronto tra i legami costitutivi a trazione dei diversi sistemi

1.4.2. Comportamento statico e termico

I sistemi ottenuti con la malta di nuova formulazione, possono essere utilizzati sia per il rinforzo di elementi verticali sia per il rinforzo di elementi orizzontali, quali le strutture voltate, considerati i vantaggi derivanti dal più basso peso e la ridotta conducibilità termica, nonché la possibilità di garantire proprietà meccaniche comparabili a quelle dei sistemi tradizionali. Nel lavoro effettuato dall'Università del Salento sono stati determinati i seguenti risultati della ricerca relativamente all'utilizzo dei nuovi sistemi per il rinforzo a taglio di pannelli murari. Come noto, la resistenza a taglio nel piano di un pannello murario consolidato mediante sistemi FRCM/CRM dipende sia dalle proprietà della muratura sia da quelle del sistema di rinforzo, oltre che dall'interazione muratura-malta e malta-tessuto/rete. L'ampia campagna sperimentale condotta, ha previsto prove meccaniche e termiche su pannelli murari in scala; i pannelli murari sono stati realizzati con laterizi pieni (250 mm x 120 mm x 55 mm) e giunti di malta di calce, di spessore pari a 10 mm. Il layout della campagna sperimentale prevede il test dei seguenti campioni:

- URM, pareti in muratura non rinforzate (Un-Reinforced Masonry);
- NHL, pannelli rinforzati con uno strato di 30 mm di malta di calce tradizionale;
- GPM, pannelli rinforzati con uno strato di 30 mm di malta innovativa;
- FRCM, pannelli rinforzati con rete secca in vetro AR in uno strato di 15 mm di malta di calce;
- FRGM, pannelli rinforzati con rete secca in vetro AR in uno strato di 15 mm di malta innovativa;
- CRM, pannelli rinforzati con rete GFRP in uno strato di 30 mm di malta di calce;
- CRGM, pannelli rinforzati con rete GFRP in uno strato di 30 mm di malta innovativa;
- SRG, pannelli rinforzati con rete in acciaio in uno strato di 3 mm di malta ad alta duttilità;
- SRGG, pannelli rinforzati con rete in acciaio in uno strato di 3 mm di malta innovativa.

In tutti i casi, il rinforzo è stato applicato su entrambi i lati del pannello senza l'uso di connettori trasversali. Le capacità meccaniche sono state valutate mediante prova di compressione diagonale. Tutti i sistemi di rinforzo testati hanno manifestato un'efficacia considerevole in termini di incremento di resistenza a taglio (Fig. 18). Nel caso di pannelli rinforzati con sola malta si è registrato un incremento del 103% (malta tradizionale) e 53% (malta innovativa), rispetto al pannello non rinforzato. L'applicazione del composito di tipo FRCM, come atteso, comporta un ulteriore miglioramento delle capacità resistenti (129 % nel caso di FRCM tradizionale, 72% nel caso di FRGM). Per i sistemi con rete in FRP, CRM e CRGM, si è ottenuto, rispettivamente, un incremento di resistenza a taglio del 162% e 126%. Infine, per i campioni SRG e SRGG l'incremento è risultato, rispettivamente, pari a 173% e 106%

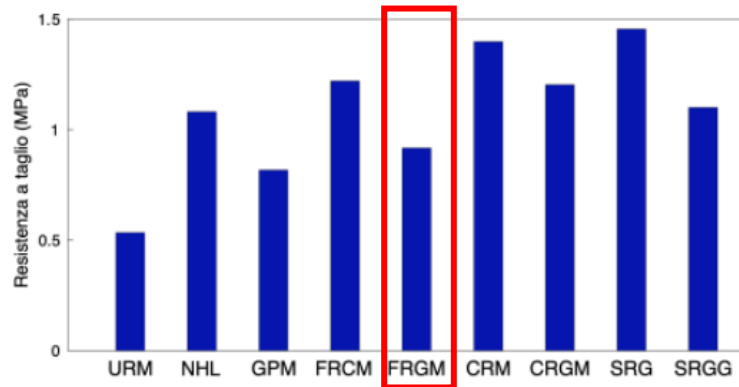


Fig. 19 - Resistenza a taglio

L'utilizzo della malta proposta ha determinato un significativo incremento in termini di duttilità (si veda ad esempio la Fig. 19), soprattutto nel caso dei sistemi CRGM e FRGM, ciò è correlato principalmente al miglioramento dell'aderenza sia all'interfaccia malta-substrato sia all'interfaccia malta-rinforzo.

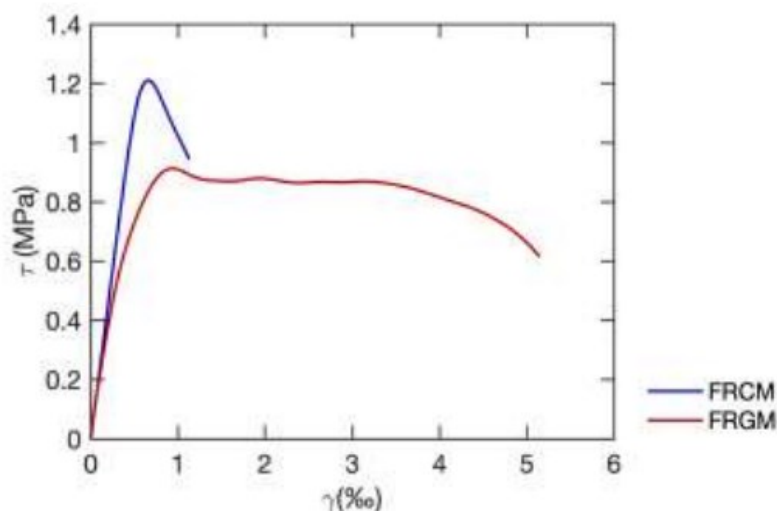


Fig. 20 - Curve tensione (τ) - deformazione (γ) dei pannelli FRCM e FRGM

Le capacità termiche dei pannelli murari sono state valutate utilizzando la procedura sperimentale riportata in Fig. 20. Un lato della parete (lato caldo) è stato continuamente riscaldato da quattro lampade alogene da 250 W per garantire le condizioni di stato stazionario, mentre l'altro lato (lato freddo) è stato lasciato senza carico termico. I campioni sono stati circondati da un anello adiabatico, in modo da rendere il flusso termico omogeneo e monodimensionale. Le temperature superficiali sono state registrate in continuo durante tutta la prova mediante termocoppie.

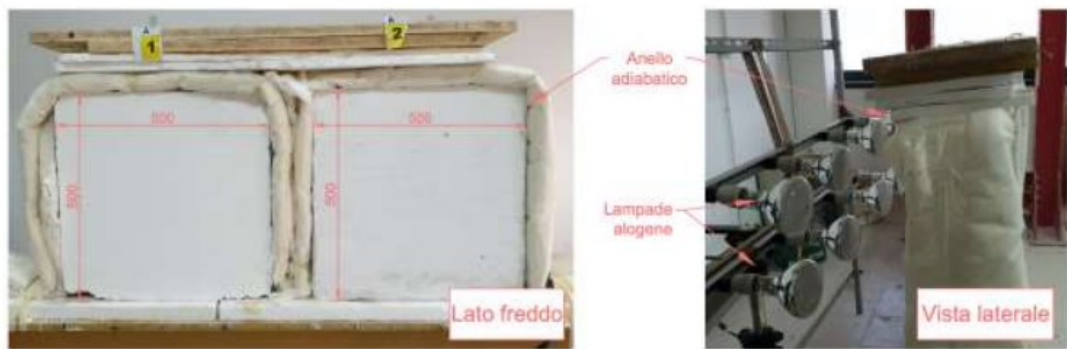


Fig. 21 - Set-up di prova energetica

I sistemi testati hanno manifestato tutti un decremento di trasmittanza termica, ma solo i campioni con malta geo-polimerica hanno fornito risultati più significativi. Infatti, per i campioni FRCM e NHL si è osservata una riduzione, rispettivamente, dell'11% e del 25% della trasmittanza termica, mentre per i campioni FRGM e GPM è stata calcolata una trasmittanza termica pari a $1.126 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ e $1.051 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ (riduzione rispettivamente del 46% e del 50% rispetto ai pannelli URM). Nella Fig. 21 è riportato il valore medio di trasmittanza termica per i pannelli testati.

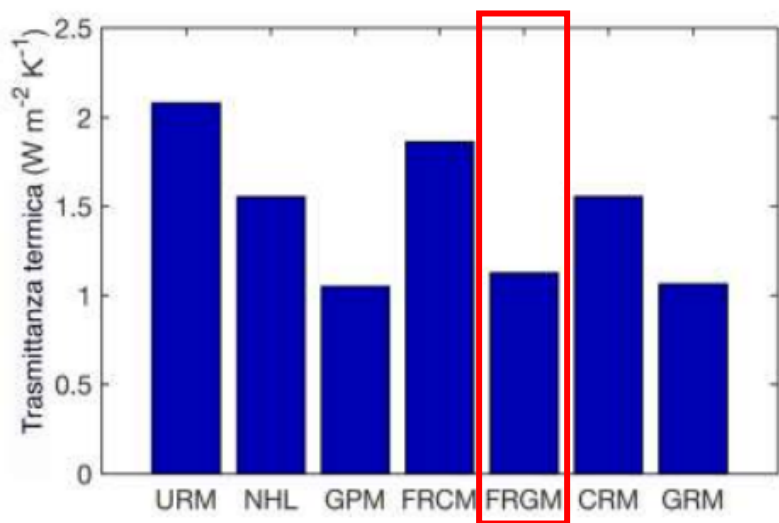


Fig. 22 - Risultati dei test energetici

CAPITOLO 2

MATERIALI E PREPARAZIONE

2.1. MATERIE PRIME

2.1.1. Geopolimeri

Come introdotto precedentemente (Cap. 1.1.3.) le tipologie di materie prime necessarie per la produzione di geopolimeri sono essenzialmente due:

- Polveri reattive allumino-silicatiche;
- Soluzione attivante alcalina.

2.1.1.1. Polveri allumino-silicatiche

La scelta delle polveri di partenza è di vitale importanza, rivestendo queste un ruolo essenziale nel processo di formazione del geopolimero, e dipende molto dall'applicazione a cui sarà destinato il materiale. Questa fondamentale selezione viene effettuata valutando numerosi parametri come ad esempio morfologia, caratteristiche chimico-composizionali, tenore in silicio e reattività. Ai fini della geopolimerizzazione devono essere usate materie prime reattive ricche in silicio (come ad esempio ceneri volanti, scorie d'altoforno o pula di riso) e in alluminio (argille caoliniche o bentonitiche). Un metodo per incrementare la reattività dei componenti pulverulenti di partenza consiste nel sottoporre le polveri ad un processo di calcinazione: l'attivazione termica può infatti aumentare la porzione amorfa, notoriamente molto più reattiva rispetto a quella cristallina [29]. Un altro parametro che può variare, a seconda del materiale impiegato, è la richiesta d'acqua al fine di avere una lavorabilità accettabile. Questa variazione dipende anche dalla superficie specifica e influenza soprattutto le condizioni di stagionatura (tempo e temperatura): in questa fase è infatti essenziale che tutta l'acqua non facente parte della struttura geopolimerica sia correttamente evacuata. Un'altra caratteristica delle polveri è il rapporto Si/Al: parametro fondamentale nel mix design di un geopolimero. Inoltre è possibile che un determinato tipo di polveri possa contenere differenti cationi o anioni che possono poi essere presenti anche nella struttura del geopolimero. Di seguito sono riportate le tipologie di polveri finora più utilizzate:

Metacaolino

Il metacaolino è la materia prima per eccellenza nella produzione dei geopolimeri: la sua peculiare coordinazione cationica lo rende facilmente aggredibile dalle soluzioni alcaline e di conseguenza risulta essere altamente reattivo. La reattività di queste polveri dipende in larga misura dalle caratteristiche morfologiche, composizionali e mineralogiche del materiale impiegato, dal suo grado di deidrossilazione, agglomerazione e superficie specifica; quest'ultime sono funzione del processo di produzione del metacaolino (temperatura di calcinazione e tipologia di forno) [30] a partire da polveri caoliniche. Questa tipologia di polveri minerali viene generalmente utilizzata per applicazioni hightech o per impieghi ad alte temperature (adesivi, rivestimenti, stampi, isolanti, ecc.).

Cenere volante

Residuo solido della combustione di carbone in centrali termoelettriche (separato dai fumi attraverso appositi filtri elettrostatici o meccanici) e inizialmente impiegate come additivo nei

cementi Portland, le ceneri volanti risultano molto ricche in alluminio e silicio. A causa dell'elevata temperatura di combustione del carbone, che può normalmente arrivare fino a 1400°C, le impurità minerali presenti nel carbone (quarzo, pirite, argilla, ecc...) fondono formando piccole goccioline che, trascinate dai fumi, una volta fuori dalla caldaia subiscono un brusco raffreddamento e solidificano sotto forma di celle cave sferoidali (cenosfere).

Loppa d'altoforno

La loppa d'altoforno è un sottoprodotto nei processi di produzione della ghisa, principalmente di composizione calcio-alluminosilicatica.

Composizione media espressa in ossidi (% in peso)	
Al ₂ O ₃	9-12
Al ₂ O ₃ + SiO ₂	44-47
CaO	35-45
MgO	5-15

Tab. 2 - Composizione media di una loppa espressa in percentuali in peso

Polveri minerali derivanti da scarti di lavorazione delle pietre

La lavorazione di taglio e levigatura delle pietre ornamentali produce una tipologia di scarti che si suppone essere adatta all'impiego come materia prima nella formulazione di impasti geopolimerici. Si tratta dei cosiddetti fanghi di segazione, molto ricchi in silice e estremamente dipendenti dalla composizione del tipo di pietra lavorato.

Pozzolane

Le polveri pozzolaniche naturali (piroclastiti sciolte), provenienti da eruzioni vulcaniche di tipo esplosivo, possiedono una struttura amorfa principalmente silicea e come ovvio hanno una composizione dipendente dalla zona di provenienza. Esse possiedono un certo grado di reattività in soluzione alcalina che ben si adatta al loro impiego nella produzione di geopolimeri [31,32]. La reattività di queste polveri (che risulta minore rispetto alle altre polveri sopra descritte) può essere aumentata con un trattamento termico di consolidamento, il quale avviene generalmente a 400°C, al fine di arrivare a produrre manufatti con buone proprietà meccaniche [33]. È tuttavia necessario prestare attenzione a questo trattamento termico controllandolo in modo molto accurato per non aumentare la porzione cristallina di partenza. L'utilizzo di questo materiale è destinato alle produzioni di geopolimeri impiegati in campo edile.

Nella realizzazione di geopolimeri possono anche essere utilizzate materie prime di sintesi estremamente pure e amorfe come la α -allumina e la silice piogenica [34]. I metacaolini sono le materie prime maggiormente utilizzate; seguono le ceneri di centrali elettriche a carbone e le scorie d'altoforno [35].

2.1.1.2. Soluzione alcalina

Gli attivatori comunemente impiegati sono generalmente idrossidi, solfati, carbonati e silicati alcalini. Alcuni esempi possono essere NaOH, KOH, silicati di sodio e potassio, Na₂CO₃, K₂CO₃, Na₂SiO₄ e K₂SiO₄ o piccole quantità di clinker [36]. Quelli maggiormente in uso con il metacaolino,

sono silicati di sodio e potassio dispersi in soluzione acquosa. Le soluzioni acquose di silicati alcalini sono prodotte dissolvendo in acqua ad elevata temperatura i silicati, oppure mediante dissoluzione idrotermale di materiali ricchi in silice reattiva (generalmente sabbia) nell'idonea soluzione di idrossido alcalino.

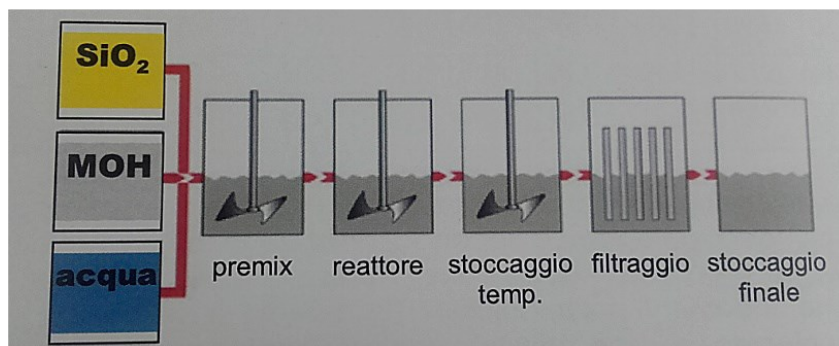


Fig. 23 - Schema del processo di produzione di soluzioni di silicati alcalini

Le soluzioni così ottenute sono poi filtrate e corrette in composizione per arrivare alle specifiche desiderate. I silicati alcalini in soluzione acquosa generalmente non hanno una stechiometria ben definita (derivano dalla combinazione di ossidi metalli alcalini e silice) e sono normalmente indicabili con la seguente formula generale:



dove: M=Na, K, Li, Cs; n = rapporto molare (numero di moli di silice per mole di ossido di metallo alcalino) [37].

2.1.2. Materiali compositi

Le principali componenti, definite fasi, che costituiscono i compositi sono la matrice ed il rinforzo, dalla cui combinazione scaturiscono materiali che manifestano caratteristiche prestazionali differenti in funzione della natura delle singole fasi e della loro interazione.

2.1.2.1. Le matrici

La matrice rappresenta la fase continua del composito ed ha il compito di fissare il rinforzo fibroso, garantendo sia l'adesione al supporto che la stabilità geometrica del sistema composito. In funzione del settore di applicazione, delle prestazioni richieste e delle condizioni di esercizio la matrice è costituita da materiali di natura organica (polimerica) o inorganica (cementizia). La matrice ha il ruolo di garantire la distribuzione dello sforzo tra le fibre per adesione e/o frizione, proteggere le fibre dagli agenti atmosferici, dall'abrasione meccanica e dalle azioni antropiche. La durabilità dei materiali compositi fibrorinforzati è notevolmente influenzata dal materiale che caratterizza la matrice, poiché da essa dipende il comportamento del composito rispetto ai fattori ambientali (alte temperature, umidità, aggressioni chimiche, ecc.). Nonostante il diffuso utilizzo, le matrici organiche presentano alcuni inconvenienti quali in cattivo funzionamento a temperature superiori alla loro temperatura di transizione vetrosa, il rischio di emissione di gas tossici in caso di incendio, i costi elevati, i potenziali rischi per la manodopera per tossicità da contatto o da inalazione, l'impossibilità di applicazione su superfici bagnate o in condizioni di bassa temperatura ambientale, la perdita di permeabilità al vapore, la necessità di un controllo della qualità delle reazioni chimiche per garantire la stabilità del composito. Negli ultimi anni si stanno diffondendo matrici di natura inorganica (malte idrauliche-cementizie o malte ibride polimero-legante idraulico); l'utilizzo di questo tipo di matrici

per la realizzazione di compositi fibrorinforzati in campo civile è particolarmente accettato dagli addetti ai lavori per la maggiore familiarità con questi materiali.

