



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea magistrale in Ingegneria Edile

Utilizzo di sottoprodotti industriali come precursori alternativi per malte ad attivazione alcalina

Use of industrial by-products as alternative precursor for alkali-activated mortars

Tesi di Laurea di:

Dalila Del Moro

Relatore:

Prof. **Jacopo Donnini**

Correlatrici:

Ing. **Alessandra Mobili**

Prof.ssa **Valeria Corinaldesi**

A.A. **2022/2023**

Indice

1. INTRODUZIONE.....	1
2. STATO DELL'ARTE DEGLI ALCALI-ATTIVATI	3
2.1. Generalità degli alcali-attivati	3
2.2. I precursori alcalini.....	6
2.2.1. Loppa d'alto forno	7
2.2.2. Scarti di miniera (mine tailings).....	8
2.2.3. Cenere di biomassa	9
2.2.4. Cenere di rifiuti urbani	11
2.3. L'attivatore alcalino	12
2.4. Processo di geopolimerizzazione	14
3. MATERIALI E PREPARAZIONE	15
3.1. Caratterizzazione delle materie prime	15
3.1.1. Preparazione delle polveri.....	16
3.1.2. Diffrattometria a raggi X.....	26
3.1.3. Microscopio elettronico a scansione (SEM)	29
3.1.4. Prova di reattività in ambiente alcalino	38
3.1.5. Calcolo della densità.....	42
3.1.6. Calcolo del pH.....	46
3.2. Le fasi del mix design	49
3.2.1. Paste di prova	50
3.2.2. Mix design.....	54
3.3. Preparazione dei provini	56
3.3.1. Casseri.....	57
3.3.2. Impasti	58
3.3.3. Prova di spandimento troncoconico	62
3.3.4. Getto e scasseratura.....	65

4. PROVE SULLE MALTE INDURITE	69
4.1. Prova di flessione	69
4.2. Prova di compressione	71
4.3. Indagini ultrasoniche.....	72
4.4. Test delle efflorescenze	75
5. RISULTATI ED OSSERVAZIONI	77
5.1. Consistenza della malta fresca	77
5.2. Resistenza a flessione	82
5.3. Resistenza a compressione	92
5.4. Modulo elastico dinamico.....	103
5.5. Efflorescenze.....	108
6. CONCLUSIONI	110
7. Ringraziamenti.....	113
8. Indice delle figure	114
9. Indice delle tabelle.....	118
10. Bibliografia	120

1. INTRODUZIONE

Nel panorama attuale dell'Ingegneria e dell'Architettura, la ricerca di soluzioni costruttive sostenibili ed a basso impatto ambientale rappresenta una sfida cruciale. In questo contesto, la ricerca si sta spingendo verso nuovi orizzonti anche con l'impiego di materiali da costruzione alternativi.

Ad oggi, il materiale più utilizzato nel settore dell'edilizia è il cemento, che però è considerato un "incubo climatico" in quanto responsabile di circa l'8% delle emissioni globali di gas serra [1]. L'uso massiccio di cemento nell'industria edile è da tempo sotto la lente critica a causa del suo significativo impatto ambientale, dovuto all'estrazione intensiva di risorse naturali ed alle emissioni di anidride carbonica. La sostituzione del cemento tradizionale con materiali a minor impatto ambientale si configura come materia di studio di crescente interesse e la presente tesi si propone di raggiungere questo scopo esplorando le potenzialità dei materiali attivati alcalinamente.

La ricerca in oggetto rappresenta un'iniziativa del Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU) dell'Università Politecnica delle Marche in collaborazione con l'impresa spagnola leader nel mondo delle costruzioni Sorigué. È inserita nel quadro più ampio del progetto 'RECONSTRUCT - A Territorial Construction System for a Circular Low-Carbon Built Environment' co-finanziato dalla Comunità Europea nell'ambito del programma quadro Horizon 2020 con Grant Agreement n. 101082265, un progetto che ha l'ambizione di promuovere la diffusione e l'adozione di materiali sostenibili nel settore edilizio. Il progetto è orientato ad affrontare le sfide attuali, ponendo un'enfasi considerevole sulla prevenzione dei rifiuti, l'estensione della vita utile degli edifici ed il miglioramento delle prestazioni del ciclo di vita degli edifici e dei loro componenti, con particolare attenzione alle emissioni di gas serra.

I materiali attivati alcalinamente, dunque, si pongono come opzione promettente, in quanto offrono non solo una valida alternativa al cemento, ma anche la possibilità di riutilizzare materiali di scarto contribuendo così alla gestione sostenibile delle risorse. La presente tesi si colloca in questo contesto ambizioso, con l'obiettivo di fornire un

contributo considerevole atto a rispondere a tali sfide e concorrere agli obiettivi del progetto 'RECONSTRUCT'.

Verranno studiati e caratterizzati i seguenti materiali forniti dall'azienda Sorigué: sabbia di scarto di miniera (MS), cenere di rifiuti solidi urbani (MSWI) e cenere di gusci di mandorle (ABA). Lo scopo è quello di utilizzarli come precursori alcalini in completa sostituzione del cemento, combinandoli in diverse percentuali con la loppa d'alto forno (GGBFS).

La sabbia di scarto di miniera (MS) è un materiale abbondante, spesso trascurato e relegato a discariche, mentre la cenere di biomassa (ABA) e di rifiuti urbani (MSWI) sono sottoprodotti dell'industria energetica, anch'essi destinati allo smaltimento. L'utilizzo di questi tre materiali attraverso la tecnologia degli alcali attivati non solo crea una soluzione innovativa, ma contribuisce anche a ridurre il volume complessivo di rifiuti ed a promuovere la circolarità nell'ambito edilizio.

L'attivazione dei materiali verrà eseguita utilizzando la soda caustica (NaOH) con due diverse molarità, 4M e 8M. La scelta di testare gli impasti con due diverse concentrazioni di soda nasce dalla necessità di valutare come le variazioni nella formulazione chimica possano influire sulle proprietà meccaniche e fisiche dei materiali risultanti.

Verranno effettuate delle prove di caratterizzazione sui materiali ed in seguito verranno realizzati dei provini in modo da poter testare le prestazioni meccaniche delle malte ottenute, sottoponendole ad una serie di prove standardizzate.

Le differenze osservate, sia tra le diverse combinazioni dei materiali utilizzati, sia tra le due molarità scelte per l'attivazione, saranno esaminate con attenzione al fine di identificare vantaggi e limitazioni di ciascuna formulazione.

In sintesi, questa tesi si propone di contribuire al dibattito scientifico e tecnologico sull'uso degli alcali attivati come sostituti del cemento, focalizzandosi su un approccio innovativo che integra materiali di scarto per promuovere la sostenibilità ambientale.