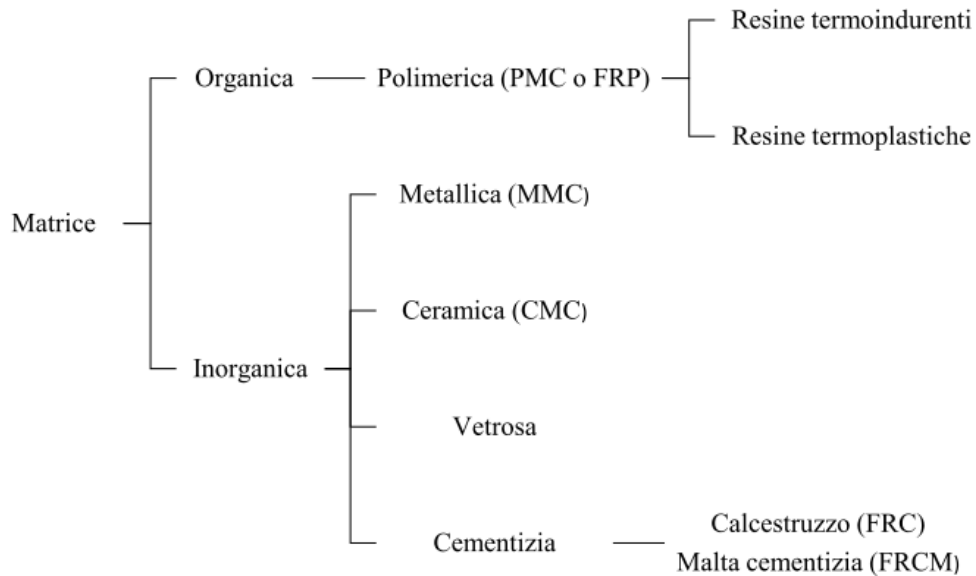


Fig. 24 - Tipologie di matrici impiegate nei materiali compositi fibrorinforzati

2.1.2.2. I rinforzi

Il rinforzo costituisce il componente principale del composito, sotto forma di fase discontinua fibrosa che ha il compito di assorbire gli sforzi assiali di trazione applicati al materiale, mentre alla matrice si demanda il solo compito di distribuzione degli stessi fra le fibre, determinando così una uniformità di sollecitazione tra queste. È costituito da fibre lunghe, secche o rivestite mediante un coating (nel caso di reti in fibra di carbonio o vetro) in grado di migliorare l'adesione con la matrice inorganica. Essendo costituite da filamenti continui molto sottili difficili da manipolare singolarmente, le fibre sono disponibili commercialmente in varie forme, di cui le più comuni sono descritte in seguito e riportate in Fig. 18 [38]:

- Filamento (monofilament): 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 (dell'ordine delle migliaia), destinato ad essere filato, ritorto o strappato per l'utilizzazione sotto forma di fibra discontinua;
- Filo o filato (spun yarn): filo formato da fibre tenute insieme da torsione;
- Filo assemblato (roving): fascio costituito da filati assemblati parallelamente.

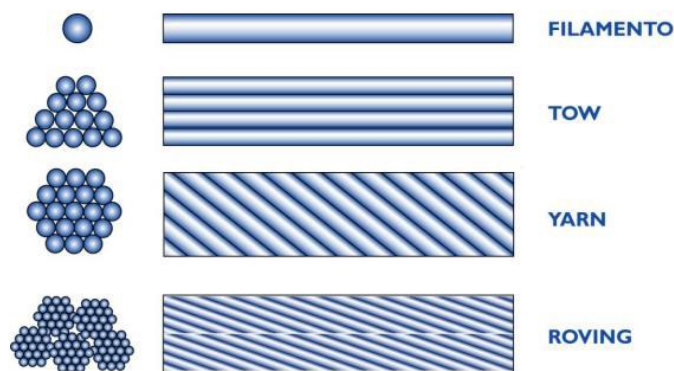


Fig. 25 - Tipologie di fibre

Le fibre sono composizioni opportunamente arrangiate in modo da formare una grande varietà di tessuti (fabric). In tal caso la disposizione delle fibre può essere tale da conferire ai corrispondenti compositi delle caratteristiche di quasi isotropia nel piano. Il rinforzo può essere unidirezionale o bidirezionale. Nel primo caso le fibre sono orientate tutte nella stessa direzione e tenute assieme da una trama leggera di tipo strutturale. Essi presentano un'elevata resistenza a trazione secondo la direzione delle fibre stesse conferendo un comportamento anisotropo. Nel caso dei tessuti bidirezionali le fibre sono orientate in due direzioni preferenziali e il tessuto è caratterizzato da una direzione principale, detta ordito (warp), ed una trasversale ortogonale alla prima, detta trama (weft).

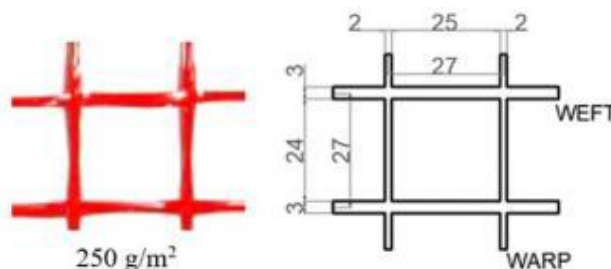


Fig. 26 - Tessuto in fibra di vetro in cui sono distinguibili ordito e trama

Nel caso di tessuti unidirezionali o bidirezionali non bilanciati (con una quantità di fibra inferiore in una direzione), differentemente dai tessuti bidirezionali bilanciati, è possibile individuare una direzione principale lungo la quale si ha la massima risposta alle sollecitazioni. Vanno quindi disposte all'interno della matrice parallelamente alla direzione delle tensioni in maniera da fornire una risposta adeguata in termini di resistenza meccanica. In base a tale disposizione le proprietà del composito sono notevolmente inferiori nella direzione trasversale alle fibre. I materiali attualmente impiegati sono le fibre di carbonio, aramide, vetro, acciaio e PBO. A questi si è recentemente aggiunto il basalto, valido concorrente nel campo dei sistemi compositi fibrorinforzati.



Fig. 27 - Tipologie di fibre impiegate nella realizzazione dei materiali compositi

Tipo di rinforzo	Proprietà (valori medi)					
	Densità (gr/cm ³)	Modulo elastico (GPa)	Resistenza a trazione (MPa)	Allungamento a rottura (%)	Coefficiente di dilatazione termica (10 ⁻⁶ /°C)	Resistenza al calore (°C)
Aramide	1,45 - 1,47	62 - 179	3600 - 3800	1,9 - 5,5	-2	300 - 350
PBO	1,56	270	5800	2,1	-6	250 - 315
Vetro E	2,54	70 - 80	2000 - 3500	3,5 - 4,5	5,2	400
Vetro S	2,49	85 - 90	3500 - 4800	4,5 - 5,5	1,6 - 2,9	400
Carbonio High strength	1,75	240 - 280	4100 - 5100	1,6 - 1,73	-0,75	350 - 400
Carbonio High modulus	1,85 - 1,90	390 - 760	2400 - 3400	0,5 - 0,8	-1,45	350 - 400
Acciaio	7,8	206	240 - 400 (snerv.) 350 - 600 (rott.)	20 - 30	10,4	700
Basalto	2,7	90	1800 - 2200	1,8 - 2,5	8,6	450 - 650

Fig. 28 - Confronto tra le proprietà delle fibre di rinforzo

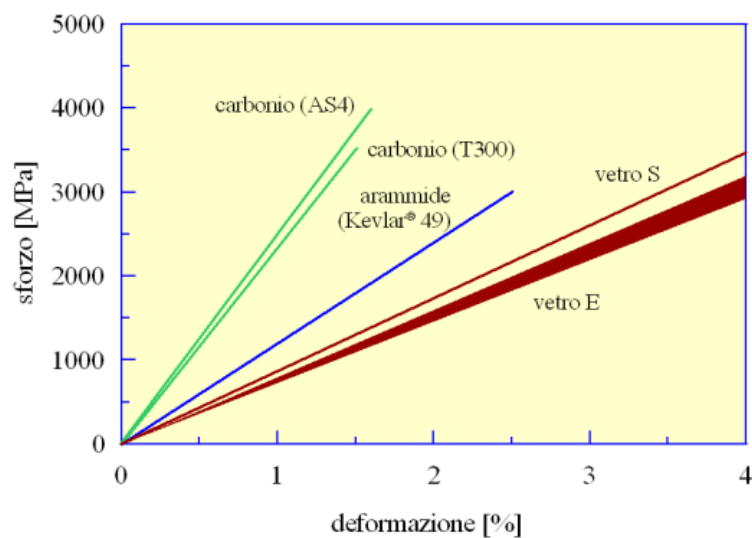


Fig. 29 - Confronto tra le più comuni fibre di rinforzo: comportamento a trazione monoassiale

2.2. MIX DESIGN

La compilazione dei dosaggi necessari all'impasto delle malte cementizie e geopolimeriche di determinate caratteristiche, ha fatto seguito a un approfondito lavoro di studio, basato sulla realizzazione di getti di prova e dalle successive prove di resistenza meccanica effettuate sui provini da essi ottenuti. Le malte sono state così classificate in base alle loro caratteristiche meccaniche allo stato indurito (a 28 giorni di stagionatura), 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:

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

Le metodologie di prova preposte a fornire i dati utilizzati nella caratterizzazione delle malte sono fornite da una serie di normative redatte dal 2002 in poi, e raccolte nella UNI EN 1015:2007, (parti dalla I all'XXI). Gli impasti che al meglio rientravano nelle rispettive classi di resistenza e che univano le migliori caratteristiche di lavorabilità e facilità di realizzazione, sono poi stati scelti per la stesura dei mix utilizzati per la realizzazione degli impasti, su cui si è basato il successivo lavoro di collaudo prestazionale e di confronto. Per le prove, approfondite poi nel successivo capitolo, sono stati considerati getti con volume di impasto approssimativo di 2 litri. Di seguito sono riportati i contributi, in grammi, di ogni componente utilizzato nel mix per 1 litro di impasto:

Mix per 1 L [g]	Sabbia	FA (Cenere volante)	CAC (Cemento alluminoso)	MKK (Metacaolino)	SS (Silicato di sodio)	KOH (Idrossido di potassio)	H ₂ O (Acqua)	H ₂ O (Acqua aggiunta nel mix)
R1 FAK	1350	460	40	-	150	60	90	-
R3 FAK	1350	460	40	-	170	170	-	8
R1 MKK	1350	-	-	500	300	80	220	55
R3 MKK	1350	-	-	500	300	150	150	63

Tab. 3 - Componenti utilizzate nel mix design

È possibile notare come i preparati di malta altro non siano che il prodotto della miscelazione di un legante con acqua e inerte, il quale legante, indurendo e interfacciandosi o meno con l'inerte, contribuisce a formare un sistema monolitico nel contesto in cui la malta è utilizzata. Il comportamento della malta è inevitabilmente influenzato dalla tipologia e dalla qualità delle tre componenti sopra citate, nonché, ovviamente, dal loro differente dosaggio all'interno dell'impasto. In seguito verranno approfondite le caratteristiche delle principali materie prime utilizzate nelle sperimentazioni di questa tesi. Si noterà nell'immediato come lo studio delle varie tipologie di impasti risulterà quasi esclusivamente incentrato sulle proprietà fornite alle malte dalle differenti tipologie di legante (a seconda cioè, che si utilizzino leganti idraulici o leganti geopolimerici, e a seconda del loro dosaggio), tipologie già citate in precedenza, di cui verranno di seguito fornite informazioni riguardo alla loro composizione in macro-componenti chimici e riguardo al loro processo di lavorazione e di reazione nell'impasto.

2.2.1. Inerte

L'inerte, anche detto "aggregato", costituisce l'ossatura principale della maggior parte dei materiali compositi presenti in edilizia, la cui coesione è, come si è visto, garantita dalla pasta cementizia. Gli aggregati vengono definiti come materiali minerali granulari particellari, e vengono denominati inerti in quanto non contribuiscono al processo di idratazione e, quindi, ai processi di presa e indurimento, ma influiscono comunque, e in buona parte, sulle resistenze meccaniche ottenibili dal materiale composito. Comprendono un'ampia schiera di materiali di differenti denominazioni a seconda della composizione granulometrica di ognuno, la quale identifica l'inerte in base alla quantità di particelle di determinate dimensioni all'interno dell'aggregato. Si distinguono in particolare, in base al diametro delle particelle, in:

- inerti finissimi (filler), minore di 0,063 mm;
- inerti fini (sabbia), compreso tra 0,063 mm e 4 mm;
- inerti grossi (ghiaietto o ghiaia), maggiore di 4 mm.

Differiscono in proprietà in base al processo di estrazione o di fabbricazione da cui derivano. Se siano, cioè, estratti da letti di fiume, da cave o prodotti dalla frantumazione di rocce, se posseggano una forma arrotondata o spigolosa, e dalla loro natura petrografica (se siano sabbie silicee o calcaree). Ad essi vengono richieste, solitamente, resistenze meccaniche superiori a quelle della pasta cementizia con cui vengono utilizzati, l'assenza di gelività, l'assenza di cloruri che contribuiscano a processi di corrosione delle armature e l'assenza di impurità di vario genere. Quanto detto è attualmente disciplinato dalla normativa europea UNI EN 12620:2002 (parte I), che regola la conformità degli aggregati leggeri da utilizzare nei calcestruzzi, nelle malte e nelle malte da iniezione.



Fig. 30 - Sabbia fine

2.2.2. Acqua

Al fine di evitare fenomeni di ritardo nel tempo di presa o indurimento, la formazione di inestetismi o, nel peggiore dei casi, l'abbattimento delle potenzialità meccaniche e di durabilità del prodotto cementizio indurito, la normativa UNI EN 1008:2003 fissa dei requisiti fondamentali di accettazione per le acque destinate all'impasto di malte e calcestruzzi. L'acqua d'impasto deve, perciò, presentarsi limpida alla vista, e l'utilizzatore deve essere in grado di escludere, in essa, la presenza di inquinanti di natura organica, di tensioattivi che promuovono l'inglobamento d'aria nella malta, di tracce di olio o di grasso e la presenza di sostanze acide che compromettano il processo di idratazione del cemento. Si deve, inoltre, poter escludere la presenza, in quantità eccessive, di sostanze indesiderabili, quali solfati, fosfati, alcali, zuccheri, nitrati, piombo e zinco, sempre allo scopo di evitare interferenze sulla cinetica d'idratazione del cemento utilizzato.

2.2.3. Leganti geopolimerici (polveri allumino-silicatiche)

Con il termine "polveri allumino-silicatiche" vengono definite le polveri con proprietà pozzolaniche ottenute tramite materie prime reattive ricche in silicio e in alluminio, e il rapporto fra questi due componenti principali influenza in buona parte la tipologia di legante allumino-silicatico necessaria a una determinata applicazione [39]. Oltre a ciò, nella pratica, si deve tener conto anche delle differenti reattività in ambiente alcalino che caratterizzano le diverse categorie di alluminosilicati [40] [41]. Le caratteristiche morfologiche, chimico-composizionali e di reattività di questi leganti alternativi tendono a suddividere gli stessi in due categorie (non imprescindibili) di utilizzo:

- Per manufatti ad alte prestazioni e resistenti alle alte temperature vengono di solito preferite materie prime calcinate e ricche di alluminio, come il metacaolino e i minerali vulcanici.
- Per applicazioni generiche in ambito edilizio o per l'inertizzazione di scorie tossiche vengono preferite polveri di scarto dell'industria ricche di silicio, come le ceneri volanti e le loppe d'altoforno.

Di seguito, verranno analizzate le polveri allumino-silicatiche impiegate nelle sperimentazioni di questa tesi.

2.2.3.1. Metacaolino

Il metacaolino può essere genericamente definito come una forma deidrossilata di minerali di caolinite. Le rocce ricche di questo minerale sono note come "caolini". Storicamente utilizzate nella produzione di porcellane [42], tali rocce prendono il nome dal cinese "Kao-ling" (alto crinale), nome della collina in cui, secoli orsono, si estraevano tali minerali. La caolinite ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) (Fig. 24) è il minerale argilloso (un idrossilato di alluminio, per l'esattezza) che fornisce alla materia prima la plasticità e la stabilità durante la cottura. È composta da strati ottaedrici di allumina e strati tetraedrici di silice. La roccia che ne contiene in grandi quantità, il caolino, è una roccia sedimentaria dall'aspetto terroso, prodotto dell'azione dell'acqua meteorica sul gruppo di minerali in questione.

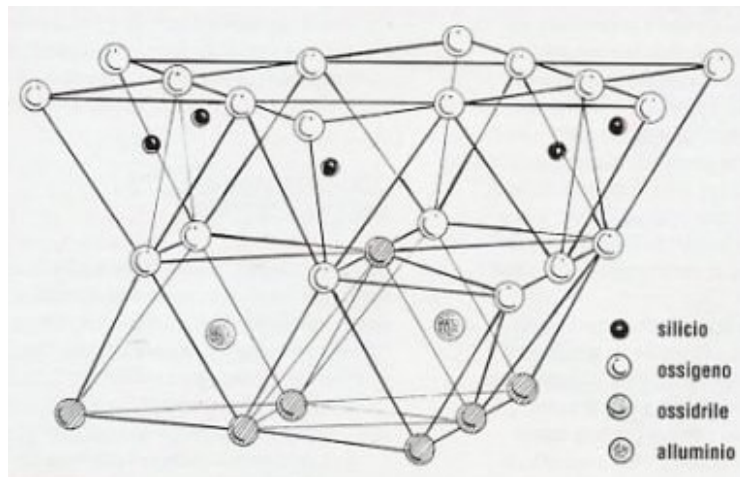


Fig. 31 - Struttura schematica della caolinite

Attualmente, il caolino, è uno dei minerali industriali più diffusi. La sua produzione mondiale supera i 25 milioni di tonnellate annue, e la sua applicazione trova riscontro in svariati rami dell'industria, da quello dell'edilizia a quello della medicina. Chimicamente si può definire come un fillosilicato costituito da strati alternati di silice e allumina, in coordinazione tetraedrica e ottaedrica. Da esso si ricava, per l'appunto, il metacaolino ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) (Fig. 25), una pozzolana naturale prodotta dal riscaldamento delle argille di caolino a temperature comprese tra i 600°C e i 900°C [43], secondo la meccanica chimica denominata "processo di calcinazione", che verrà approfondita in seguito [44].