2. STATO DELL'ARTE DEGLI ALCALI-ATTIVATI

2.1. Generalità degli alcali-attivati

Le attuali ricerche nel campo dei materiali da costruzione hanno portato alla crescente attenzione sui materiali attivati alcalinamente, definiti anche cementi ad attivazione alcalina. Questi materiali rappresentano una categoria innovativa di leganti che differiscono notevolmente dal tradizionale cemento Portland, infatti, la loro produzione è associata a diversi vantaggi sia dal punto di vista ambientale che da quello delle prestazioni tecniche.

La quantità annuale di emissioni globali di CO₂ rilasciate in ambiente da parte dell'industria del cemento ha raggiunto il 5%-7% [2] e circa 1800 MJ di energia richiesta per tonnellata di clinker nel processo di produzione [3]. Rispetto al cemento, i materiali attivati alcalinamente hanno un'impronta di carbonio inferiore del 60%-80% [2] (Figura 1).

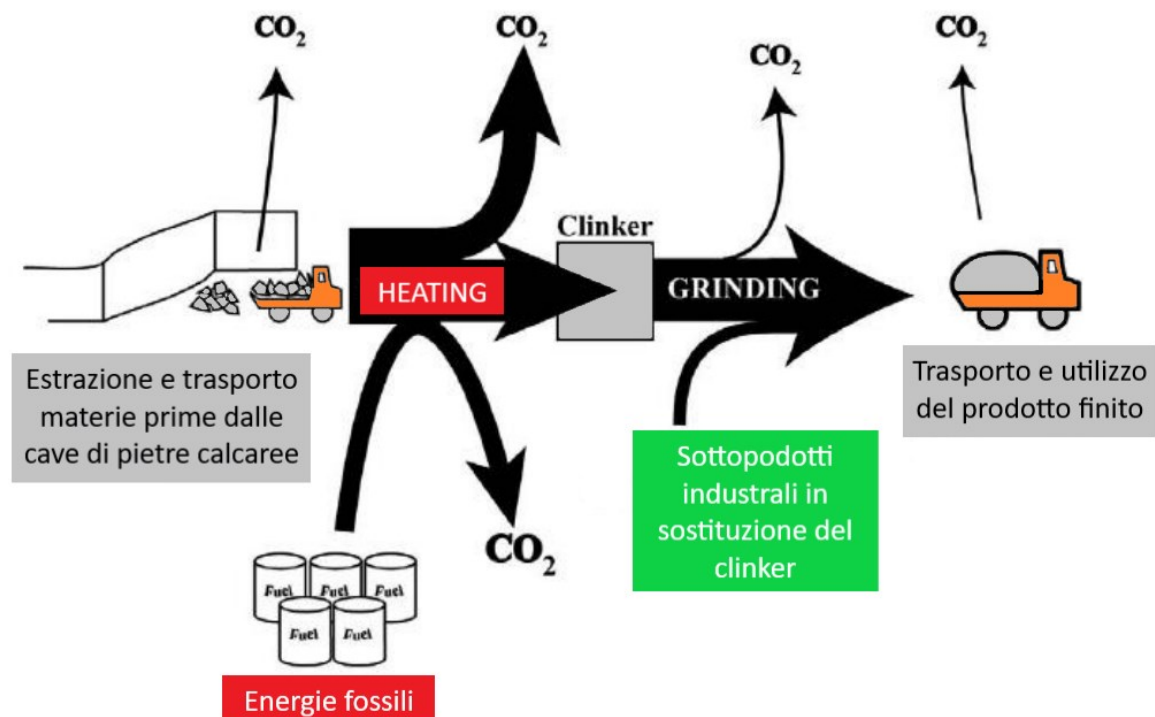


Figura 1: Schema semplificato delle emissioni di CO₂ prodotte durante processo di produzione del cemento, confrontate con quelle di sottoprodotti industriali che potrebbero sostituirlo. Lo spessore delle frecce è proporzionale alla quantità di materiale.

Il cemento Portland è un legante idraulico e la sua produzione parte dal clinker, che è il materiale ottenuto per calcinazione di calcare e alluminosilicati. Le materie prime utilizzate sono molto comuni ed economiche; vengono utilizzati calcari o marne per la componente calcica del sistema e argille, scisti o bauxiti per il contenuto in alluminio, ferro e silicio. La produzione del clinker avviene all'interno di un forno rotante, in cui vengono inserite le materie prime precedentemente macinate, essiccate e omogeneizzate. Il bruciatore di testata del forno sviluppa una fiamma avente temperatura di circa 2000 °C che porta il materiale a 1450 °C, temperatura alla quale si completano le reazioni di clinkerizzazione [1]. Questa fase del processo di cottura del clinker è la fase più dispendiosa dal punto di vista energetico.

I materiali attivati alcalinamente sono dei composti inorganici che si formano attraverso l'attivazione di precursori alluminosilicatici con soluzioni basiche. Sono materiali noti per la loro capacità di indurire a temperatura ambiente, eliminando la necessità di stagionature termiche ad alta temperatura, riducendo di conseguenza il contributo all'emissione globale di CO₂ dell'industria del cemento [2].

Gli alcali-attivati vengono realizzati grazie alla reazione chimica tra due elementi fondamentali:

- il precursore, ovvero la polvere allumino-silicatica reattiva che viene caratterizzata in base alle sue caratteristiche morfologiche, chimico-composizionali e di reattività;
- la soluzione attivante, che può essere di idrossidi e/o silicati alcalini, con pH e concentrazione accuratamente controllati in funzione del caso specifico.

La geopolimerizzazione, ovvero la reazione alcalina tra precursori ed elementi attivanti, può produrre materiali con caratteristiche simili o addirittura superiori rispetto a quelli ottenuti con cementi tradizionali, che possono essere ottenute mediante un processo chimico rispettoso dell'ambiente.

La definizione e classificazione degli alcali-attivati sono argomenti ancor'oggi molto discussi e dibattuti, ma possono essere definiti come leganti idraulici prodotti a partire da

precursori alcalini, cioè polveri inorganiche principalmente allumino-silicatiche, disciolte in un ambiente fortemente basico creato grazie all'attivatore [4] (Figura 2).



Figura 2: Schema di formazione degli alcali-attivati.

La proposta di classificazione più comunemente utilizzata per i materiali attivati alcalinamente indicata in (Figura 3), prende in considerazione il contenuto di calcio e alluminio [5].

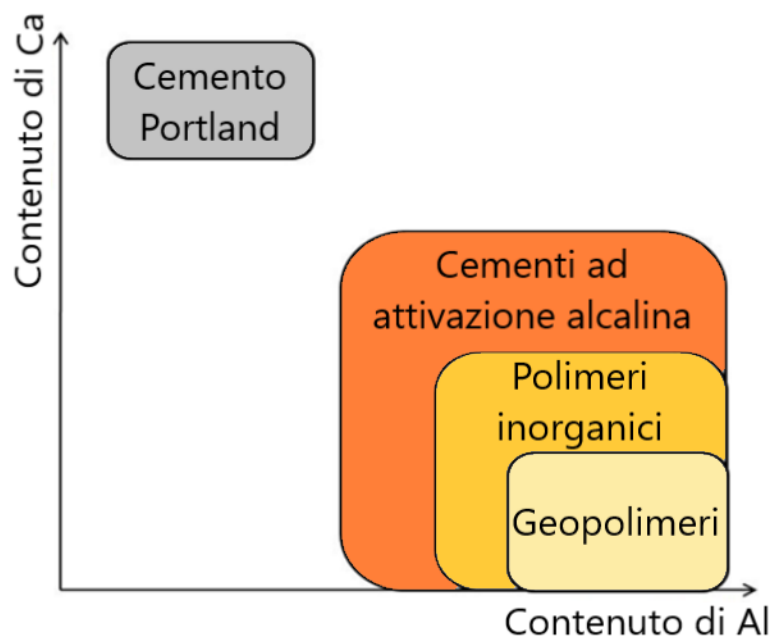


Figura 3: Proposta di classificazione di "materiali attivati con alcali" confrontati con il cemento Portland, secondo J.S.J. Van Deventer e J.L. Provis [3].

I “cementi ad attivazione alcalina” sono la grande famiglia di leganti inorganici derivanti dalla reazione tra un sale di un metallo alcalino con una polvere di silicati.

I polimeri inorganici si differenziano dai precedenti per un maggior contenuto di alluminio e sodio, 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 [5].

2.2. I precursori alcalini

I cementi ad attivazione alcalina più performanti ed ampiamente studiati sono quelli ottenuti utilizzando come precursori alcalini la loppa di alto forno (slag) e le ceneri provenienti dalle centrali a carbone (fly-ash) [6, 7]. La disponibilità di questi sottoprodotti non è sempre costante e uguale in tutto il pianeta, infatti, è fortemente correlata alle attività industriali presenti nell'area geografica di produzione. Soprattutto l'approvvigionamento della loppa d'altoforno rappresenta una sfida significativa in alcuni Paesi che non producono ghisa perché la sua reperibilità è spesso limitata e questo comporta alti costi di trasporto. Considerando che il trasporto di materiali contribuisce alle emissioni di CO₂, l'impiego di loppa d'altoforno diventerebbe non solo economicamente oneroso, ma anche ambientalmente impattante.

Una soluzione promettente al problema risiede nell'esplorare precursori alternativi derivanti dalle scorie di industrie locali. La ricerca continua, volta a identificare nuovi papabili precursori alcalini, è fondamentale per ottimizzare ulteriormente la produzione dei cementi sostenibili.

La diversificazione dei precursori alcalini contribuisce anche alla riduzione della dipendenza da un preciso mercato, poiché il possibile utilizzo di una vasta gamma di materiali apre la possibilità di sfruttare gli scarti in base alla disponibilità di ogni paese o regione. L'adozione di precursori alcalini provenienti dagli scarti di produzione di industrie locali può essere descritta come un approccio "a km 0" nella produzione di cementi ad attivazione alcalina.

Questo non solo riduce l'impatto ambientale legato al trasporto ma anche promuove una maggiore coerenza con i principi della sostenibilità e dell'economia locale.

I cementi ad attivazione alcalina possono essere ottenuti da una vasta gamma di materiali di partenza, infatti, si può utilizzare una grande varietà di scorie come precursori alcalini. Affinché un materiale possa essere attivato, deve essere costituito principalmente da allumina (triossido di alluminio Al_2O_3), silice (biossido di silicio, SiO_2) e ossido di calcio (CaO) perché queste molecole sono fortemente reattive in presenza degli alti pH [8], che verranno poi raggiunti grazie all'attivatore.

Ad oggi si studiano i risultati ottenuti dall'uso di argille, tailings (residui solidi di minerali dopo il processo di estrazione mineraria), ceneri di biomassa, etc. perché da letteratura è noto che posseggano i requisiti per candidarsi a precursori.

Nei sottocapitoli successivi viene proposto un breve excursus dello stato dell'arte di ciascuna tipologia di precursore che verrà studiato nella presente ricerca.

2.2.1. Loppa d'alto forno

La loppa d'altoforno è un sottoprodotto di scarto derivante dal ciclo produttivo della ghisa (Figura 4). È uno dei precursori più utilizzati nell'attivazione alcalina e soddisfa il modello proposto per i precursori alcalini, ovvero materiali ricchi di ossido di calcio (CaO), biossido di silicio (SiO_2), ossido di magnesio (MgO) e triossido di alluminio (Al_2O_3) [9, 10].

La reattività della loppa d'altoforno dipende fortemente dalla quantità di fase vetrosa, dalla finezza delle polveri e dalla distribuzione granulometrica [11]. Uno dei vantaggi più rilevanti è che per far sì che l'attivazione avvenga con successo, non è necessario utilizzare soluzioni alcaline molto concentrate.

La loppa d'altoforno, come detto in precedenza, rappresenta attualmente un notevole esempio di come un sottoprodotto possa essere efficacemente trasformato in una materia prima di valore. Il suo utilizzo in combinazione al cemento Portland è ormai consolidato, e la *norma UNI EN 15167-1:2006 "Loppa granulata d'altoforno macinata per calcestruzzo, malta e malta per iniezione"* lo conferma.

Nel contesto dei materiali attivati alcalinamente, l'impiego e la ricerca sulla loppa d'altoforno sono relativamente recenti. Nonostante questo, grazie alle ottime prestazioni ottenute utilizzandola come precursore, ha avuto origine la classe di alcali-attivati denominata "alkali-activated slag cements" [12].



Figura 4: Loppa d'altoforno (GGBFS).

2.2.2. Scarti di miniera (mine tailings)

Le mine tailings sono materiali di scarto, un rifiuto, appunto, che rimane dopo l'estrazione dei minerali di miniera (Figura 5). Questi scarti di miniera vengono raccolti nelle discariche apposite, ma la sfida allo smaltimento sostenibile di questi rifiuti sta diventando sempre più critica a causa delle sue potenziali conseguenze ambientali [13, 14, 15, 16, 17, 18]. Ciò è dovuto sia all'aumento dei volumi di produzione delle industrie metallurgiche e minerarie, sia all'assenza di metodi adeguati allo smaltimento di questo tipo di rifiuti, anche a causa della crescente rigidità delle normative ecologiche.