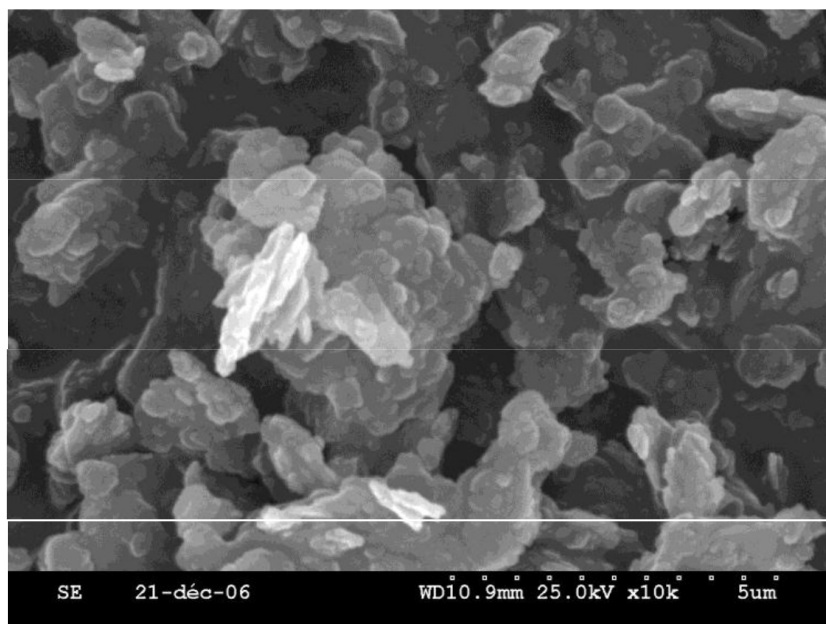


Fig. 32 - Metacaolino, ingrandimento al microscopio

Possedendo una reattività pari a circa due volte quella delle altre pozzolane è, tutt'oggi, considerato un prezioso additivo, unito al cemento Portland (solitamente con una sostituzione del 10%-20% in massa), per la produzione di cementi e di calcestruzzi ad alte prestazioni. Viene, inoltre, utilizzato nella produzione di prefabbricati in calcestruzzo, di prodotti in fibrocemento e ferro cemento, nella produzione di cemento armato in fibra di vetro e di controsoffitti. Apporta, al prodotto finito, svariate proprietà, tra le quali [45]:

- resistenze meccaniche;
- la riduzione della permeabilità;
- la riduzione delle efflorescenze prodotte dal carbonato di calcio;
- una maggiore resistenza agli attacchi chimici;
- una maggiore durabilità;
- una riduzione della reattività alcali-silice;
- una migliore lavorabilità del calcestruzzo;
- un minore ritiro;
- una tonalità cromatica più chiara.

Tuttavia, le specifiche del prodotto finale, variano considerevolmente a seconda della composizione chimica e mineralogica della materia prima (ovvero l'abbondanza o meno di componenti argillosi nella materia grezza), della finezza del prodotto finito e delle condizioni di calcinazione.

Calcinazione

La temperatura di calcinazione (ovvero il procedimento preposto alla decomposizione termica di un composto chimico, tramite un riscaldamento protratto per il tempo necessario) 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 calcinazione avviene in forni rotanti di dimensioni variabili da pochi a svariati metri, sia in lunghezza che in diametro, tramite combustibili gassosi o petroliferi. I tempi di riscaldamento possono variare da svariati minuti ad alcune ore, a seconda del livello tecnologico del forno utilizzato e a seconda delle proprietà ricercate nel prodotto finale. Durante il riscaldamento, superati i 500°C, si avvia il processo di deidrossilazione (ovvero l'eliminazione i gruppi idrossili OH nelle molecole del composto), che contribuisce alla formazione del metacaolino vero e proprio, e può manifestarsi in due modi:

- per intra-deidrossilazione, in cui si forma un metacaolino con alluminio prevalentemente in pentacoordinazione, e tramite la quale si ottiene la tipologia di metacaolino più reattiva alla geopolimerizzazione.
- per inter-deidrossilazione, che porta alla formazione di alluminio prevalentemente in coordinazione tetraivalente. È una deidrossilazione spesso incompleta, in cui restano ossidrilati legati all'alluminio in coordinazione VI.

Il processo può essere riassunto nella seguente equazione:

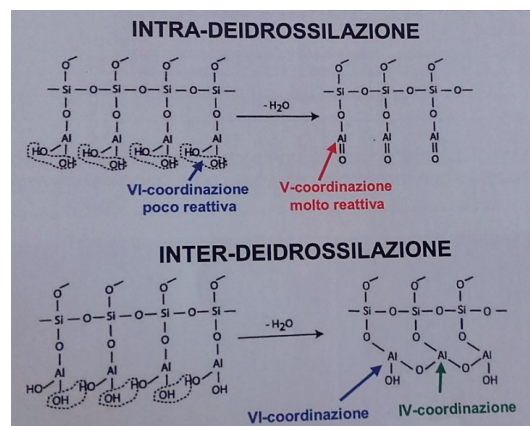


Fig. 33 - Schema di deidrossilazione

La tipologia di deidrossilazione avvenuta e, di conseguenza, la qualità del metacaolino finito, sono funzione della temperatura di riscaldamento del caolino e della tipologia di forno utilizzato [46] [47]. Precedenti studi definiscono l'intervallo compreso tra i 600°C e gli 800°C come il range di temperatura ideale per l'ottenimento di un prodotto altamente reattivo [48]. La temperatura che, tuttavia, offre migliori prestazioni alla polvere finale si attesta attorno ai 750°C. I metacaolini lavorati a questa temperatura sono i più utilizzati nelle sperimentazioni, e si rilevano spesso in letteratura sotto l'abbreviazione "MK-750". Riguardo alla tipologia di forno utilizzato, i forni verticali sembrano offrire migliori doti di reattività al prodotto, rispetto ai forni rotativi [49]. Reattività che può anche essere funzione della qualità della materia prima utilizzata. È dimostrato, in particolare, come l'utilizzo di caolini di purezza troppo elevata implichi la presenza di quantità residue di caolinite all'interno del metacaolino deidrossilato che, di conseguenza, presenterà una reattività peggiore. È importante notare come, nonostante il metacaolino possieda una reattività molto maggiore di altre tipologie di polveri alluminosilicatiche, la sua elevata superficie specifica comporta una maggiore richiesta di fase liquida da parte degli impasti con esso realizzati, al fine di raggiungere una lavorabilità idonea, rispetto ad altri leganti geopolimerici.

Composizione e specifiche tecniche

La polvere di metacaolino utilizzata nell'ambito di questa tesi è il MetaStar 501, progettato con un alto livello di reattività pozzolanica quando utilizzato in calcestruzzo, intonaco e malta a base di cemento Portland. 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. L'uso di questo metacaolino ingegnerizzato in malta, cemento e intonaco può aumentare la resistenza chimica, la resistenza alla compressione e alla flessione e può ridurre la permeabilità. Inoltre può aiutare a ridurre le reazioni di silice alcalina. Quando viene utilizzato 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. 34 - Polvere di 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. 4 - Costituenti principali del metacaolino

2.2.3.2. Cenere volante

Le cenere volante (in inglese Fly-ash, o Flue-ash, spesso abbreviate in FA) è una tipologia di residui generati dalla combustione del carbone nelle centrali termoelettriche. Si distinguono dalla “bottom ash”, ovvero le ceneri pesanti, anch’esse prodotte nel processo di combustione. Esse vengono raccolte da precipitatori elettrostatici, o da altri sistemi di filtraggio, che ne separano la parte solida dai fumi di combustione, e vengono successivamente veicolate in silos di stoccaggio. La raccolta di questo prodotto, un tempo rilasciato indiscriminatamente nell’atmosfera, è, ad oggi, tutelata e puntualmente legiferata in buona parte dei paesi industrializzati.

Processo di formazione e caratteristiche

La materia prima prodotta dalla combustione solidifica durante la sospensione nei fumi di scarico, e viene raccolta dai filtri elettrostatici. La decisa velocità che caratterizza questo processo di solidificazione, contribuisce a formare particelle di forma sferica, di dimensioni variabili tra 0,5 e 300 micron (Fig. 28). Una delle conseguenze di questa rapida solidificazione è la cristallizzazione di una sola parte dei minerali presenti nel composto iniziale, mentre altri rimangono amorfi. Le particelle prodotte dal processo presentano, perciò, una struttura prevalentemente vetrosa, e quindi reattiva [50].

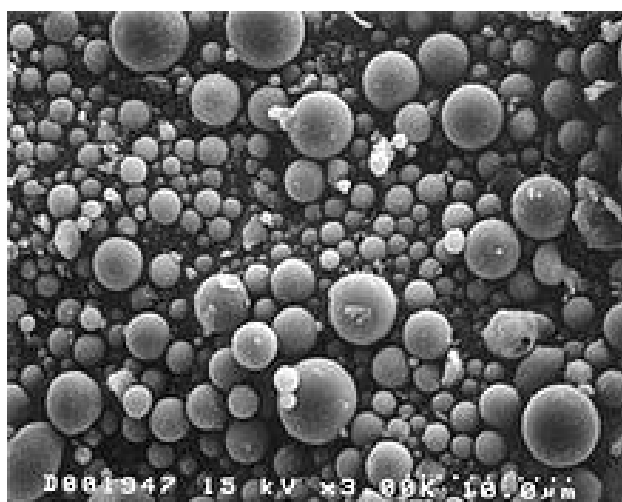


Fig. 35 - Particelle di cenere volante

Un'altra conseguenza di questo instabile processo è la produzione di un materiale chimicamente molto eterogeneo. I suoi componenti principali, ovvero silice, allumina, ossido di ferro e ossido di calcio, possono variare considerevolmente in percentuale di massa da cenere volante a cenere volante [51]. Tali componenti, tuttavia, forniscono al materiale un rilevante comportamento pozzolanico. Questo fa della cenere volante uno dei materiali maggiormente utilizzati come filler nei prodotti cementizi [52], a cui apportano anche un notevole contributo chimico, favorendo la reazione di idratazione del cemento. 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 costruzione [53].

Normativa, tipologie e classificazione

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 silicea (o di classe F, secondo la classificazione americana del ASTM International, e indicate con la lettera V nella sopracitata norma europea) 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.
- Le ceneri volanti di natura calcica (o di classe C, talvolta chiamate ceneri volanti idrauliche, e identificate dalla UNI EN 197-1 con la lettera W) sono il residuo della combustione della lignite e dei carboni sub-bituminosi. Sono attualmente utilizzate negli Stati Uniti, in Canada, e in alcuni paesi europei. Contengono anch'esse silice, allumina e ossido di calcio. Quest'ultimo 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.

Il loro utilizzo nei calcestruzzi è normato dalla UNI EN 450-1:2012. Le ceneri non conformi alla UNI EN 450, possono comunque essere utilizzate come filler, conformemente a quanto stabilito dalla UNI EN 12620:2013.

Cenere utilizzata e composizione chimica in macro-componenti

Il processo di formazione chimicamente instabile e la natura dell'allumino-silicato in questione quale materiale di scarto, non permettono di ottenere un legante geopolimerico dalle precisamente note macro-componenti chimiche. Esse possono, perciò, variare sensibilmente a seconda del fornitore, o del periodo di acquisto. Anche la granulometria caratteristica della cenere può, fondamentalmente, influenzare la resistenza meccanica del prodotto. Nel tal caso, particelle di dimensioni inferiori, compongono ceneri più performanti dal punto di vista dello sviluppo delle resistenze meccaniche a compressione. Per evitare discordanze di risultati durante la fase di sperimentazione, per il confezionamento delle malte geopolimeriche in cenere volante sono state utilizzate polveri (di classe F) di tre differenti periodi di fornitura, mischiate assieme, così da ottenere una quantità sufficiente di prodotto dalle caratteristiche uniformi (Fig. 29). La composizione chimica della cenere volante utilizzata è riportata in seguito (Tab. 4.).



Fig. 36 - Cenere volante di classe F

COMPONENTE	CONTENUTO IN MASSA [%]
SiO ₂	36 - 52
Al ₂ O ₃	22 - 36
Fe ₂ O ₃	2 - 10
CaO	1 - 10
MgO	0,2 - 3
K ₂ O	0,2 - 2
Na ₂ O	0,1 - 0,6
TiO ₂	0,1 - 1,7
SiO ₃	0,2 - 2

Tab. 5 - Costituenti principali della cenere volante

2.2.3.3. Cemento alluminoso

Nome comunemente utilizzato per definire cementi principalmente costituiti da alluminati idraulici di calcio [54]. Tale legante viene sovente identificato come “cemento di alluminato di calcio” o come “cemento fuso” (dal francese “ciment fondu”) e viene solitamente utilizzato in un certo numero di applicazioni specializzate. Tra queste si annovera la produzione di calcestruzzi altamente performanti a breve stagionatura, e 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.

Produzione

Il cemento alluminoso 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) (Fig. 30). Le temperature di cottura

del composto si attestano attorno ai 1600°C. Dalla miscela raffreddata si ottiene una specie di basalto, classificabile come il clinker del cemento alluminoso, opportunamente macinato allo scopo di ottenere il prodotto finito. A tale scopo si utilizzano forni verticali, a riverbero o rotativi (gli ultimi particolarmente indicati nel caso in cui si utilizzi allumina come materiale alluminoso, ovvero per ottenere un materiale considerevolmente refrattario).

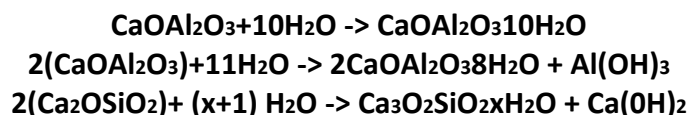


Fig. 37 - Cemento alluminoso

Tale procedimento produttivo fu brevettato nel 1908 in Francia, dalla società di Pavin de Lafarge, come sistema per ottenere cementi altamente resistenti agli attacchi solfatici. Chimicamente, il processo si può descrivere come una combinazione tra la calce (ottenuta dalla decomposizione termica del calcare) e la bauxite, che produce alluminato monocalcico (CaOAl_2O_3), principale costituente del cemento alluminoso (60%-70%), assieme alla belite (2CaOSiO_2 , 10%-15%) [55].

Processo di idratazione

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



Proprietà

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 europee vietano l'utilizzo del cemento fuso nella produzione di calcestruzzi armati [56]. Tale reazione può essere contrastata confezionando i manufatti in cemento alluminoso a temperature inferiori ai 30°C (in climi freddi), e

a bassa umidità relativa. 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. È importante notare come la presenza di un anfotero come l'idrossido di alluminio si comporta, in questo frangente, da acido, provocando la neutralizzazione degli altri componenti basici della reazione. Ciò spiega la natura essenzialmente neutra del cemento alluminoso, al contrario del tradizionale cemento Portland, che possiede invece natura basica. Ovviamente, 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 macrocomponenti del prodotto utilizzato durante la sperimentazione è descritta in seguito (Tab. 5).

COMPONENTE	CONTENUTO IN MASSA [%]
Al ₂ O ₃	37,5 - 41
CaO	35,5 - 39
Fe ₂ O ₃	13 - 17,5
SiO ₂	3,5 - 5,5
TiO ₂	< 4
MgO	< 1,5
Na ₂ O	< 0,4
K ₂ O	< 0,4

Tab. 6 - Costituenti principali del cemento alluminoso

2.2.4. Soluzione alcalina

Come in precedenza accennato, il compito di innescare la reazione geopolimerica e lo sviluppo dei processi di indurimento spetta alla fase liquida ottenuta dalla miscelazione di più composti chimici, denominata soluzione alcalina. Essa 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 [57] [58]. Migliori prestazioni si ottengono anche dall'utilizzo di cationi di maggiori dimensioni, che offrono anche una maggiore refrattarietà al preparato finale [59] [60] [61]. Gli attivatori alcalini maggiormente utilizzati in sperimentazione sono i silicati di sodio o di potassio in soluzione acquosa, a cui vengono aggiunti (anche se non necessariamente) 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 (a parità degli altri componenti), 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 soluzioni di idrossidi contenenti idrossido di potassio (KOH). Il rapporto tra la quantità in massa del silicato di sodio e la quantità in massa dell'idrossido occasionalmente utilizzato è stato mantenuto costante in tutte le sperimentazioni.

2.2.4.1. Silicato di sodio

Il silicato di sodio (o metasilicato di sodio, Na_2SiO_3) è un composto chimico appartenente al gruppo dei composti $\text{Na}_2(\text{SiO}_2)_n\text{O}$. Si presenta solido o liquido, a seconda del processo di produzione. Nel secondo caso, per via delle sue caratteristiche estetiche, è anche conosciuto come “vetro liquido” (dall’inglese “waterglass”). Grazie alla sua elevata solubilità, unito all’acqua, viene utilizzato per la produzione di soluzioni alcaline. Esso si presenta, infatti, stabile in soluzioni neutre o basiche. Nelle soluzioni acide, invece, reagisce, 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 (lo stato in cui viene maggiormente utilizzato in ambito industriale) 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



e quindi il prodotto ricercato. In architettura viene solitamente utilizzato (in soluzione) come additivo per ridurre la porosità dei calcestruzzi, degli stucchi e degli intonaci, aumentandone così la resistenza e l’idrorepellenza. Inoltre, rende i prodotti cementizi maggiormente ignifughi, e ne accelera il tempo di presa. Le caratteristiche e la composizione della soluzione di silicato di sodio utilizzata in questa tesi sono descritte in seguito (Tab. 6).

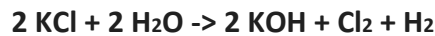
PROPRIETÀ FISICO-CHIMICHE	DATI
Formula bruta	Na_2SiO_3
Densità a 20°C [g/cm^3]	1,54
Rapporto ponderale $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	2,04
Rapporto molare $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$	2,10
SiO_2 [%]	29,86
Na_2O [%]	14,64
H_2O [%]	55,50
Densità equivalente di Baumè [°Bè]	50,60
pH (soluzione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

Tab. 7 - Proprietà del silicato di sodio

2.2.4.2. Idrossido di potassio

Anche noto come “potassa caustica” (KOH), rappresenta (con una produzione annua di circa 800000 tonnellate) uno dei prototipi di base forte più utilizzati in ambito produttivo. Come la soda caustica, trova largo impiego per via della sua propensione a reagire con gli acidi e per via della sua natura corrosiva. Come l’idrossido di sodio è notevolmente igroscopico, e come esso produce reazioni esotermiche se dissolto in acqua o in altri composti liquidi. Anche il KOH è considerato altamente tossico per via della sua causticità, giacché soluzioni di molarità superiore a 0,04M risultano corrosive per la pelle umana. Tuttavia, rispetto al NaOH , è dotato di una minore solubilità in acqua. Viene utilizzato in chimica, oltre che come base, come nucleofilo e come reattore con gli ossidi. Storicamente prodotto tramite una reazione di metatesi simile a quella precedentemente descritta per la soda caustica (ma utilizzando, ovviamente, il carbonato di potassio), ad oggi viene anch’esso

prodotto tramite il processo cloro-alcali (ovvero tramite il processo cloro-potassa, del tutto simile al processo cloro-soda, in cui viene però utilizzato cloruro di potassio). 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 (Tab. 7).