La composizione chimica delle mine tailings è caratterizzata dalla presenza in maggior quantità di ossidi di silicio, alluminio e calcio, con un contenuto che varia dal 60% al 90% [19]. Si può affermare che i residui abbiano il potenziale per servire come precursori di materiali attivati con alcali [20].

Gli scarti di cava possono essere di svariati tipi, ed ognuno ha composizione e caratteristiche proprie che vanno indagate. Alcuni di questi sono composti da quantità

relativamente basse di componenti utili ad utilizzarli come precursori, ed altri possono contenere sostanze pericolose e tossiche che sono associate ai prodotti di scarto o alla lavorazione mineraria [19, 21, 22, 23, 24].

Tutti questi fattori rendono più difficile gestire direttamente le mine tailings con lo scopo di ottenere materiali attivati alcalinamente che soddisfino criteri di sicurezza ecologica e che allo stesso tempo conseguano le caratteristiche funzionali necessarie [20].

L'impiego delle mine tailings come precursori può rallentare l'accumulo di scarti di miniera e abbassare il livello di contaminazione ecologica dovuta allo stoccaggio degli stessi. I precedenti vantaggi saranno combinati alla riduzione di rilascio di anidride carbonica in ambiente, di conseguenza è di fondamentale importanza risolvere i problemi associati all'utilizzo di questi aspiranti precursori.



Figura 5: Sabbia di scarto di miniera (MS).

2.2.3. Cenere di biomassa

La biomassa è una qualsiasi sostanza organica, prodotta grazie a un ciclo vitale [25]. Viene spesso utilizzata come combustibile poiché ha un alto rendimento energetico, infatti, è generalmente in grado di eguagliare la resa dei combustibili fossili. Inoltre, la biomassa è meno costosa del gas naturale o del carburante e può persino avere un costo zero se l'energia è richiesta nella stessa fabbrica che produce i rifiuti da biomassa.

La composizione delle ceneri di biomassa (Figura 6) varia in base alla tipologia della biomassa bruciata e alla temperatura di combustione. I maggiori elementi presenti nelle ceneri sono: calcio (Ca), potassio (K), magnesio (Mg), silicio (Si), alluminio (Al), ferro (Fe) e fosforo (P). Gli elementi che la compongono permettono di affermare che il loro utilizzo come precursore alcalino si prospetta interessante e in letteratura ne troviamo la conferma [26]. Pertanto, valutando caso per caso il loro potenziale di reattività, le ceneri di biomassa possono essere utilizzate come materie prime primarie per realizzare materiali attivati alcalinamente con basso impatto ambientale, buone proprietà strutturali e un basso costo di elaborazione [27].

Negli ultimi anni, è stato studiato l'uso di ceneri di biomassa non solo come precursore, ma anche come attivatore alternativo grazie all'elevato contenuto di potassio (K) e di biossido di silicio (SiO_2) [28, 29]. Questi sistemi alternativi hanno dimostrato la riduzione dell'impronta di carbonio fino al 50% rispetto ai convenzionali con reagenti commerciali [30].



Figura 6: Cenere di gusci di mandorle (ABA).

2.2.4. Cenere di rifiuti urbani

Le attività di produzione e consumo degli esseri umani, specialmente negli ultimi anni, hanno dato origine ad un'enorme quantità di rifiuti solidi. Nel 2018, le 200 città cinesi di grandi e medie dimensioni hanno generato 21,15 milioni di tonnellate rifiuti solidi urbani [31]. Lo scarico e lo smaltimento di questi rifiuti hanno comportato grandi perdite economiche e ambientali. La gestione dei rifiuti solidi non si limita a occupare aree di terreno prezioso, ma può inquinare anche l'acqua, il suolo e l'atmosfera, innescando seri problemi ambientali durante il processo di accumulo [11].

Le ceneri pesanti di rifiuti urbani (Figura 7) sono composte principalmente da silice amorfa (solitamente più del 50%), allumina, ossido di ferro e ossido di calcio e ciò presuppone un buon comportamento pozzolanico o idraulico [32]. Come spiegato in precedenza, i materiali ricchi di silicio-alluminio hanno il potenziale per preparare alcali-attivati [33].

In relazione all'utilizzo di cenere di rifiuti urbani però, in letteratura vengono segnalate reazioni espansive spesso legate alla presenza di alluminio metallico o composti di alluminio [34, 35, 36, 37, 38], anche se sono stati proposti alcuni trattamenti per ridurre i fenomeni espansivi [34, 35].



Figura 7: Cenere di rifiuti solidi urbani (MSWI).

La ricerca sull'utilizzo di questi materiali come precursori alcalini è in continua evoluzione ed è di fondamentale importanza per attenuare l'accumulo di rifiuti solidi urbani e favorire l'economia circolare, alleggerendo l'impatto ambientale dovuto smaltimento degli stessi.

2.3. L'attivatore alcalino

Per far sì che avvenga l'attivazione della silice e dell'allumina presenti nella polvere reattiva, è fondamentale utilizzare delle soluzioni alcaline altamente basiche. I più comuni attivatori utilizzati sono: idrossido di sodio (NaOH), idrossido di potassio (KOH), silicato di sodio e silicato di potassio [39].

L'NaOH (Figura 8), commercialmente noto come soda caustica, è l'idrossido alcalino più comunemente utilizzato per l'attivazione delle polveri alluminosilicatiche perché è il più economico ed è facilmente reperibile sul mercato.



Figura 8: Soda caustica in scaglie (NaOH).

La soda caustica è una base forte e tra gli attivatori menzionati in precedenza è quello che permette di ottenere i materiali attivati con pH più alti. È l'attivatore che accelera e rende più semplice la dissoluzione delle componenti nel precursore, però il suo utilizzo comporta l'aumento della porosità dei composti e di conseguenza la riduzione della resistenza meccanica del prodotto attivato [40].

La resa del materiale non dipende solamente dal tipo di attivatore usato, ma anche dalla molarità della soluzione. In chimica, la molarità è la concentrazione di una soluzione espressa dal numero di moli di soluto contenute in un litro di soluzione, riferita ad un chilogrammo di solvente [25].

Negli alcali-attivati, l'alcalinità del sistema ha un forte impatto sul grado di reazione. È stato dimostrato che l'aumento della molarità della soluzione alcalina aiuta ad aumentare il tasso di dissoluzione e la quantità di fasi di alluminio e silicio disciolte nella materia prima [41]. Ciò implica un aumento della velocità della reazione di polimerizzazione e un miglioramento delle proprietà meccaniche [42, 43].

Inoltre, nei materiali attivati con una concentrazione troppo alta di soluzione di idrossido di sodio è stato riscontrato il fenomeno delle efflorescenze, questo perché l'eccesso di alcali reagisce con la CO₂ atmosferica. Secondo alcuni autori, oltre al problema estetico, l'efflorescenza può anche essere correlata a problemi di durabilità, poiché un alto livello di lisciviazione ionica dal materiale indurito può portare a danni progressivi alla matrice del composito e quindi a un deterioramento delle proprietà meccaniche [44, 45, 46].

Le strategie proposte per il controllo delle efflorescenze negli alcali-attivati si incentrano sulla promozione di una reazione di geopolimerizzazione bilanciata, in modo da garantire rapporti chimici e fisici appropriati per ogni casistica [47], o sottoponendoli a cure con temperatura e umidità relativa maggiori elevate [48, 49].

Uno dei problemi maggiori dell'idrossido di sodio è legato alla sostenibilità del suo ciclo produttivo. La soda caustica, infatti, viene prodotta tramite il processo cloro-soda, nel quale dal cloruro di sodio in soluzione si ottiene per idrolisi NaOH, Cl₂ e H₂. Questo processo ha un forte impatto ambientale e un elevato costo energetico [50] ed è infatti il punto

debole della sostenibilità degli alcali-attivati. Pertanto, per ridurre le emissioni di CO₂ è utile ridurre la quantità di attivatore o cercarne di alternativi. Recentemente sono stati studiati mezzi differenti per produrre soluzioni alcaline, così da sostituire completamente queste sostanze chimiche con fonti di alcali naturali [51, 52].

2.4. Processo di geopolimerizzazione

La reazione necessaria per ottenere materiali attivati alcalinamente è la polimerizzazione di condensazione, detta anche “geopolimerizzazione” o geosintesi. La trasformazione chimica che si sviluppa tra una polvere ricca di silice reattiva, allumina e calcio (precursore) ed una soluzione acquosa di metalli alcalini (soluzione attivante), è un processo alquanto complesso che può essere semplificato in quattro fasi:

- dissoluzione di Al, Si e Ca in una soluzione altamente alcalina, chiamata idrolisi alcalina;
- diffusione delle specie dissolte nella soluzione;
- policondensazione dei complessi di Al, Si e Ca con la soluzione alcalina attivatrice e formazione del C-A-S-H gel e N-A-S-H gel;
- indurimento del gel e formazione del materiale attivato alcalinamente [53].

La cinetica del processo chimico è diversa in funzione dei precursori alcalini utilizzati, ma i prodotti di reazione sono alluminosilicati di calcio idrati e alluminosilicati di sodio idrati, conosciuti rispettivamente con il nome di C-A-S-H gel e N-A-S-H gel per l’analogia con prodotti di idratazione dal cemento Portland (C-S-H) [5, 54]. Questo gel è una resina poliminerale, amorfa o semi-cristallina, che funge da collante per tutte le materie prime a base alluminosilicatica che non hanno reagito ed è infatti responsabile delle proprietà leganti del materiale attivato alcalinamente [55].

Gli studi hanno evidenziato che più materiale viene coinvolto nella reazione e maggiore risulta la resistenza meccanica del materiale realizzato, perciò, possiamo affermare che la reazione di geopolimerizzazione e le proprietà meccaniche siano strettamente correlate [5, 56].

3. MATERIALI E PREPARAZIONE

Il presente capitolo si focalizza sulla dettagliata caratterizzazione dei quattro materiali selezionati come possibili precursori alcalini per la produzione di cementi ad attivazione alcalina. La loppa d'altoforno (GGBFS), la sabbia di scarto di miniera (MS), la cenere di biomassa (ABA) e la cenere di rifiuti solidi urbani (MSWI) saranno sottoposti ad una serie di prove atte a caratterizzare la loro granulometria, composizione chimica e morfologia. Tutti i test saranno effettuati per determinare l'idoneità dei quattro materiali come risorse primarie per la realizzazione di alcali-attivati.

Verranno illustrati i vari mix design, ovvero i progetti della miscela, calcolati sia in base alle caratteristiche dei materiali utilizzati, sia in funzione delle caratteristiche di resistenza, lavorabilità e durabilità che si ricercano.

Infine, viene illustrata sequenza di passaggi effettuata per la preparazione degli impasti e dei provini alcali-attivati.

3.1. Caratterizzazione delle materie prime

La caratterizzazione delle materie prime verrà eseguita esaminando dettagliatamente le prove eseguite su ciascun materiale, delineando le metodologie adottate e i risultati ottenuti. Le prove selezionate sono state effettuate per fornire una panoramica completa delle caratteristiche fisiche e chimiche degli aspiranti precursori.

La caratterizzazione è di fondamentale importanza poiché le polveri alluminosilicatiche non reagiscono in maniera univoca durante il processo di geopolimerizzazione, influenzando così le prestazioni del prodotto finale [57]. Inoltre, essendo prodotti di scarto non hanno schede tecniche in cui vengono riportate le loro caratteristiche, che devono quindi essere indagate.

Le prove di macinazione e setacciatura, applicate a materiali quali la cenere di biomassa (ABA) e la sabbia di scarto di miniera (MS), consentono di valutare la granulometria e la distribuzione dimensionale. Sono aspetti importanti per la preparazione all'uso del

materiale e permettono la valutazione dell'ottimizzazione dell'eventuale futuro processo di lavorazione per il passaggio da scarto a precursore.

La diffrattometria a raggi X e il microscopio elettrico a scansione (SEM) saranno impiegati per esplorare la struttura cristallina e morfologica dei materiali, mentre la prova di reattività in ambiente alcalino fornirà informazioni preziose sulla loro performance durante il processo di geopolimerizzazione.

Verrà calcolata la densità per poter confezionare il mix design e la formulazione delle miscele ottimali. Infine, il calcolo del pH permetterà di individuare quale dei materiali possa essere utilizzato non solo come precursore, ma anche come potenziale attivatore.

3.1.1. Preparazione delle polveri

La caratterizzazione granulometrica è un importante passo nel processo di analisi dei materiali, specialmente quando si mira a ottenere polveri di dimensioni specifiche. In questo contesto, verrà esplorato il metodo di preparazione delle polveri attraverso la macinazione controllata di campioni di materiale, seguita dalla caratterizzazione granulometrica a intervalli di tempo prestabiliti.