PROPRIETÀ FISICO-CHIMICHE	DATI
Formula bruta	KOH
Massa molecolare [u]	56,11
Densità a 20°C [g/cm ³]	2,04
Solubilità in acqua a 20°C [g/l]	1130
Stato a 20°C	solido

Tab. 8 - Proprietà dell'idrossido di potassio

2.3. PREPARAZIONE

Di seguito verrà fornita una descrizione dettagliata delle procedure di realizzazione dei campioni per le diverse attività sperimentali e delle prove effettuate, necessarie al conseguimento dei valori caratteristici dei materiali oggetto delle tesi.

2.3.1. Supporti

Calcestruzzo

Sono stati realizzati supporti in cls, necessari per la prova di aderenza (pull-off), di dimensioni 10x10x50 cm utilizzando 7 casseri in legno costruiti in precedenza.



Fig. 38 - Casseri in legno 10x10x50 cm

Per il getto effettuato nella betoniera di laboratorio sono stati utilizzati:

- 1 sacco di ghiaia fine
- 2 sacchi di ghiaia grossa
- 5,6 l di acqua

Successivamente il cls è stato vibrato su una piastra e lasciato indurire all'aria per circa 20 giorni. Una volta scasserati i provini sono stati tagliati a metà così da avere 14 supporti in cls di dimensioni 10x10x25 cm.

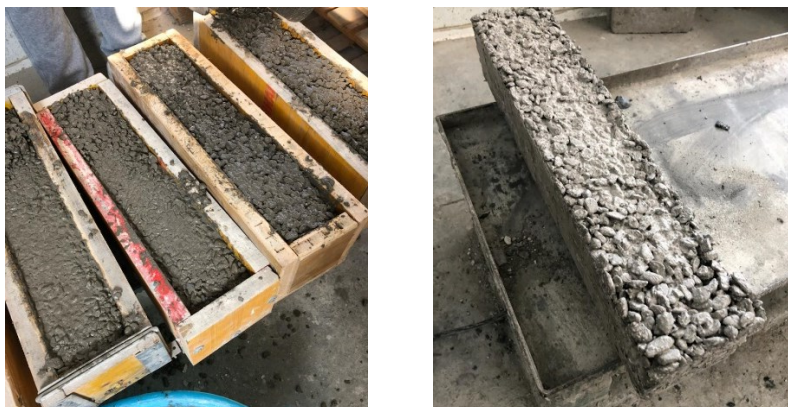


Fig. 39 - Supporto in calcestruzzo

Muratura

Per la prova di aderenza al supporto in muratura sono stati utilizzati almeno 4 mattoni in laterizio, bagnati per 24 ore in acqua, di dimensioni 12x25x5,5 cm.



Fig. 40 - Supporto in muratura

2.3.2. Sabbia

L'inerte utilizzato nelle seguenti sperimentazioni è la sabbia Esincalce 0/3, ovvero una sabbia calcarea, esclusivamente macinata, di granulometria fino a 3 millimetri ideale per la preparazione di malte da muratura o da intonaco, utilizzata in condizioni di sabbia satura a superficie asciutta (SSA).

- **SABBIA 0/3**
- **SABBIA 0/8**
- **GRANIGLIA 4/8**
- **MISTO TONDO 10**



CONFEZIONE
Sacco kg. 25
n. 60 sacchi/banc

CARATTERISTICHE
Il materiale in sacchi su pallet facilita il trasporto e lo stoccaggio anche in situazioni critiche come all'interno di condomini. Le miscele effettuate con materiale in sacco garantiscono un risultato finale costante.

CODICE PRODOTTO	DESCRIZIONE	GRANULOMETRIA	
		MINIMA	MASSIMA
PF10SABB03K25	SABBIA 0/3	mm 0	mm 3
PF10SABB08K25	SABBIA 0/8	mm 0	mm 8
PF10GRAN48K25	GRANIGLIA 4/8	mm 4	mm 8
PF10MISTO10K25	MISTO TONDO 10	mm 8	mm 14

CODICE PRODOTTO	DESCRIZIONE	UTILIZZO
PF10SABB03	SABBIA 0/3	Per intonaci o muratura
PF10SABB08	SABBIA 0/8	Per la formazione di massetti
PF10GRANGL4/8	GRANIGLIA 4/8	Come inerte per malte tecniche, per depolverazione strade combinate con emulsione bituminosa (BTUMFAST), per giardaggio
PF10MISTOTOND10	MISTO TONDO 10	Per produzione di betoncini, per protezione guaine bituminose su soletti di copertura

SABBIA 0/3 è una sabbia calcarea, esclusivamente macinata, di granulometria fino a 3 millimetri ideale per la preparazione di malte da muratura o da intonaco. Si consiglia indicativamente la seguente formulazione:

Prodotto da realizzare	Sabbia 0/3	Cemento	Calce idrata
Malta da muratura	1 sacco Kg. 25	Cemento 42,5 Kg. 4,16	Kg. 0,60
	6 sacchi Kg. 25	1 sacco Cemento 42,5 da Kg. 25	Kg. 3,60
Intonaco	1 sacco Kg. 25	Cemento 42,5 Kg. 3,50	Kg. 1,20
	7 sacchi Kg. 25	1 sacco Cemento 42,5 da Kg. 25	Kg. 8,40






Esincalce s.p.a. - Via S. Maria, 3 - 00192 Roma (RM) - Tel. 06/49811111 - Fax 06/49811112 - www.esincalce.it - info@esincalce.it

Versione F - 1202011

Fig. 41 - Scheda tecnica sabbia Esincalce 0/3

Per determinare l'assorbimento della sabbia (fine in questo caso) sono stati eseguiti alcuni passaggi che portano poi al calcolo dell'umidità:

- essiccare gli inerti in forno per 24 h
- estrarre gli inerti dal forno e immergerli in una vaschetta d'acqua per 24 h
- estrarre gli inerti dall'acqua e asciugarli in modo che la superficie sia asciutta
- pesare gli inerti
- mettere gli inerti in forno fino a raggiungere un peso costante

Sono stati utilizzati uno stampo a cono e una spatola per effettuare la verifica.



Fig. 42 - Fasi della verifica dell'assorbimento dell'acqua

Se gli inerti si trovano nella situazione in Fig. 35b allora corrisponde alla situazione di inerte s.s.a. (saturo a superficie asciutta). Se il tronco di cono frana come in Fig. 35a significa che gli inerti sono ancora bagnati e quindi occorre asciugarli maggiormente, mentre se frana come in Fig. 35c vuol dire che la sabbia è insatura o asciutta e quindi occorre ripetere la prova.

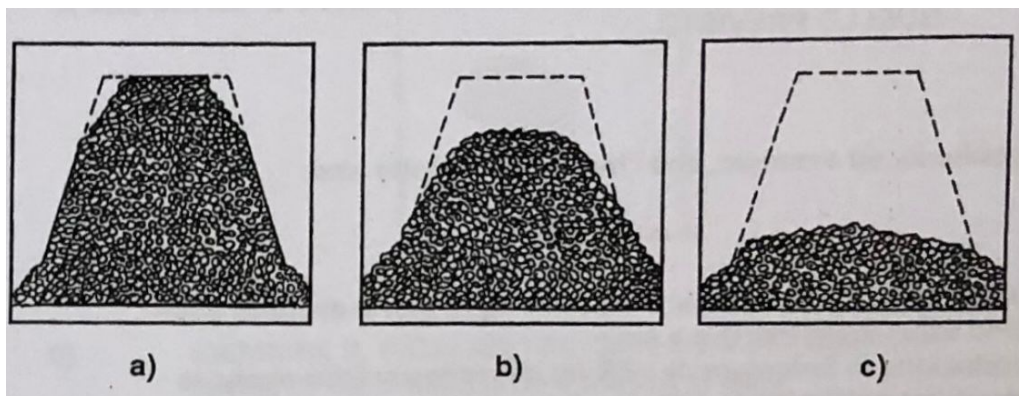


Fig. 43 - Modi di collasso del tronco di cono



Fig. 44 - Condizione di s.s.a. dell'inerte utilizzato

Individuata la situazione s.s.a. e pesati tutti i componenti è stato calcolato l'assorbimento con la formula:

$$U_a = \frac{m_{ssa} - m_0}{m_0} \times 100 = 3,4 \%$$

$m_{ssa} = 486,74 \text{ g}$

$m_0 = 470,86 \text{ g}$

2.3.3. Casseri

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

38x6x1 cm

I casseri di queste dimensioni sono stati realizzati con dei listelli in legno fissati su un tavolato con dei chiodi, e successivamente ricoperti con uno strato di scotch da pacchi per un migliore scassero, in cui poi verranno annegate le fibre di rinforzo.



Fig. 45 - Casseri in legno di dimensioni 38x6x1 cm

16x4x4 cm

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. Anch'essi successivamente sono stati ricoperti con uno strato di scotch da pacchi per evitare che il materiale non si stacchi durante lo scasso.



Fig. 46 - Casseri in legno di dimensioni 16x4x4 cm

2.3.4. Reti di rinforzo

Le fibre utilizzate come rinforzo in queste sperimentazioni sono di due tipologie diverse:

- fibra di vetro (Glasstex Struktura 320)
- fibra di basalto (Glasstex Struktura BA 420)

Sono state entrambe tagliate per avere 16 reti per tipo, di dimensioni omogenee tra loro per provini 38x6x1 cm, quindi costituite da 3 yarn (fili) nella dimensione corta. Queste reti vengono inserite durante il getto a circa metà del provino per avere caratteristiche meccaniche di rinforzo migliori.

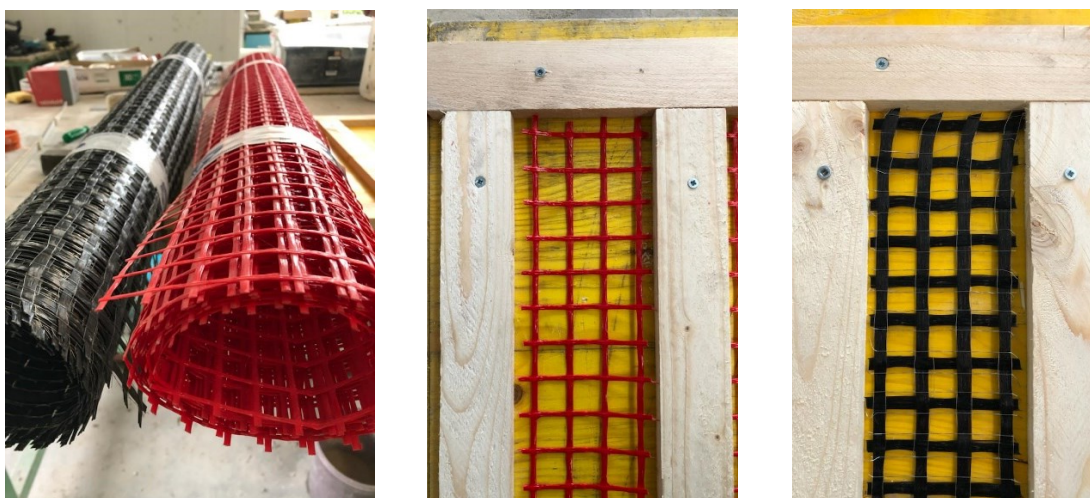


Fig. 47 - Reti di rinforzo in fibra di vetro (rossa) e in fibra di basalto (nera)

Le caratteristiche geometriche e quelle meccaniche con i valori di resistenza, modulo elastico e densità sono riportate nelle schede tecniche della ditta fornitrice dei materiali.

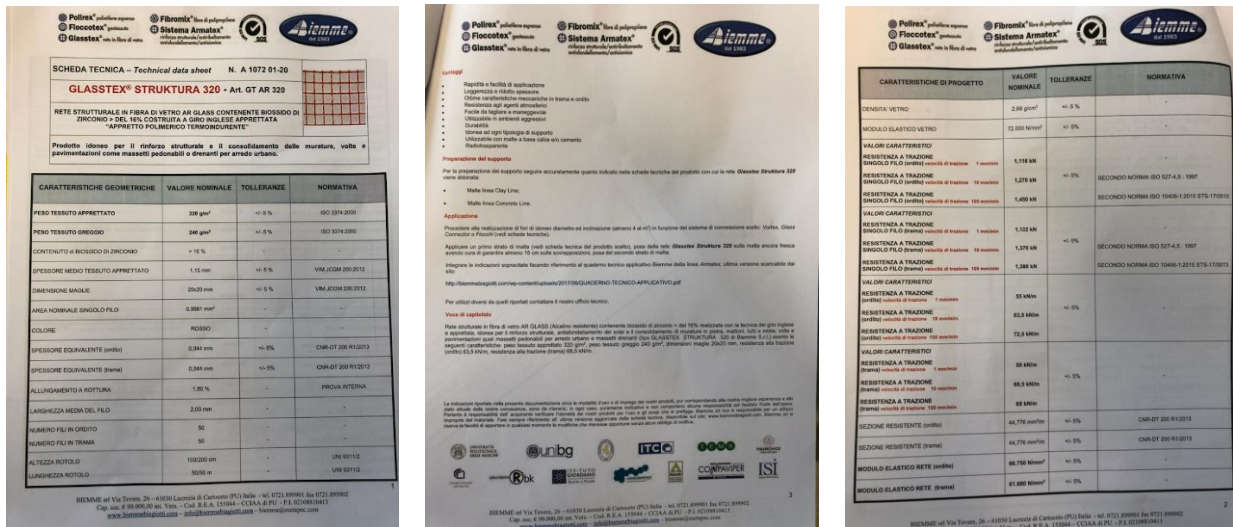


Fig. 48 - Scheda tecnica della rete in fibra di vetro

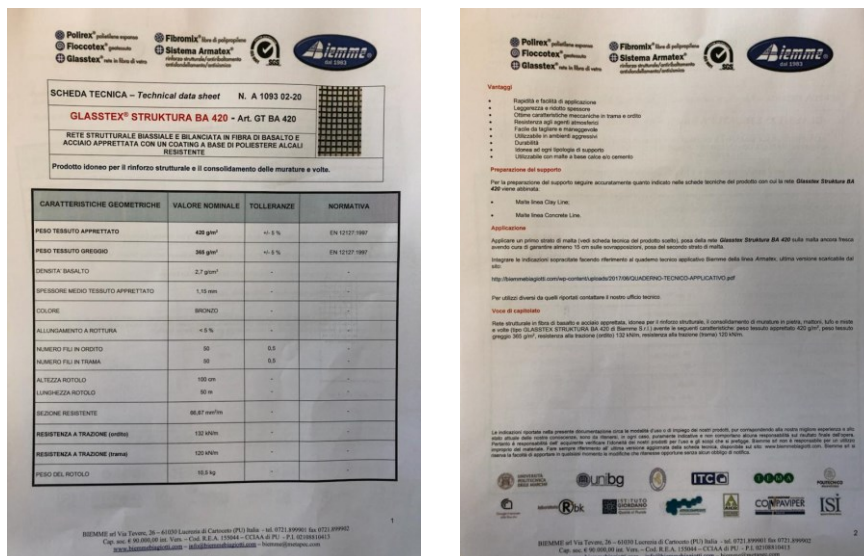


Fig. 49 - Scheda tecnica della rete in fibra di basalto

2.3.5. Miscela

In laboratorio sono state prodotte le 4 miscele, introdotte in precedenza, da utilizzare poi nei getti che verranno testati. Si tratta di un'operazione molto delicata e precisa in cui sono mescolate tutte le componenti costituenti la miscela finale, da mixare poi con l'inerte e i leganti per produrre il materiale finale. Sono stati utilizzati il silicato di sodio (SS), l'idrossido di potassio (KOH) e l'acqua (H₂O) in quantità diverse (in grammi) e mescolata tra loro in modo da rendere le miscele omogenee ed avere così, sempre per un litro di mix:

R1 FAK

Mix per 1 L [g]	Sabbia	FA (Cenere volante)	CAC (Cemento alluminoso)	MKK (Metacaolino)	SS (Silicato di sodio)	KOH (Idrossido di potassio)	H ₂ O (Acqua)	H ₂ O (Acqua aggiunta nel mix)
R1 FAK	1350	460	40	-	150	60	90	-
R3 FAK	1350	460	40	-	170	170	-	8
R1 MKK	1350	-	-	500	300	80	220	55
R3 MKK	1350	-	-	500	300	150	150	63

Per questa miscela sono stati utilizzati:

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

R3 FAK

Mix per 1 L [g]	Sabbia	FA (Cenere volante)	CAC (Cemento alluminoso)	MKK (Metacaolino)	SS (Silicato di sodio)	KOH (Idrossido di potassio)	H ₂ O (Acqua)	H ₂ O (Acqua aggiunta nel mix)
R1 FAK	1350	460	40	-	150	60	90	-
R3 FAK	1350	460	40	-	170	170	-	8
R1 MKK	1350	-	-	500	300	80	220	55
R3 MKK	1350	-	-	500	300	150	150	63

Per questa miscela sono stati utilizzati:

- 170 g di silicato di sodio
- 170 g di idrossido di potassio

R1 MKK

Mix per 1 L [g]	Sabbia	FA (Cenere volante)	CAC (Cemento alluminoso)	MKK (Metacaolino)	SS (Silicato di sodio)	KOH (Idrossido di potassio)	H ₂ O (Acqua)	H ₂ O (Acqua aggiunta nel mix)
R1 FAK	1350	460	40	-	150	60	90	-
R3 FAK	1350	460	40	-	170	170	-	8
R1 MKK	1350	-	-	500	300	80	220	55
R3 MKK	1350	-	-	500	300	150	150	63

Per questa miscela sono stati utilizzati:

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

R3 MKK

Mix per 1 L [g]	Sabbia	FA (Cenere volante)	CAC (Cemento alluminoso)	MKK (Metacaolino)	SS (Silicato di sodio)	KOH (Idrossido di potassio)	H ₂ O (Acqua)	H ₂ O (Acqua aggiunta nel mix)
R1 FAK	1350	460	40	-	150	60	90	-
R3 FAK	1350	460	40	-	170	170	-	8
R1 MKK	1350	-	-	500	300	80	220	55
R3 MKK	1350	-	-	500	300	150	150	63

Per questa miscela sono stati utilizzati:

- 300 g di silicato di sodio
- 150 g di idrossido di potassio
- 150 g di acqua



Fig. 50 - Contenitori di idrossido di potassio e silicato di sodio



Fig. 51 - Miscele finali (R1 FAK, R3 FAK, R1 MKK, R3 MKK)

2.3.6. Getti

Una volta definite e preparate le componenti sono state mescolate tra loro per avere il prodotto finale, in modo da renderlo omogeneo così da poter effettuare i vari getti. E' stato utilizzato un miscelatore elettrico per malte e delle sessole per cercare di rendere il materiale adatto all'utilizzo, con aggiunta di un certo quantitativo di acqua durante il mix.



Fig. 52- Esempio di preparazione del mix

Sono stati realizzati getti diversi per le varie tipologie di prove che verranno effettuate:

- prove di flessione/compressione
- prove pull-off (distacco dal supporto)
- prove di trazione (tensile test)

Prove di flessione/compressione

Sono stati realizzati 6 provini diversi per ogni matrice di dimensioni 16x4x4 cm, che dopo la prima prova di flessione sono stati divisi a metà per eseguire quindi il doppio di prove a compressione, sugli stessi provini già rotti per flessione. Una volta realizzato il getto, i provini sono stati scasserati dopo circa 48 h e lasciati maturare all'aria fino al momento delle prove, effettuate sia a 7 che a 28 giorni. Alcuni provini hanno manifestato delle efflorescenze già dopo i primi giorni che però non sono state studiate.



Fig. 53 - Provini gettati sui casseri in ferro



Fig. 54 - Provini 16x4x4 cm scasserati

Prove pull-off (distacco dal supporto)

Sono stati realizzati 4 provini diversi per ogni matrice di geometria cilindrica di diametro 44 mm e di altezza 10 mm, disposti su supporti in muratura per le resistenze più basse (R1 FAK/MKK) e su supporti in cls per le resistenze più alte (R3 FAK/MKK). Sono stati lasciati maturare all'aria e qualcuno di essi ha manifestato delle efflorescenze già dopo i primi giorni che però non sono state studiate.



Fig. 55 - Provini gettati sui supporti

Prove di trazione (tensile test)

Sono stati realizzati 8 provini diversi (4 con reti di rinforzo in vetro e 4 in basalto) per ogni matrice di dimensioni 38x6x1 cm, con una prima fase di getto seguita dall'inserimento della rete a metà altezza e successivamente un ulteriore getto. I provini sono stati scasserati dopo circa 48 h e lasciati maturare all'aria fino al momento delle prove.

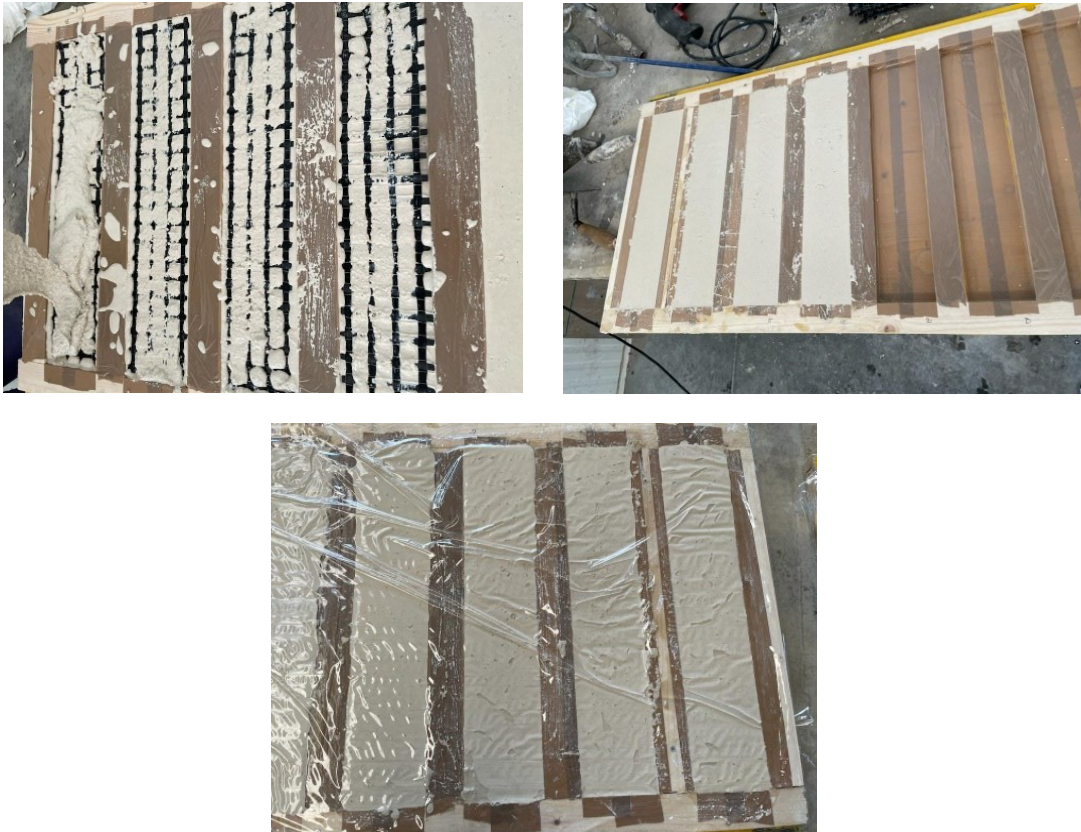


Fig. 56 - Fasi di getto dei provini sui casseri in legno

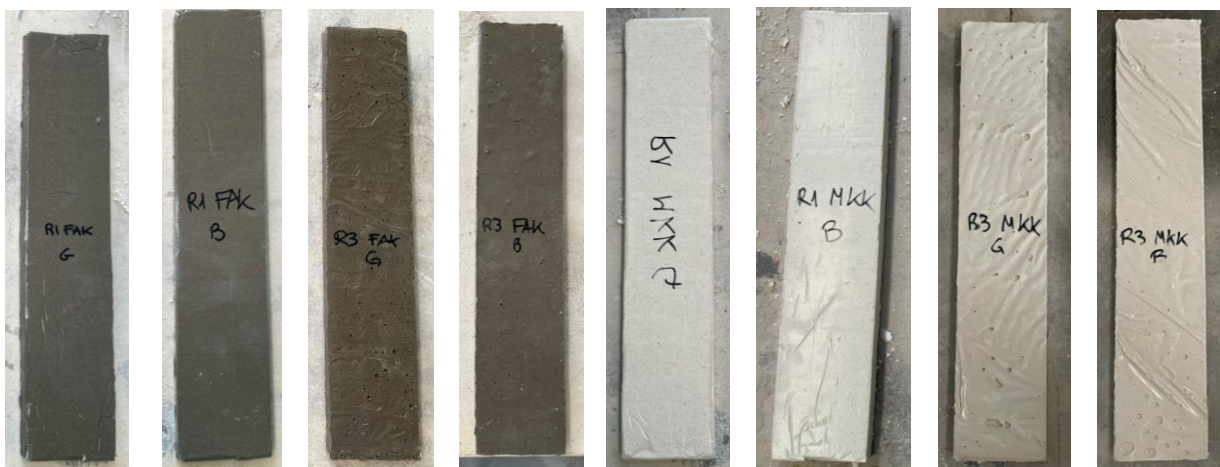


Fig. 57 - Provini 38x6x1 cm scasserati

METODI DI PROVA

3.1. INTRODUZIONE

In questo capitolo vengono definite le modalità delle tipologie di prove effettuate sui provini in calcestruzzo realizzati in precedenza:

- prove di flessione
- prove di compressione
- prove pull-off (distacco dal supporto)
- prove di trazione (tensile test)

3.2. PROVE DI FLESSIONE/COMPRESSIONE

È una prova che ha lo scopo di misurare il carico di rottura oppure le deformazioni di un provino sollecitato a flessione (UNI-EN 1015-11). La prova si esegue su appositi macchinari, in questo caso è stata utilizzata la Galdabini. Esistono tre diversi tipi di test di flessione:

- prova di flessione a 2 punti
- prova di flessione a 3 punti
- prova di flessione a 4 punti

Nel presente studio è stata effettuata la seconda tipologia di prova, in cui il provino viene poggiato su due rulli paralleli a distanza L corrispondente a 100 mm. Il carico viene esercitato con progressione graduale nel punto di mezzeria da un incudine superiore che si muove a velocità costante stabilita in rapporto alle dimensioni del provino e al tipo di materiale. Le deformazioni del provino vengono registrate e messe in relazione ai carichi esercitati, fino a pervenire alla rottura. Il test viene effettuato solitamente per materiali tenaci ed elastici. Nel caso di materiali che si flettono senza rottura si considera come carico massimo quello raggiunto al 5% della deformazione. La Galdabini infine elaborerà i dati e fornirà un grafico.



Fig. 58 - Prova di resistenza a flessione

Avvenuta la rottura per flessione, i due spezzoni risultanti sono stati sottoposti a prova di resistenza meccanica per compressione semplice. È analoga a quella di trazione ma in questo caso le forze hanno senso opposto alla trazione e tendono a schiacciare il provino. Si tratta di un test che ha lo scopo di rilevare i valori di resistenza-deformazione del materiale preso in esame, che viene sottoposto così a diversi carichi di schiacciamento, via via crescenti. La prova di compressione è estremamente importante e fornisce una serie di informazioni sulla qualità del prodotto, dati essenziali sia per il produttore che per l'utente. Molti materiali metallici hanno resistenza a trazione e a compressione con valori circa uguali; ma altri, come le ghise, resistono molto meno a trazione che a compressione. All'opposto si comportano i legnami che resistono meglio a trazione che a compressione.



Fig. 59 - Prova di resistenza a compressione

Entrambe le prove sono state effettuate su provini sia a 7 giorni che a 28 giorni dal getto, in modo tale da verificare le diverse resistenze in base ai tempi di maturazione del calcestruzzo.

3.3. PROVE DI PULL-OFF (DISTACCO DAL SUPPORTO)

Consente di identificare la resistenza a trazione di un materiale o di un sistema edilizio o forza di adesione tra materiali diversi (intonaci, resine, malte, vernici) ed un supporto attraverso l'individuazione del carico di rottura (UNI-EN 1015-12; ASTM C1583 2004) per trazione di supporti metallici cilindrici, detti dolly, incollati alla superficie con particolari resine bicomponenti, mescolate tra loro con un rapporto 3:1 tra resina A e resina B.



Fig. 60 - Resina componente A



Fig. 61 - Resina componente B



Fig. 62 - Dolly incollati ai vari supporti

Il macchinario utilizzato è un estrattore idraulico munito di dinamometro con possibilità di memorizzazione della forza corrispondente al momento del cedimento dell'insieme. Si procede poi per gradi all'incremento del carico di trazione, attraverso l'utilizzo di una manovella, sino all'estrazione del dolly. Il carico di rottura è normalmente fornito dallo strumento in kN e, quindi, per calcolare lo sforzo di trazione corrispondente è necessario dividerlo per l'area del dolly, espressa in mm^2 (nel nostro caso corrispondente a 1519 mm^2).



Fig. 63 - Prova di pull-off

Il tipo di frattura deve essere accuratamente valutato perchè da questo dipende la bontà della prova. In particolare si possono avere tre tipi differenti di distacco:

- distacco (A) tra dolly e superficie di prova: la prova non è valida e va ripetuta;
- distacco (B) nello spessore del rivestimento: la prova è valida per crisi del rivestimento ovvero la resistenza ad adesione è maggiore di quella del rivestimento stesso;
- distacco (C) tra il rivestimento ed il supporto: la prova è valida e fornisce il reale valore della resistenza a trazione per adesione.

Perché l'indagine costituisca insieme statisticamente valido e sia quindi correttamente eseguita per ciascuna posizione va estratto un campione di 4 dolly, eseguendo poi la media dei valori ultimi rilevati.



Fig. 64 - Due tipologie di distacco: in ordine distacco tipo A e C

3.4. PROVE DI TRAZIONE (TENSILE TEST)

Le prove di resistenza a trazione sono essenziali per valutare le caratteristiche fondamentali e il comportamento del materiale sia sotto il profilo meccanico che della lavorabilità. Con questa prova infatti si possono determinare la resistenza, l'elasticità e la deformabilità tipiche di un materiale. 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. Per eseguire il test a trazione sui campioni è stata utilizzata la macchina di prova a trazione Zwick/Roell Z050 (capacità 50 kN). Il carico è stato applicato con modalità a controllo di spostamento con velocità della traversa impostata a 0,5 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. Nella figura seguente è riportato il setup di prova.

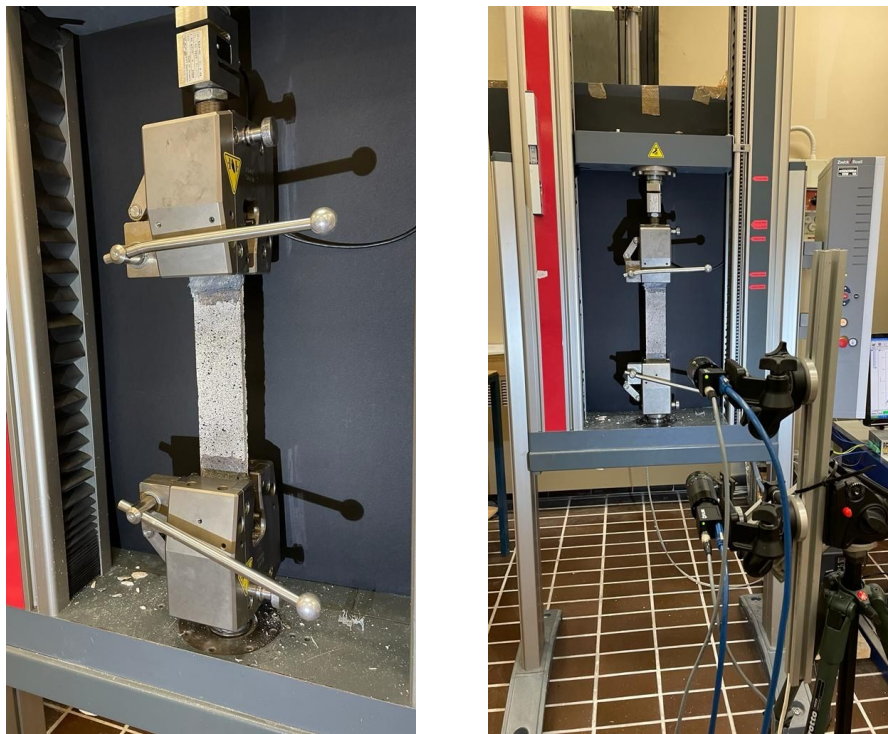


Fig. 65 - Tensile test set-up

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. La macchina universale registra gli allungamenti del provino in relazione ai carichi e ne elabora un grafico dal quale si desumono dati fondamentali quali gli allungamenti percentuali, il carico al limite della proporzionalità e il carico unitario di rottura.



Fig. 66 - Provini fessurati a trazione

Nella zona di presa del provino con il macchinario sono stati incollati alle estremità, su entrambi i lati, delle fasce in fibra di vetro, tramite una resina bicomponente mescolata con un rapporto 2:1. Queste fasce sono state tagliate con le stesse dimensioni in larghezza dei provini sottoposti alla prova di trazione.



Fig. 67 - Incollaggio delle fasce in fibra di vetro

RISULTATI E CONCLUSIONI

4.1. ELABORAZIONE DEI RISULTATI

Una volta effettuate le diverse prove si è passato all'ultima fase di elaborazione dei dati, riportati tramite grafici, tabelle e considerazioni finali sul comportamento dei materiali testati in laboratorio. 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.

4.1.1. Prove di flessione/compressione

La cella di carico è 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 (N). La forza è stata poi trasformata in una tensione espressa in MPa. La resistenza a compressione è stata determinata dividendo la forza F (in N) per la superficie A (in mm²) sulla quale essa è stata applicata, ovvero un'area di 40x40 mm secondo la formula:

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

Il valore della resistenza a flessione, ovvero a trazione per flessione, del singolo provino si calcola con la seguente formula:

$$\sigma = \frac{3}{2} \times \frac{F l}{b h}$$

in cui F è il valore del carico massimo applicato (in N), b e d sono rispettivamente i valori (in mm) di larghezza e altezza del provino e con l si indica la distanza (in mm) tra gli assi dei supporti (pari a 100 mm nel caso specifico).

4.1.1.1. Risultati sperimentali

Nelle figure seguenti vengono riportati i diagrammi tensione-spostamento relativi alle prove a flessione e a compressione e le tabelle contenenti i valori dei parametri individuati.