È ormai noto in letteratura che uno dei fattori che influenza notevolmente le caratteristiche meccaniche di un materiale attivato alcalinamente è la dimensione delle particelle e la loro area superficiale specifica [11, 21], perciò è importante che tutti i precursori abbiano la stessa finezza per poter confrontare i risultati. La dimensione delle polveri che si ricerca per la preparazione ottimale dei provini è un $D_{max} < 500 \mu m$. La GGBFS e la MSWI soddisfano già questo requisito, mentre l'MS e l'ABA richiedono specifiche operazioni di preparazione. Quest'ultime materie prime fornita dall'azienda presentano particelle di dimensioni variabili, inclusi componenti grossolani che necessitano di essere ridotti e uniformati, come visibile in Figura 9.

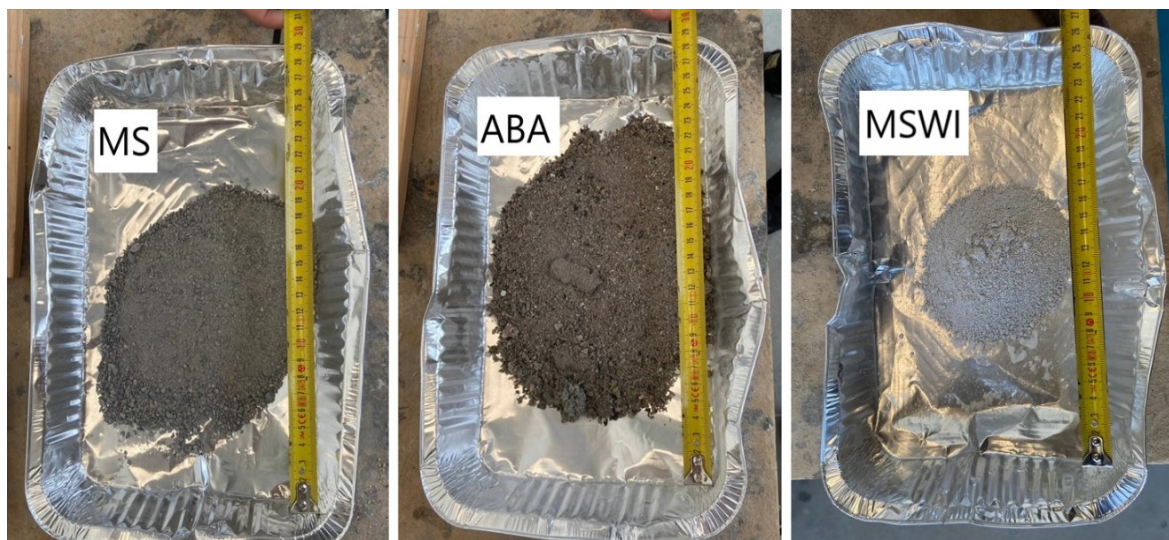


Figura 9: Campioni di MS, ABA e MSWI tal quale.

Pertanto, è necessario sottoporre ABA e MS a procedure di setacciatura e macinazione al fine di ottenere una granulometria omogenea, garantendo così una migliore gestione e integrazione nella miscela cementizia. Contrariamente, la GGBFS e la MSWI sono fornite direttamente dall'azienda con granulometria sufficientemente fine che si attesta al di sotto dei 500 μm . Di conseguenza, quest'ultime risultano già pronte per essere impiegate nella formulazione della miscela cementizia senza la necessità di ulteriori processi di setacciatura o macinazione.

È stata eseguita una prima setacciatura per ottenere la curva granulometrica iniziale di ABA ed MS, così da poter valutare la distribuzione delle dimensioni delle particelle nel campione di materiale tal quale. Questo è fondamentale per comprendere la granulometria iniziale e stabilire un riferimento per le successive fasi di macinazione. Dopodiché il campione è stato macinato a 15, a 30 ed a 60 minuti ed ogni volta è stato setacciato in modo da raccogliere i dati poter calcolare la curva granulometrica.

3.1.1.1. Macinazione

La macinazione dei campioni viene effettuata con un mulino a biglie che è un dispositivo meccanico utilizzato per frantumare materiali solidi in particelle più piccole, visibile in Figura 10a. Le giare vengono fatte ruotare su sé stesse dai rulli sottostanti. Questa

rotazione consente la caduta delle biglie a cascata che frantuma il materiale presente all'interno.

Per caricare la giara correttamente devono essere seguiti dei passaggi precisi. La procedura di macinazione prevede che prima venga posizionato nella giara soltanto metà del campione, aggiungendo poi metà delle biglie e ripetere.

Le biglie di ceramica vengono scelte appositamente di dimensioni diverse tra loro (Figura 10b). In questo modo durante la macinazione le biglie riescono ad avere più punti di contatto sia tra loro, che con il materiale stesso contribuendo ad una frantumazione più efficiente e veloce.



Figura 10: Mulino a biglie (a); mulino caricato con biglie di diverse dimensioni (b).

Il mulino a biglie viene azionato per il tempo definito, dopodiché le biglie vengono pulite all'interno della giara (così da non perdere materiale) e poi rimosse. Il campione macinato è quindi pronto per essere setacciato.

3.1.1.2. Setacciatura

L'analisi granulometrica per setacciatura viene eseguita con una serie di setacci sovrapposti, con apertura via via decrescente dall'alto verso il basso. A questi si aggiungono il coperchio ed il fondo, necessario per raccogliere la frazione di materiale passante all'ultimo setaccio. Il campione da testare si posiziona all'interno del setaccio in

sommità, che viene poi chiuso con un coperchio. La pila di setacci viene fatta oscillare in modo che i granuli vengano separati in frazioni pressoché uguali e trattenuti nei setacci col diametro corrispondente.

L'apertura del primo setaccio (quello con la maglia più grande) viene scelta con una stima visiva del diametro massimo del campione, con l'obiettivo di non trovarvi materiale trattenuto. Tutti gli altri vengono scelti generalmente dimezzando la maglia di setaccio in setaccio, fino ad arrivare a 63 μm come visibile in Figura 11b.

La procedura di setacciatura prevede che ogni setaccio vuoto venga pesato (tara) prima di essere impilato sopra gli altri. Una volta completata, la pila di setacci viene posta sulla setacciatrice (Figura 11a) e il campione di materiale viene posizionato all'interno della stessa. Si aziona la macchina e la durata di ogni ciclo di setacciatura è di 10 minuti per ogni campione.



Figura 11: Setacciatrice (a); pila di setacci con relative aperture (b).

Decorso il tempo indicato, ogni setaccio viene pesato nuovamente. Questa volta all'interno di ogni setaccio si trova il materiale trattenuto da ognuno (peso lordo, P_l). La curva granulometrica del campione analizzato si costruisce detraendo da ogni peso lordo dei setacci la tara corrispondente, ottenendo il peso del materiale trattenuto (peso netto, P_n).

3.1.1.3. Curva granulometrica

La curva granulometrica viene calcolata con lo scopo di comprendere la distribuzione granulometrica del materiale tal quale e di individuare il tempo di macinazione ideale per ottenere un passante a 500 µm abbondante. La scelta del tempo di macinazione ottimale dipende dalla curva granulometrica desiderata perchè quando tra un tempo di macinazione e l'altro non vi è un significativo aumento di passante fine, non risulta conveniente impiegare tempo ed energia per macinare.

Grazie alla macinazione e setacciatura delle polveri effettuata in precedenza, è possibile calcolare i trattenuti parziali percentuali (TP%), i trattenuti cumulativi percentuali (TC%) e i passanti cumulativi percentuali (PC%) per ogni materiale e tempo di macinazione.

Il Trattenuto Parziale Percentuale (TP%_i) per ogni frazione si calcola utilizzando la seguente formula:

$$TP\%_i = \frac{Pn_i}{Pn_{TOT}} \cdot 100$$

dove:

Pn_i = Peso trattenuto sulla frazione specifica, ovvero il peso netto di ogni setaccio [g];

Pn TOT = peso netto del campione [g].

Il Trattenuto Cumulativo Percentuale (TC%_i) si calcola semplicemente sommando i Trattenuti Parziali Percentuali (TP%) calcolati prima fino a una determinata frazione i.

$$TC\%_i = \sum_{i=1}^N TP\%_i$$

Il Passante Cumulativo Percentuali (PC%_i) indica la quantità percentuale di materiale che è più fine di una particolare dimensione di setaccio. Si calcola come segue:

$$PC\%_i = 100 - TC\%_i$$

La curva granulometrica viene rappresentata con un grafico avente per ordinate i PC%_i e alle ascisse le dimensioni dei setacci [mm] su un asse logaritmico. La curva granulometrica

rappresenta graficamente la distribuzione delle dimensioni delle particelle di un materiale in funzione della percentuale di campione che passa attraverso le diverse frazioni di setacciatura.

Le tabelle ed i grafici sottostanti forniscono un dettagliato quadro della distribuzione granulometrica della di ABA e MS. Per ogni materiale vengono riportate la Tabella 1 e Tabella 2 contenenti i dati ricavati dalla setacciatura del materiale tal quale, macinato per 15, 30 e 60 minuti, necessari per generare le relative curve granulometriche visibili dai grafici in Figura 12 e Figura 13.

Tabella 1: Dati raccolti per la realizzazione delle curve granulometriche di ABA tal quale, macinato a 15, 30 e 60 minuti.

CENERE DI BIOMASSA (ABA)													
Apertura setaccio [mm]	t_0						t_{15}						
	Tara [g]	Pl t_0 [g]	Pn t_0 [g]	TP (%)	TC(%)	PC(%)	Tara [g]	Pl t_{15} [g]	Pn t_{15} [g]	TP (%)	TC(%)	PC(%)	
32			0,00	0,00	0,00	100,00	-	-	0,00	0,00	0,00	100,00	
16	636,92	646,92	10,00	4,60	4,60	95,40	636,90	640,03	3,13	1,44	1,44	98,56	
8	535,42	544,44	9,02	4,15	8,75	91,25	535,41	544,79	9,38	4,32	5,76	94,24	
4	476,09	483,74	7,65	3,52	12,27	87,73	476,02	481,77	5,75	2,65	8,41	91,59	
2	503,89	524,96	21,07	9,69	21,96	78,04	503,86	508,20	4,34	2,00	10,41	89,59	
1	396,94	439,05	42,11	19,37	41,33	58,67	396,93	399,69	2,76	1,27	11,69	88,31	
0,5	460,93	512,13	51,20	23,55	64,88	35,12	460,93	466,15	5,22	2,41	14,09	85,91	
0,25	422,95	458,77	35,82	16,48	81,36	18,64	422,91	456,15	33,24	15,32	29,41	70,59	
0,125	412,47	434,78	22,31	10,26	91,62	8,38	412,45	489,45	77,00	35,48	64,89	35,11	
0,090	397,71	403,09	5,38	2,47	94,10	5,90	397,73	428,71	30,98	14,28	79,17	20,83	
0,063	395,13	399,16	4,03	1,85	95,95	4,05	395,11	415,83	20,72	9,55	88,72	11,28	
Fondo	298,58	307,38	8,80	4,05	100,00	0,00	298,53	323,01	24,48	11,28	100,00	0,00	
			TOT	217,39							TOT	217,00	
Apertura setaccio [mm]	t_{30}						t_{60}						
	Tara [g]	Pl t_{30} [g]	Pn t_{30} [g]	TP (%)	TC(%)	PC(%)	Tara [g]	Pl t_{60} [g]	Pn t_{60} [g]	TP (%)	TC(%)	PC(%)	
32	-	-	0,00	0,00	0,00	100,00	-	-	0,00	0,00	0,00	100,00	
16	636,97	636,97	0,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	
8	535,39	546,76	11,37	5,30	5,30	94,70	535,34	546,39	11,05	5,30	5,30	94,70	
4	476,19	481,87	5,68	2,65	7,95	92,05	476,08	481,22	5,14	2,46	7,76	92,24	
2	504,05	508,18	4,13	1,92	9,87	90,13	504,02	507,93	3,91	1,88	9,64	90,36	
1	397,06	398,88	1,82	0,85	10,72	89,28	397,08	399,13	2,05	0,98	10,62	89,38	
0,5	461,18	463,22	2,04	0,95	11,67	88,33	461,16	621,64	160,48	76,96	87,58	12,42	
0,25	422,96	442,06	19,10	8,90	20,57	79,43	423,13	447,16	24,03	11,52	99,10	0,90	
0,125	412,50	503,10	90,60	42,22	62,79	37,21	412,61	414,08	1,47	0,70	99,81	0,19	
0,090	397,76	435,85	38,09	17,75	80,54	19,46	397,98	398,30	0,32	0,15	99,96	0,04	
0,063	395,14	423,74	28,60	13,33	93,86	6,14	395,27	395,32	0,05	0,02	99,99	0,01	
Fondo	298,55	311,72	13,17	6,14	100,00	0,00	298,54	298,57	0,03	0,01	100,00	0,00	
			TOT	214,60							TOT	208,53	