Risultati a 7 giorni:

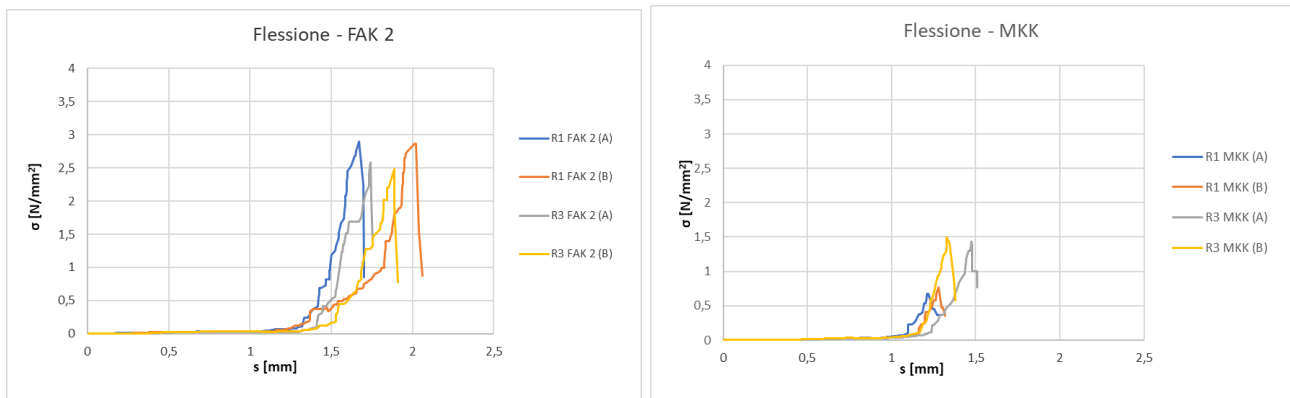


Fig. 68 - Diagramma sforzo - spostamento a flessione

Provino n°		A [mm ²]	Ff _{max} [kN]	Rf [MPa]	Rf _{media} [MPa]	Dev. Standard	Dev. Standard [%]
R1 FAK 2	1	1600	2,90	6,80	6,75	0,066	0,982
	2	1600	2,86	6,70			
R3 FAK 2	1	1600	2,59	6,07	5,94	0,182	3,068
	2	1600	2,48	5,81			

Provino n°		A [mm ²]	Ff _{max} [kN]	Rf [MPa]	Rf _{media} [MPa]	Dev. Standard	Dev. Standard [%]
R1 MKK	1	1600	0,66	1,55	1,68	0,182	10,879
	2	1600	0,77	1,80			
R3 MKK	1	1600	1,44	3,38	3,45	0,099	2,886
	2	1600	1,50	3,52			

Tab. 9 - Tabella delle resistenze a flessione

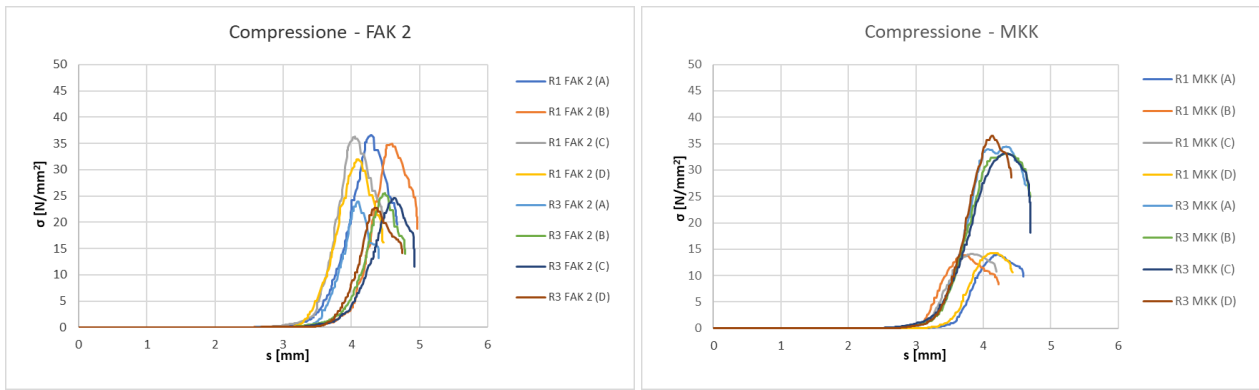


Fig. 69 - Diagramma sforzo - spostamento a compressione

Provino n°		A [mm ²]	F _{c,max} [kN]	R _c [MPa]	R _{c,media} [MPa]	Dev. Standard	Dev. Standard [%]
R1 FAK 2	1	1600	36,64	22,90	21,83	1,348	6,175
	2	1600	34,88	21,80			
	3	1600	36,29	22,68			
	4	1600	31,90	19,94			
R3 FAK 2	1	1600	23,93	14,96	15,12	0,749	4,954
	2	1600	25,54	15,96			
	3	1600	24,60	15,38			
	4	1600	22,69	14,18			

Provino n°		A [mm ²]	F _{c,max} [kN]	R _c [MPa]	R _{c,media} [MPa]	Dev. Standard	Dev. Standard [%]
R1 MKK	1	1600	13,94	8,71	8,78	0,113	1,290
	2	1600	13,88	8,68			
	3	1600	14,06	8,79			
	4	1600	14,29	8,93			
R3 MKK	1	1600	34,46	21,54	21,44	1,016	4,738
	2	1600	33,10	20,69			
	3	1600	33,10	20,69			
	4	1600	36,54	22,84			

Tab. 10 - Tabella delle resistenze a compressione

Risultati a 28 giorni:

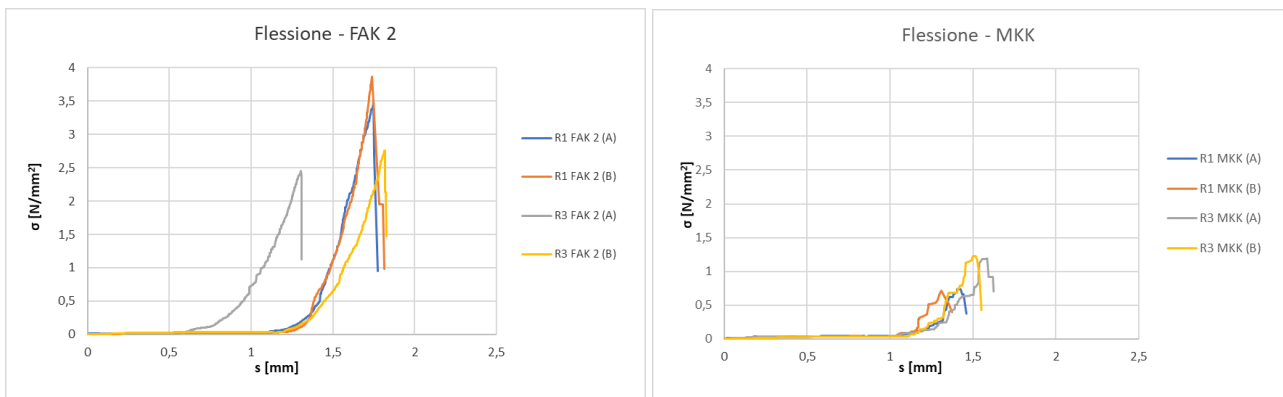


Fig. 70 - Diagramma sforzo - spostamento a flessione

Provino n°		A [mm ²]	F _{f,max} [kN]	R _f [MPa]	R _{f,media} [MPa]	Dev. Standard	Dev. Standard [%]
R1 FAK 2	1	1600	3,48	8,16	8,61	0,646	7,504
	2	1600	3,87	9,07			
R3 FAK 2	1	1600	2,46	5,77	6,12	0,497	8,128
	2	1600	2,76	6,47			

Provino n°		A [mm ²]	F _{f,max} [kN]	R _f [MPa]	R _{f,media} [MPa]	Dev. Standard	Dev. Standard [%]
R1 MKK	1	1600	0,74	1,73	1,71	0,033	1,937
	2	1600	0,72	1,69			
R3 MKK	1	1600	1,19	2,79	2,84	0,066	2,338
	2	1600	1,23	2,88			

Tab. 11 - Tabella delle resistenze a flessione

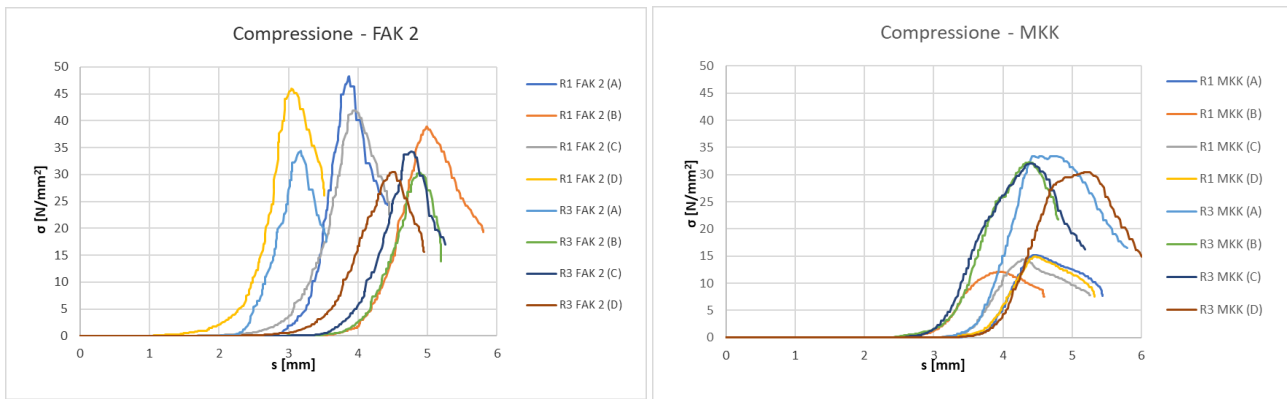


Fig. 71 - Diagramma sforzo - spostamento a compressione

Provino n°		A [mm ²]	F _{c,max} [kN]	R _c [MPa]	R _{c,media} [MPa]	Dev. Standard	Dev. Standard [%]
R1 FAK 2	1	1600	48,34	30,21	27,36	2,617	9,567
	2	1600	38,92	24,33			
	3	1600	41,89	26,18			
	4	1600	45,93	28,71			
R3 FAK 2	1	1600	34,34	21,46	20,22	1,407	6,957
	2	1600	30,30	18,94			
	3	1600	34,25	21,41			
	4	1600	30,50	19,06			

Provino n°		A [mm ²]	F _{c,max} [kN]	R _c [MPa]	R _{c,media} [MPa]	Dev. Standard	Dev. Standard [%]
R1 MKK	1	1600	15,19	9,49	8,84	0,892	10,089
	2	1600	12,06	7,54			
	3	1600	14,41	9,01			
	4	1600	14,92	9,33			
R3 MKK	1	1600	33,40	20,88	20,04	0,751	3,746
	2	1600	32,32	20,20			
	3	1600	32,05	20,03			
	4	1600	30,49	19,06			

Tab. 12 - Tabella delle resistenze a compressione

Considerazioni:

Dall'andamento dei grafici e dai valori ottenuti in tabella si evince innanzitutto che i provini realizzati con cenere volante e cemento alluminoso (FAK) presentano valori di resistenza massima, sia a flessione che a compressione, maggiori rispetto ai provini realizzati con metacaolino (MKK). Come prevedibile inoltre la resistenza misurata a 28 giorni risulta maggiore rispetto a quella misurata a 7 giorni, soprattutto nella verifica a compressione in cui il range di differenza è maggiore rispetto alla flessione. La particolarità si verifica però nei provini MKK in cui le resistenze non presentano variazioni sostanziali con il passare dei giorni di maturazione del materiale, risultando quindi uniformi tra loro. Infine, un'altra situazione particolare è riscontrabile tra i provini FAK in cui accade che le resistenze R3, che dovrebbero essere più performanti, risultano inferiori alle resistenze R1.

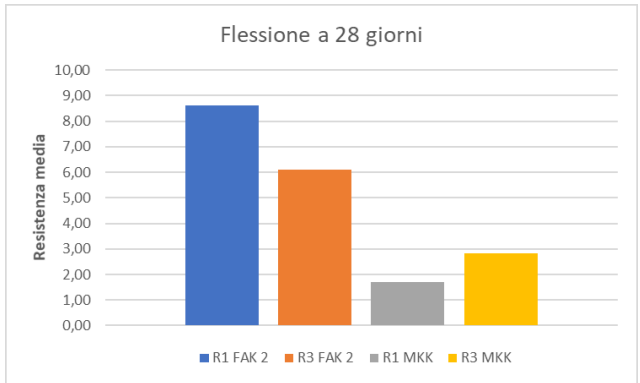
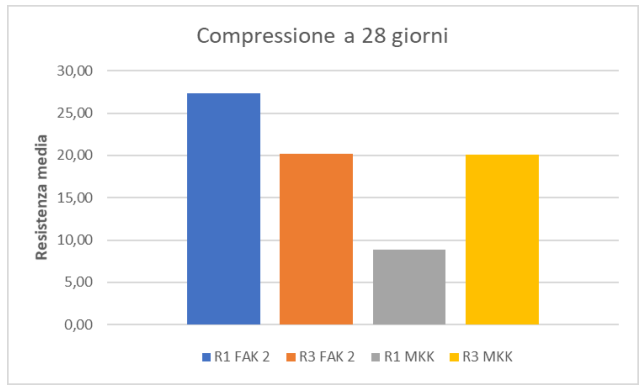
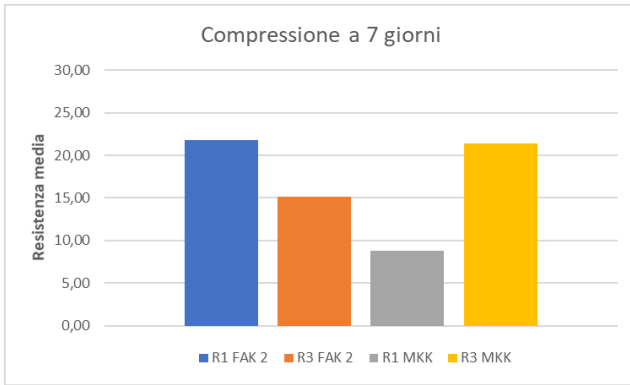


Fig. 72 - Istogramma di confronto tra i risultati delle prove a compressione e flessione

4.1.1.2. Altre prove

Sono stati testati a flessione e compressione anche altri provini, di pari dimensioni, realizzati con un mix diverso poiché errato in fase di realizzazione. Nelle figure seguenti vengono riportati i diagrammi tensione-spostamento relativi alle prove a flessione e a compressione e le tabelle contenenti i valori dei parametri individuati.

Risultati a 7 giorni:

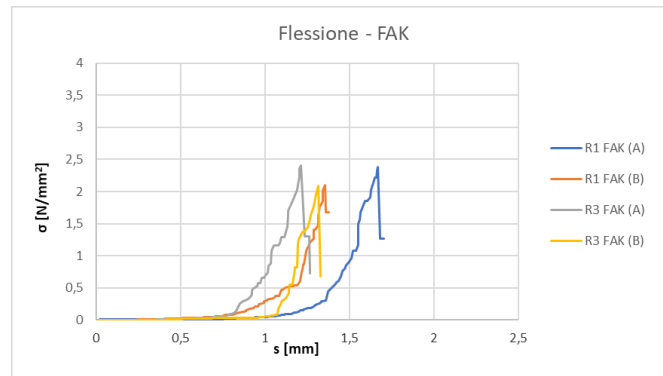


Fig. 73 - Diagramma sforzo - spostamento a flessione

Provino n°		A [mm ²]	Ff _{max} [kN]	Rf [MPa]	Rf _{media} [MPa]	Dev. Standard	Dev. Standard [%]
R1 FAK	1	1600	2,38	5,58	5,25	0,464	8,839
	2	1600	2,10	4,92			
R3 FAK	1	1600	2,41	5,65	5,27	0,530	10,057
	2	1600	2,09	4,90			

Tab. 13 - Tabella delle resistenze a flessione

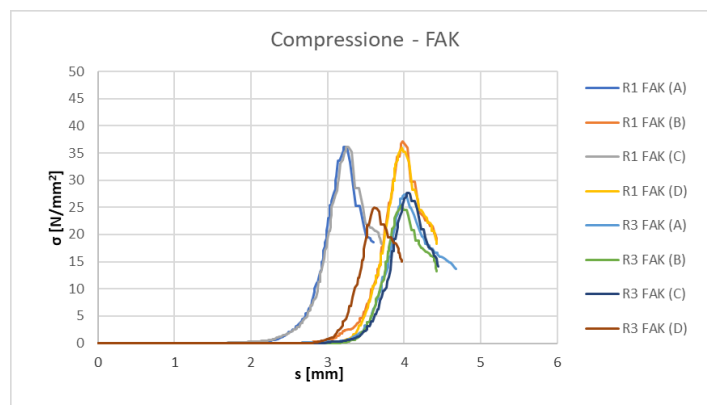


Fig. 74 - Diagramma sforzo - spostamento a compressione

Provino n°		A [mm ²]	F _{c,max} [kN]	R _c [MPa]	R _{c,media} [MPa]	Dev. Standard	Dev. Standard [%]
R1 FAK	1	1600	36,06	22,54	22,69	0,328	1,448
	2	1600	37,08	23,18			
	3	1600	36,10	22,56			
	4	1600	35,95	22,47			
R3 FAK	1	1600	27,30	17,06	16,44	0,828	5,038
	2	1600	25,37	15,86			
	3	1600	27,59	17,24			
	4	1600	24,98	15,61			

Tab. 14 - Tabella delle resistenze a compressione

Risultati a 28 giorni:

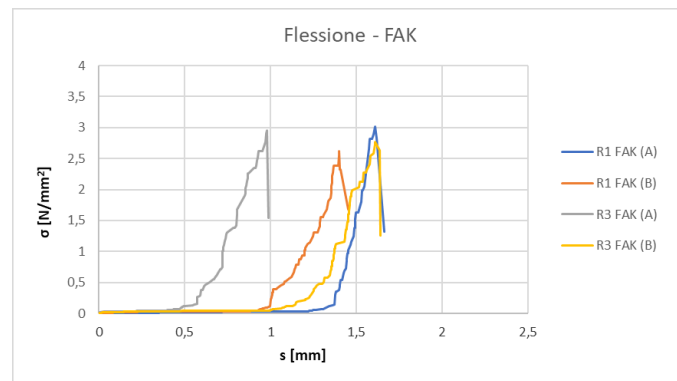


Fig. 75 - Diagramma sforzo - spostamento a flessione

Provino n°		A [mm ²]	Ff _{max} [kN]	Rf [MPa]	Rf _{media} [MPa]	Dev. Standard	Dev. Standard [%]
R1 FAK	1	1600	3,01	7,05	6,60	0,646	9,797
	2	1600	2,62	6,14			
R3 FAK	1	1600	2,95	6,91	6,70	0,298	4,450
	2	1600	2,77	6,49			

Tab. 15 - Tabella delle resistenze a flessione

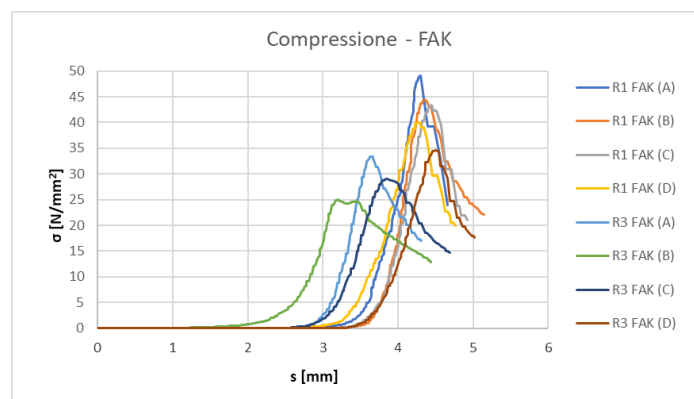


Fig. 76 - Diagramma sforzo - spostamento a compressione

Provino n°		A [mm ²]	Fc _{max} [kN]	Rc [MPa]	Rc _{media} [MPa]	Dev. Standard	Dev. Standard [%]
R1 FAK	1	1600	49,10	30,69	27,62	2,337	8,462
	2	1600	44,24	27,65			
	3	1600	43,36	27,10			
	4	1600	40,05	25,03			
R3 FAK	1	1600	33,32	20,83	19,04	2,715	14,259
	2	1600	25,01	15,63			
	3	1600	29,01	18,13			
	4	1600	34,54	21,59			

Tab. 16 - Tabella delle resistenze a compressione

4.1.2. Prove di pull-off (distacco dal supporto)

Dopo la fase sperimentale, si è proceduto con il trattamento dei dati delle prove pull-off e l'elaborazione delle fotografie effettuate. Per calcolare la tensione di pull-off è necessario conoscere l'area effettiva di strappo sul provino. Come descritto in precedenza, la resistenza a trazione si ottiene come rapporto tra carico applicato ed area isolata del campione, secondo l'equazione:

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

Per quanto riguarda i tasselli circolari, l'area è stata facilmente calcolata, in quanto in laboratorio si è preso nota del diametro dei dolly metallici. Bisogna considerare che per le resistenze R1 è stato utilizzato un supporto in mattoni mentre per le resistenze R3 un supporto in pietra.

4.1.2.1. Risultati sperimentali

Nelle tabelle seguenti vengono riportati i valori dei parametri individuati, con le relative medie calcolate per ogni tipologia di materiale testato e la tipologia di rottura (C) che consente di validare le prove.

Provino n°		F [kN]	F [N]	A [mm ²]	R [MPa]	Rmedia [MPa]	Dev. Standard	Dev. Standard [%]
R1 FAK	1	1,286	1286	1519	0,847	1,039	0,289	27,812
	2	1,601	1601	1519	1,054			
	3	1,234	1234	1519	0,812			
	4	2,189	2189	1519	1,441			
R1 MKK	1	0,167	167	1519	0,110	0,147	0,035	23,699
	2	-	-	1519	-			
	3	0,230	230	1519	0,151			
	4	0,272	272	1519	0,179			
R3 FAK	1	0,954	954	1519	0,628	0,854	0,207	24,276
	2	1,670	1670	1519	1,099			
	3	1,140	1140	1519	0,750			
	4	1,423	1423	1519	0,937			
R3 FAK 2	1	0,906	906	1519	0,596	0,397	0,167	41,909
	2	0,632	632	1519	0,416			
	3	0,589	589	1519	0,388			
	4	0,288	288	1519	0,190			
R3 MKK	1	0,305	305	1519	0,201	0,169	0,097	57,606
	2	0,237	237	1519	0,156			
	3	0,420	420	1519	0,276			
	4	0,066	66	1519	0,043			

Tab. 17 - Tabella delle resistenze

Considerazioni:

Anche in questa prova si evince, dall'istogramma e dai valori riportati in tabella, che i provini realizzati con cenere volante e cemento alluminoso (FAK) presentano valori di resistenza massima di distacco dal supporto maggiori rispetto ai provini realizzati con metacaolino (MKK). La stessa particolarità delle prove di flessione/compressione è riscontrabile tra i provini FAK in cui accade che le resistenze R3, che dovrebbero essere più performanti, risultano inferiori alle resistenze R1, mentre nei provini MKK si nota un leggero aumento di resistenza.

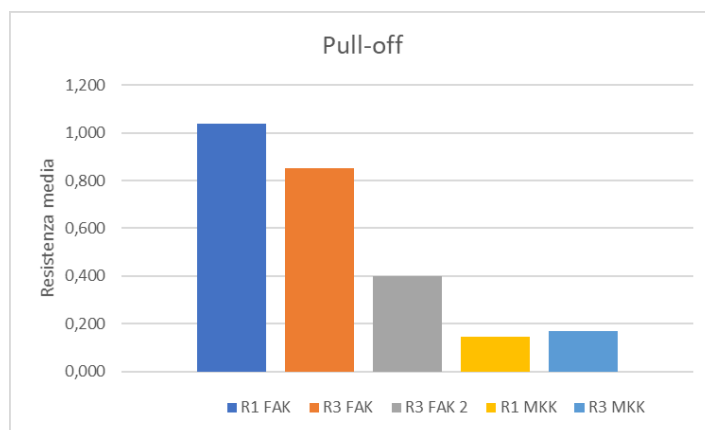


Fig. 77- Iistogramma di confronto tra i risultati della prova di pull-off

4.1.2.2. Altre prove

Alcune prove hanno presentato una tipologia di distacco (A) e (B) che non rendono i test validi. Nelle tabelle seguenti vengono riportati i valori dei parametri individuati, con le relative medie calcolate per ogni tipologia di materiale testato.

Provino n°		F [kN]	F [N]	A [mm ²]	R [MPa]	Rmedia [MPa]	Dev. Standard	Dev. Standard [%]
R1 FAK	1	1,947	1947	1519	1,282	1,447	0,184	12,716
	2	2,007	2007	1519	1,321			
	3	2,279	2279	1519	1,500			
	4	2,556	2556	1519	1,683			
R3 FAK 2	1	1,491	1491	1519	0,982	0,946	0,101	10,696
	2	1,614	1614	1519	1,063			
	3	1,392	1392	1519	0,916			
	4	1,251	1251	1519	0,824			

Tab. 18 - Tabella delle resistenze

I materiali R1 FAK e R3 FAK 2 hanno presentato una tipologia di distacco (A) tra dolly e superficie di prova, perciò le prove sono state ripetute utilizzando una diversa tipologia di resina bicomponente più prestante. I valori della prova sono quelli riportati nella Tab. 16.

4.1.3. Prove di trazione (tensile test)

Per la costruzione dei grafici rappresentativi del comportamento dei provini è necessario eseguire la rielaborazione dei dati restituiti dal macchinario di prova. Dunque il primo passo è stato quello di definire lo sforzo σ [N/mm²] come il rapporto tra la forza, fornita dalla macchina, e l'area della sezione trasversale della rete di rinforzo nella direzione del carico, che in questo caso è pari a 3Ay. Dopo aver individuato lo sforzo è stato possibile costruire i grafici sforzo-spostamento delle varie prove effettuate, differenziandole per tipo di provino. Ogni tipologia è caratterizzata da un grafico contenente quattro curve, o tre in alcuni casi.

4.1.3.1. Risultati sperimentali

Nelle figure seguenti vengono riportati i diagrammi tensione-spostamento relativi alle prove di trazione e le tabelle contenenti i valori dei parametri individuati.

FAK:

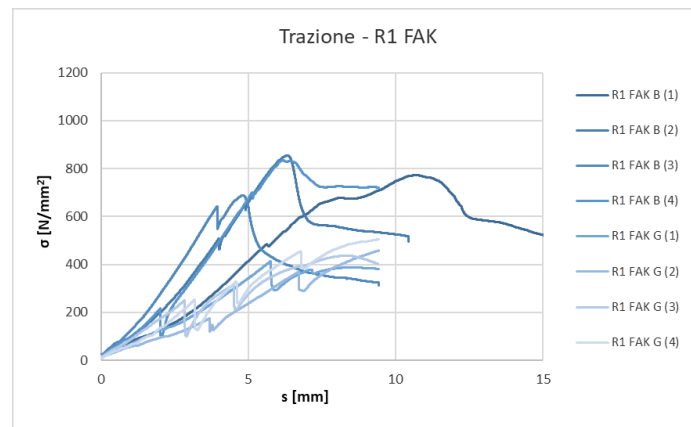


Fig. 78 - Diagramma tensione - spostamento a trazione

Provino n°		F _{max} [N]	σ_t (MPa)	σ_u (MPa)	s _t [mm]	s _u [mm]
R1 FAK B	1	1737,90	481,45	772,44	5,74	16,06
	2	1921,66	516,77	854,11	4,14	10,43
	3	1548,16	640,37	688,11	3,92	9,44
	4	1881,72	208,46	836,36	1,95	9,43
Media		1772,36	461,76	787,76	3,94	11,34
Dev. Standard		169,020	182,095	75,120	1,554	3,181
Dev. Standard [%]		9,536	39,435	9,536	39,455	28,055

R1 FAK G	1	1383,82	135,75	413,08	2,25	9,44
	2	1543,39	171,59	458,02	3,63	9,43
	3	1463,73	246,99	436,93	2,79	9,41
	4	1692,77	245,05	505,30	3,09	9,42
Media		1520,93	199,85	453,33	2,94	9,43
Dev. Standard		131,788	55,295	39,208	0,577	0,013
Dev. Standard [%]		8,665	27,669	8,649	19,610	0,137

Tab. 19 - Tabella dei risultati

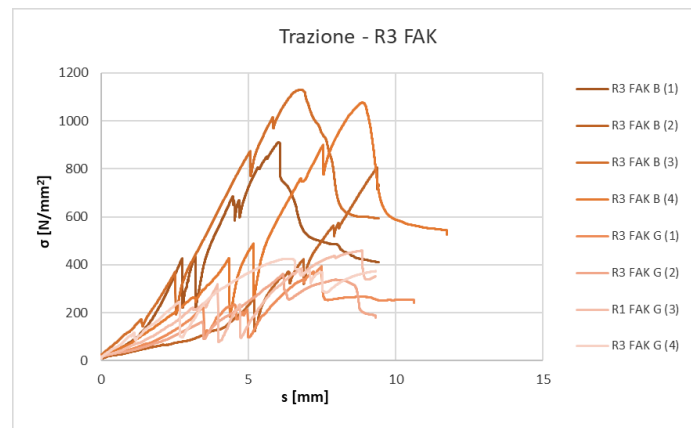


Fig. 79 - Diagramma tensione - spostamento a trazione

Provino n°		F_{max} [N]	σ_t (MPa)	σ_u (MPa)	s_t [mm]	s_u [mm]
R3 FAK B	1	2051,21	407,20	911,69	2,67	9,43
	2	1810,56	250,92	804,73	5,13	9,42
	3	2542,03	158,92	1129,85	1,38	9,43
	4	2422,98	258,02	1076,93	3,04	11,73
Media		2206,70	268,77	980,80	3,06	10,00
Dev. Standard		336,812	102,736	149,704	1,556	1,152
Dev. Standard [%]		15,263	38,225	15,263	50,920	11,514

R3 FAK G	1	1321,13	216,93	394,37	3,41	10,62
	2	1215,09	161,02	362,71	3,40	9,31
	3	1536,75	218,79	458,73	3,12	9,32
	4	1424,95	100,39	425,36	1,14	9,32
Media		1374,48	174,28	410,29	2,77	9,64
Dev. Standard		137,998	56,082	41,194	1,093	0,652
Dev. Standard [%]		10,040	32,179	10,040	39,505	6,758

Tab. 20 - Tabella dei risultati

MKK:

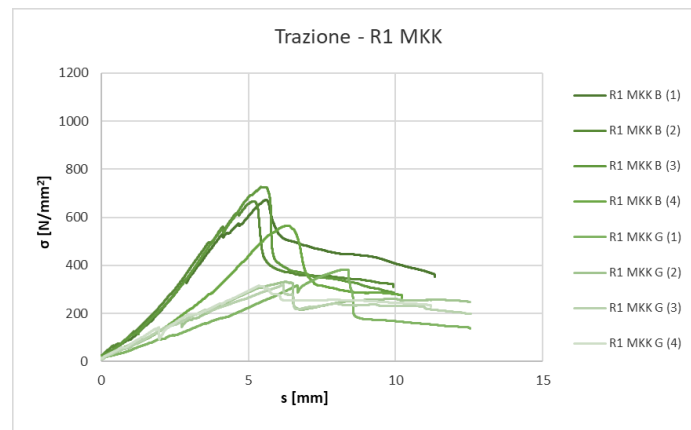


Fig. 80 - Diagramma tensione - spostamento a trazione

Provino n°		F_{max} [N]	σ_t (MPa)	σ_u (MPa)	s_t [mm]	s_u [mm]
R1 MKK B	1	1512,11	340,71	672,08	2,95	11,32
	2	1500,79	478,76	667,05	3,54	9,92
	3	1635,14	543,92	726,76	4,05	9,94
	4	1280,00	50,85	564,91	0,58	10,20
Media		1482,01	353,56	657,70	2,78	10,35
Dev. Standard		147,779	218,869	67,512	1,534	0,662
Dev. Standard [%]		9,971	61,904	10,265	55,180	6,403
R1 MKK G	1	1280,52	311,10	382,24	6,80	12,53
	2	1112,62	178,22	332,12	2,71	12,53
	3	1066,68	156,35	318,41	2,58	12,55
	4	1053,95	140,53	314,61	1,96	11,20
Media		1128,44	196,55	336,85	3,51	12,20
Dev. Standard		104,470	77,914	31,184	2,216	0,668
Dev. Standard [%]		9,258	39,641	9,258	63,088	5,478

Tab. 21 - Tabella dei risultati

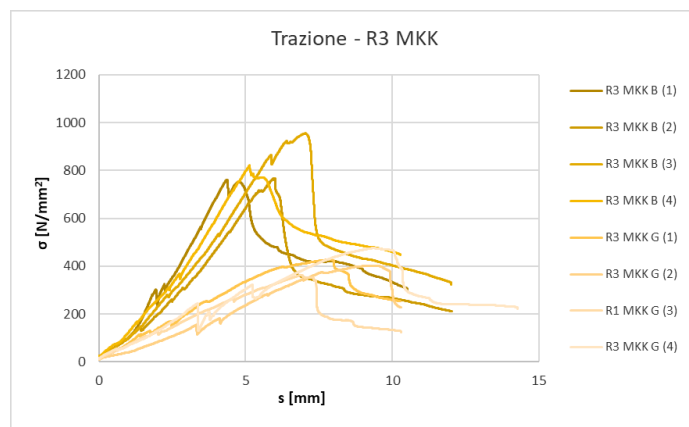


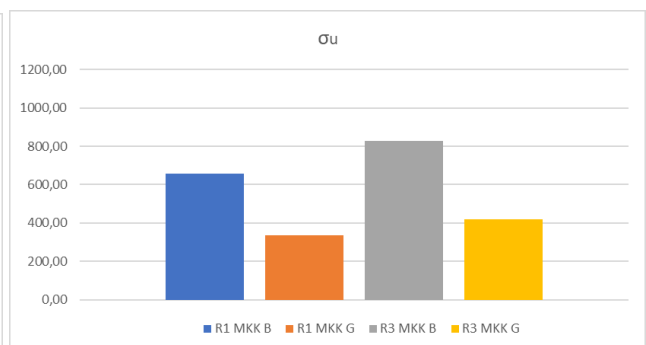
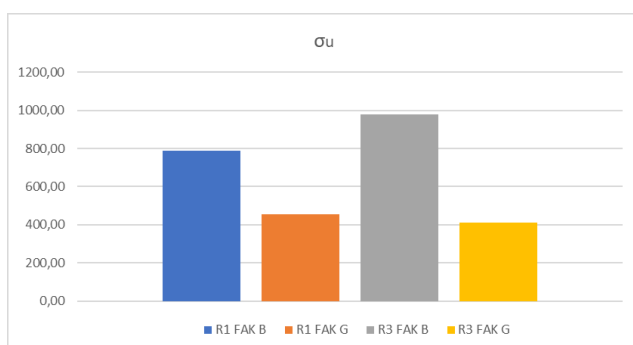
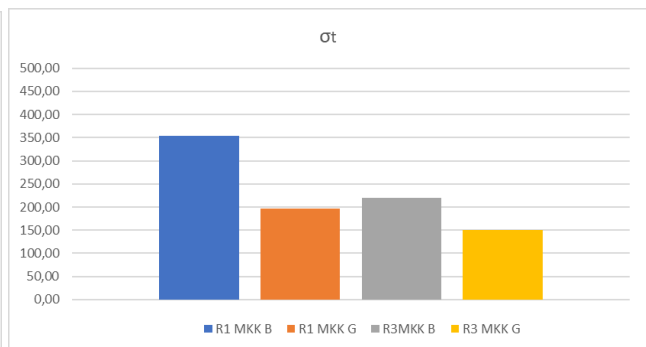
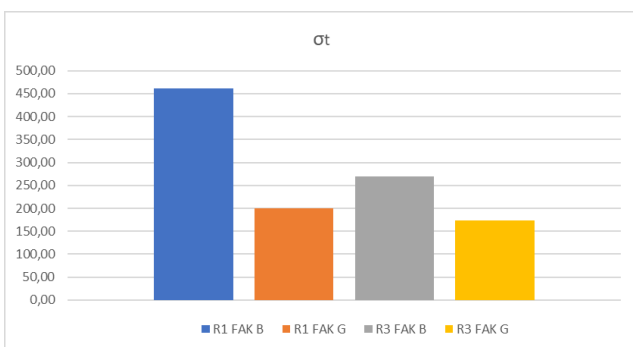
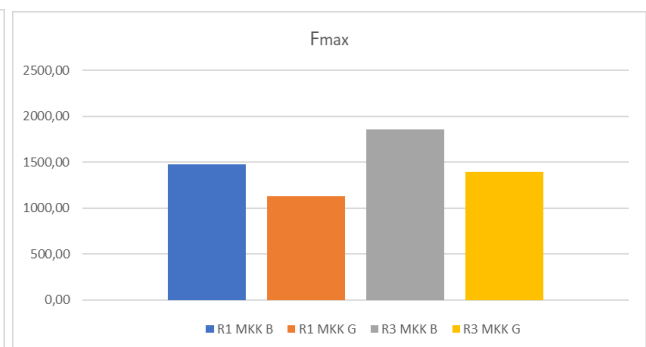
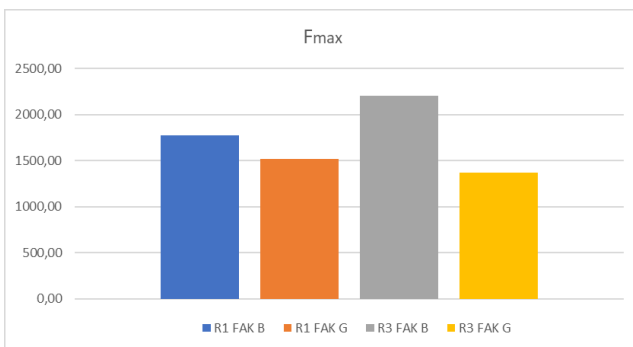
Fig. 81 - Diagramma tensione - spostamento a trazione

Provino n°		F_{max} [N]	σ_t (MPa)	σ_u (MPa)	s_t [mm]	s_u [mm]
R3 MKK B	1	1713,56	293,27	761,62	1,90	10,51
	2	1728,38	147,67	768,21	1,58	12,02
	3	2147,57	278,72	954,52	2,41	12,01
	4	1847,92	159,85	821,34	1,31	10,29
Media		1859,36	219,88	826,42	1,80	11,21
Dev. Standard		201,337	76,738	89,485	0,473	0,937
Dev. Standard [%]		10,828	34,900	10,828	26,266	8,358
R3 MKK G	1	1429,87	110,88	426,83	1,36	10,27
	2	1346,55	152,08	401,95	3,34	10,31
	3	1216,90	102,15	363,25	1,51	10,29
	4	1595,09	239,30	476,14	3,31	14,26
Media		1397,10	151,10	417,04	2,38	11,28
Dev. Standard		158,431	62,700	47,292	1,093	1,985
Dev. Standard [%]		11,340	41,495	11,340	45,923	17,594

Tab. 22 - Tabella dei risultati

Considerazioni:

Per quanto riguarda la forza di trazione rilevata e riportata nei successivi istogrammi si evince che quasi tutti i provini realizzati con cenere volante e cemento alluminoso (FAK) presentano valori maggiori rispetto ai provini realizzati con metacaolino (MKK), tranne per quelli di resistenza R3 con fibra di vetro G in cui i valori sono simili tra FAK e MKK. Stesso andamento viene riscontrato per le tensioni ultime (σ_u) in cui anche in questo caso i provini di resistenza R3 presentano risultati migliori rispetto a quelli di resistenza R1, con una maggiore qualità per i FAK con fibra di basalto. Discorso leggermente diverso per le tensioni di prima fessurazione (σ_t) in cui le fessure si riscontrano molto prima nei provini con fibra di vetro G, mentre quelli che presentano risultati migliori sono i provini con resistenza R1 e fibra di basalto. In generale possiamo affermare che per i valori di resistenza la fibra di basalto B è più performante rispetto alla fibra di vetro G, sia per FAK che per MKK. Per quanto riguarda gli spostamenti, quelli di prima fessurazione (s_t) sono maggiori per i provini FAK rispetto agli MKK (tranne per quelli di resistenza R1 con fibra di vetro G) con il valore massimo per il provino R1 FAK B e valore minimo per il provino R3 MKK B. Infine per gli spostamenti ultimi (s_u) la situazione è opposta, con i valori maggiori riscontrati nei provini MKK rispetto a quelli FAK (tranne per quelli di resistenza R1 con fibra di basalto B) con il valore massimo per il provino R1 MKK G e valore minimo per il provino R1 FAK G.



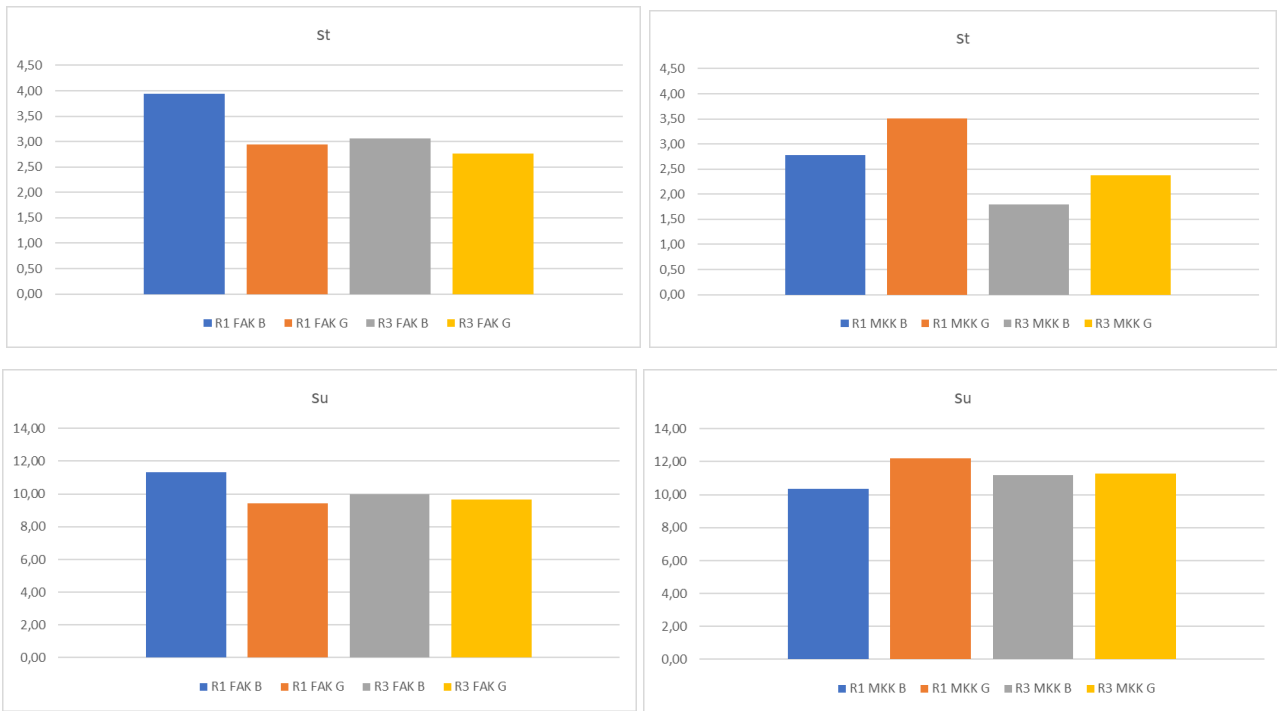


Fig. 82 - Istogramma di confronto tra i risultati delle prove di trazione

4.2. CONCLUSIONI

La riqualificazione statica ed energetica delle costruzioni esistenti è attualmente un tema cruciale, su cui si focalizza l'attenzione crescente di ricercatori, istituzioni e tecnici del settore. In letteratura sono numerosi gli studi mirati a definire nuove tipologie di materiali e tecniche di intervento per il rinforzo strutturale e l'isolamento termico. Tuttavia, risultano ancora limitate le ricerche inerenti all'interazione fra le soluzioni proposte e mirate al perseguimento contestuale di adeguati target energetici e meccanici.

Il presente studio ha riguardato solamente l'analisi del comportamento meccanico di sistemi di rinforzo FRCM in fibra di vetro e in fibra di basalto con matrici geopolimeriche diverse, che utilizzano cenere volante con il cemento alluminoso (FAK) o metacaolino (MKK) mixate con le soluzioni alcaline. Il comportamento meccanico dei materiali oggetto di studio è stato indagato mediante prove di flessione/compressione (con una maturazione sia a 7 che a 28 giorni per evidenziarne le eventuali differenze), di distacco dal supporto (pull-off) e di trazione. I dati ottenuti in laboratorio sono stati poi elaborati per determinare valori di resistenza, spostamento e deviazione standard con cui poi effettuare i vari confronti con le relative valutazioni delle caratteristiche dei materiali.

Dai risultati sperimentali ottenuti è emerso in generale una resistenza maggiore per le tipologie di provino FAK rispetto agli MKK, sia a flessione/compressione che a trazione, ma anche per quanto riguarda l'adesione al supporto del materiale. Questa caratteristica è stata osservata anche in fase di scasso del materiale, in cui anche al semplice tatto i provini MKK risultavano poco rigidi. Per quanto riguarda invece l'utilizzo delle fibre, i provini rinforzati con fibra di basalto B presentano una qualità migliore se messi a confronto con le altre fibre di vetro G. Le reti in fibra di vetro per rinforzo strutturale, insieme a malte speciali, intonaci e cappe armate, risultano in grado di conferire alla struttura migliore capacità (resistenza e duttilità). L'obiettivo è ottenere un efficace miglioramento statico e sismico dell'edificio. Le eccellenti caratteristiche meccaniche e prestazionali delle reti in fibra di vetro e la loro elevata resistenza agli agenti esterni consentono di ottenere un risultato ottimale nel miglioramento della resistenza della struttura agli stati di trazione indotti da azioni statiche e sismiche. Le reti in fibra di vetro preformate sono inoltre a bassissima conduttività termica, ad elevata resistenza alla corrosione, agli agenti atmosferici e ad elevata durabilità. Le reti inoltre sono leggere, di facile installazione e maneggevolezza, compatibili con il supporto murario in generale e con malte a base calce e cemento. La fibra di basalto invece è un materiale costituito da fibre estremamente fini di basalto e si differenzia dalla fibra di vetro avendo migliori proprietà fisico-meccaniche ed essendo significativamente più economico. Le fibre di basalto sono un'ottima alternativa alle fibre di vetro e aramide in quanto presentano anche una rigidità confrontabile e migliori proprietà di resistenza al fuoco e alla corrosione.

L'unica particolarità riscontrata nel presente studio risulta nei provini FAK tra la resistenza R1 e la resistenza R3, in cui i primi dimostrano caratteristiche migliori rispetto ai secondi, forse dovuto ad un errore nella preparazione del mix. I risultati ottenuti dalle prove meccaniche hanno evidenziato, in tutti i casi, un significativo incremento di capacità ultima, e un ulteriore miglioramento della duttilità nel caso dei sistemi innovativi. E' possibile inoltre affermare come queste tipologie di materiale innovativo sono compatibili sia con i sistemi costruttivi in muratura che in calcestruzzo, poiché presentano ottime caratteristiche di aderenza. Rispetto ai classici sistemi costruttivi di rinforzo strutturale questa tecnica risulta essere più complessa in fase di getto poiché il materiale si

presenta difficilmente lavorabile, considerazione basata sulle operazioni effettuate in laboratorio poiché test relativi alla lavorabilità non sono stati programmati.

Sarebbe molto interessante, in un futuro studio, effettuare delle prove termiche per evidenziare il comportamento energetico che tutti i sistemi FRCC, realizzati con la malta geopolimerica di nuova formulazione, presentano. Ciò avrebbe come finalità lo studio delle caratteristiche di isolamento termico, per dimostrare che siano più elevate rispetto a quelle rilevate per i sistemi tradizionali.

BIBLIOGRAFIA

- [1] RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages. www.rilem.net
- [2] M. Gordon, J. Bell, W.M. Kriven. "Geopolymers: Alkali Bonded Ceramics (ABCs) for high-tech applications". *Ceram. Trans.* (2006). Vol. 175: pp.215-24.
- [3] 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.
- [4] V.D. Glukhovskiy, G.S. Rostovskaja, G.V. Rumyna, "High Strength Slag-Alkaline cements". *Communications 7th International Congress on the Chemistry of Cement* (1980). Vol 3: p. 164.
- [5] J. Davidovits. "Geopolimer: inorganic polymeric new materials". *J. Thermal Analysis* (1991). Vol. 37: pp. 1633-56.
- [6] www.geopolymer.org
- [7] C. Shi, P.V. Krivenko, Della Roy, "Alkali-activated Cements and Concretes", Taylor & Francis e-Library, 2006.
- [8] P.G. Malone, C.J. Randall, T. Kirkpatrick. "Potential applications of alkali-activated aluminosilicate binders in military operations". GL-85-15, Geotechnical Laboratory Department of the Army, Washington D.C. USA, (1985).
- [9] P.V. Krivenko . "Alkali cements" *Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes*, Kiev, Ukraine, Curatore: P.V. Krivenko. (1994) pp. 11- 129.
- [10] J. Wastiels, X. Wu, S. Faignet, G. Patfoort, Mineral polymer based on fly ash, *Proceed. 9th Intl. Conf. Solid Waste Management*, Philadelphia, PA, USA, 1993, 8pp.
- [11] 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
- [12] BELLOMO M, D'AMBROSIO V. *Fibrorinforzati in architettura. Le tecnologie FRP e FRCM nel recupero delle strutture in c.a.* CLEAN EDIZIONI, 2009.
- [13] Strengthening of concrete structures with cement based bonded composites. Blanksvärd T, Täljsten B. 2008, *Journal of Nordic Concrete Research*, 38(2): 133- 153.
- [14] 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.
- [15] Textile reinforced concrete for strengthening in bending and shear. Brückner A, Ortlepp R, Curbach M. 2006, *Materials and Structures*, 39: 741-748.
- [16] 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.

- [17] Load-bearing behavior and simulation of textile reinforced concrete. Hegger J, Will N, Bruckermann O, Voss S. 2006, *Materials and Structures*, 39: 765-776.
- [18] 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.
- [19] 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
- [20] 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.
- [21] Mineral-Based bonding of Carbon FRP to strengthen concrete structures. Täljsten B, Blanksvärd T. 2007, *Journal of Composites for Construction*, 11(2): 120-128.
- [22] B.V. Rangan. "Engineering properties of geopolymer concrete" in *Geopolymer. Structure, processing properties and industrial applications*, curator J.L. Provis J.S.J. van Deventer, woodhead Publishing in Materials, Cambridge UK (2008). Pp.211-226.
- [23] P. Sarker. "Bond strengths of geopolymer and cements concretes". *Advantages in Science and Technology* (2010). 69: pp. 143-151.
- [24] R.E. Lyon, U. Sorathia, P.N. Balaguru, A. Foden, J. Davidovits, M. Davidovics. "Fire response of geopolymer structural composites". *Proceeding of the First International Conference on Fiber Composites in Infrastructure (ICCT'96)*, Tucson, Arizona, pp. 972- 981.
- [25] A. Fernandez-Jimenez, I. Garcia-Lodeiro, A. Palomo. "Durability of alkali-activated fly ash cementitious materials". *J. Materials Science* (2007). 42: pp. 3055-3065.
- [26] J.M. Miranda, A. Fernandez-Jimenez, J.A. Gonzalez, A. Palomo. "Corrosion resistance in activated fly ash mortars". *Cement and Concrete Research* (2005). 35: pp. 1210- 1217.
- [27] <http://www.banahuk.co.uk/>
- [28] Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Interventi di Consolidamento Statico mediante l'utilizzo di Compositi Fibrorinforzati a matrice inorganica. Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR-DT 215/2018), Roma 23 Ottobre 2018.
- [29] H. Xu, J.S.J. Van Deventer. "Geopolimerisation of multiple minerals", *Miner Eng*(2002). Vol.15: pp. 1131-39.
- [30] V. Medri, S. Fabbri, J. Dedeczek, Z. Sobalik, Z. Tvaruzkova, A. Vaccari. "Role of the morphology and the dehydroxylation of metakaolins on geopolymerization". *Appl. Clay Sci.* (2010). Vol. 50: pp. 538-45.
- [31] D. Bondar, C.J. Lynsdale, N.B. Milestone, N. Hassani, A.A. Ramezani-pour. "Engineering properties of alkali activated natural pozzolan Concrete". *Proceedings of the Second International*

Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies. Curatori: J. Zachar, P. Claisse, (2010), Ancona, Italy.

[32] A. Allahverdi, K. Mehrpour, E. Najafi Kani. "Taftan pozzolan-based geopolymer cement". IUST International Journal of Engineering Science (2008). Vol. 19[3]: pp.1-5. 38

[33] E. Kamseu, C. Leonelli, D. Perera, U.C. Melo, P.N. Lemoungna. "Investigation of volcanic ash based geopolymers as potential building materials". Interceram (2009). Vol.58[2-3]: pp. 136-40.

[34] R.A. Fletcher, K.J.D. MacKenzie, C.L. Nicholson, S. Shimada. "The composition range of aluminosilicate geopolymers". J. Eur. Ceram. Soc. (2005). Vol. 25: pp. 1471-77.

[35] D. Khale, R. Chaudhary. "Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review". J. Mater. Sci. (2007). Vol. 42[9]: pp. 729-46.

[36] D. Khale, R. Chaudhary. "Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review". J. Mater. Sci. (2007). Vol. 42[9]: pp. 729-46.

[37] www.cees-silicates.eu

[38] CNR-DT 200, 2004 "Istruzioni per la progettazione, l'esecuzione ed il controllo di interventi di consolidamento statico mediante l'utilizzo di compositi fibrorinforzati".

[39] Fletche, McKenzie, Nicholson, Shimada. "The composition range of aluminosilicate geopolymers" J. Eur. Ceram. Soc. 25. pp. 1471-1477 (2005)

[40] C. Panagiotopoulou, E. Kontori, T. Perraki, G. Kakali. Dissolution of aluminosilicate minerals and by-products in alkaline media J. Mater. Sci. 42. pp. 2967-2973 (2007)

[41] Geopolymerisation of multiple minerals Miner Eng. 15. pp. 1131-1139 (2002)

[42] Kakali G. Perraki T. Tsvilis S. Badogiannis E. "Thermal treatment of kaolin: the effect of mineralogy on the pozzolanic activity". Applied Clay Science. 20. Fasc. 1-2. pp. 73-80 (2001).

[43] Fernandez R. Martirena F. Scrivener K.L. "The origin of the pozzolanic activity of clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite".Cement and Concrete Research. 41. Fasc. 1. pp. 113-122 (2011).

[44] Gamelas J. Ferraz E. Rocha F. "An insight into the surface properties of calcined kaolinitic clays: the grinding effect". Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 455. pp. 49-57(2014)

[45] J. Davidovits. Geopolymers Chemistry and applications tute, St. Quentin, France (2008)

[46] V. Medri S. Fabbri J. Dedecek Z. Sobalik Z. Tvaruzkova A. Vaccari. Role of the morphology and dehydroxylation of metakaolins on geopolymerization App. Clay. Sci. 50. pp. 538-545 (2010)

[47] Snellings R. Mertens G. Elsen J. "Supplementary cementitious materials". Recensioni di Mineralogia e Geochimica. 74. pp. 211-278 (2012).

[48] J. Sanz, A. Madani, J.M. Serratosa, J.S. Moya, S. Aza. Aluminium and silicon magic-angle spinning nuclear magnetic resonance study of kaolinite-mullite transformation 71. pp. C418-C421 (1988).

- [49] Snellings R. Mertens G. Elsen J. "Supplementary cementitious materials". *Recensioni di Mineralogia e Geochimica*. 74. pp. 211-278 (2012).
- [50] Davidovitz, *Geopolymers Chemistry and applications*. Geopolymer institute, St. Quentin, France (2008)
- [51] Hennis K. W. Frishette C. W. "A New Era in Control Density Fill". *Proceedings of the Tenth International Ash Utilization Symposium* (1993).
- [52] Duxson P. Provis J.L. Lukey G.C. van Deventer J.S.J. "The role of inorganic polymer technology in the development of 'Green concrete'". *Cement and Concrete Research*. 37. Fasc. 12 pp. 1590-1597 (2007)
- [53] Jimenez, A. Palomo. Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel*. 82. Fasc. 18 pp. 2259-2265 (2003).
- [54] Hewlett P.C. Leas's chemistry of cement and concrete. Capitolo XIII.(1998)
- [55] Taylor H.F.W. , *Cement chemistry*, Stampa accademica (1990)
- [56] Paragrafo 11.2.9.1 NTC 2008
- [57] Roy, P.J., Schilling, Eatom, Alkali activated class C fly ash cement
- [58] 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)
- [59] The geopolymerization of alumino-silicate minerals . *J. Mineral Process*. 59. pp. 247-266 (2000)
- [60] Composite cold ceramic geopolymer in a refractory application *Ceramic Transactions*. 153. pp. 211-225 (2003)
- [61] L. Bell, Formation of ceramics from metakaolin-based geopolymers. Part II: Kbased geopolymer *Am. Ceram. Soc.* 92. Fasc. 1 pp. 1-8 (2009)

RINGRAZIAMENTI

Il mio primo ringraziamento va alle persone con cui ho condiviso questo progetto, i quali mi hanno dato l'opportunità di approfondire tematiche sull'utilizzo di materiali innovativi, molto interessanti ed attuali nel campo dell'Ingegneria Edile. Li ringrazio anche per avermi seguito nell'elaborazione dei dati sperimentali, per la loro disponibilità ed il loro aiuto.

Altro ringraziamento va a tutte le persone appassionate che ho conosciuto in questi anni, con cui ho condiviso la maggior parte del tempo e che mi hanno accompagnato, giorno dopo giorno, nella realizzazione dei miei obiettivi.

Ringrazio la mia famiglia che mi ha dato la possibilità di intraprendere questo percorso e che mi ha sempre sostenuto in ogni modo, soprattutto nei momenti più difficili quando la determinazione veniva meno e mi ha rimesso in carreggiata.

Ringrazio anche me stesso per non aver mai mollato di fronte ai mille ostacoli che un percorso del genere comporta.

Infine, ma non per ultimo, ringrazio tutte le persone che anche con un piccolo gesto, a volte anche banale, hanno dimostrato di credere in me.