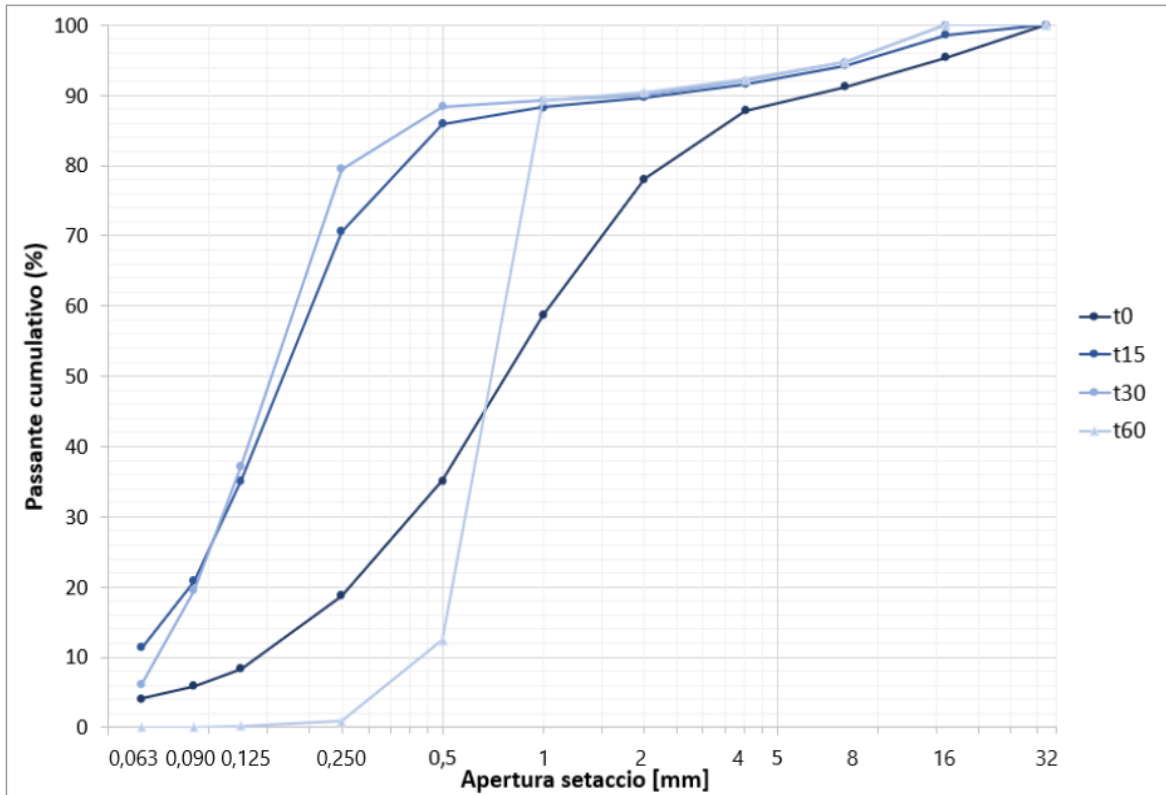


Figura 12: Curva granulometrica di ABA tal quale, macinato a 15,30 e 60 minuti.

Tabella 2: Dati raccolti per la realizzazione delle curve granulometriche di ABA tal quale, macinato a 15, 30 e 60 minuti.

SABBIA DI SCARTO DI MINIERA (MS)													
Apertura setaccio [mm]	t ₀						t ₁₅						
	Tara [g]	Pl t ₀ [g]	Pn t ₀ [g]	TP (%)	TC(%)	PC(%)	Tara [g]	Pl t ₁₅ [g]	Pn t ₁₅ [g]	TP (%)	TC(%)	PC(%)	
8	535,28	535,28	0,00	0,00	0,00	100,00	535,28	535,28	0,00	0,00	0,00	100,00	
4	476,09	478,58	2,49	0,82	0,82	99,18	476,09	478,64	2,55	0,84	0,84	99,16	
2	504,18	548,53	44,35	14,54	15,36	84,64	504,03	536,09	32,06	10,56	11,40	88,60	
1	397,24	490,56	93,32	30,60	45,97	54,03	397,03	464,97	67,94	22,37	33,77	66,23	
0,5	461,20	524,88	63,68	20,88	66,85	33,15	460,98	515,35	54,37	17,90	51,67	48,33	
0,25	423,02	460,80	37,78	12,39	79,24	20,76	422,95	475,61	52,66	17,34	69,01	30,99	
0,125	412,57	440,78	28,21	9,25	88,49	11,51	412,54	485,56	73,02	24,04	93,05	6,95	
0,090	397,91	419,87	21,96	7,20	95,69	4,31	397,79	416,33	18,54	6,10	99,15	0,85	
0,063	395,20	405,39	10,19	3,34	99,04	0,96	395,27	397,27	2,00	0,66	99,81	0,19	
Fondo	298,55	301,49	2,94	0,96	100,00	0,00	298,57	299,14	0,57	0,19	100,00	0,00	
TOT			304,92			TOT			303,71				
Apertura setaccio [mm]	t ₀						t ₀						
	Tara [g]	Pl t ₃₀ [g]	Pn t ₃₀ [g]	TP (%)	TC(%)	PC(%)	Tara [g]	Pl t ₆₀ [g]	Pn t ₆₀ [g]	TP (%)	TC(%)	PC(%)	
8	535,28	535,28	0,00	0,00	0,00	100,00	535,28	535,28	0,00	0,00	0,00	100,00	
4	476,03	478,33	2,30	0,77	0,77	99,23	476,07	478,49	2,42	0,81	0,81	99,19	
2	504,00	529,93	25,93	8,64	9,40	90,60	503,97	523,89	19,92	6,63	7,43	92,57	
1	396,97	452,41	55,44	18,46	27,87	72,13	396,96	429,61	32,65	10,86	18,30	81,70	
0,5	460,96	500,80	39,84	13,27	41,13	58,87	460,94	509,25	48,31	16,08	34,37	65,63	
0,25	422,94	476,04	53,10	17,68	58,82	41,18	422,90	541,95	119,05	39,62	73,99	26,01	
0,125	412,50	513,63	101,13	33,68	92,50	7,50	412,48	483,67	71,19	23,69	97,68	2,32	
0,090	397,77	418,18	20,41	6,80	99,30	0,70	397,74	402,75	5,01	1,67	99,35	0,65	
0,063	395,15	396,97	1,82	0,61	99,90	0,10	395,12	396,53	1,41	0,47	99,82	0,18	
Fondo	298,72	299,01	0,29	0,10	100,00	0,00	298,55	299,10	0,55	0,18	100,00	0,00	
TOT			300,26			TOT			300,51				

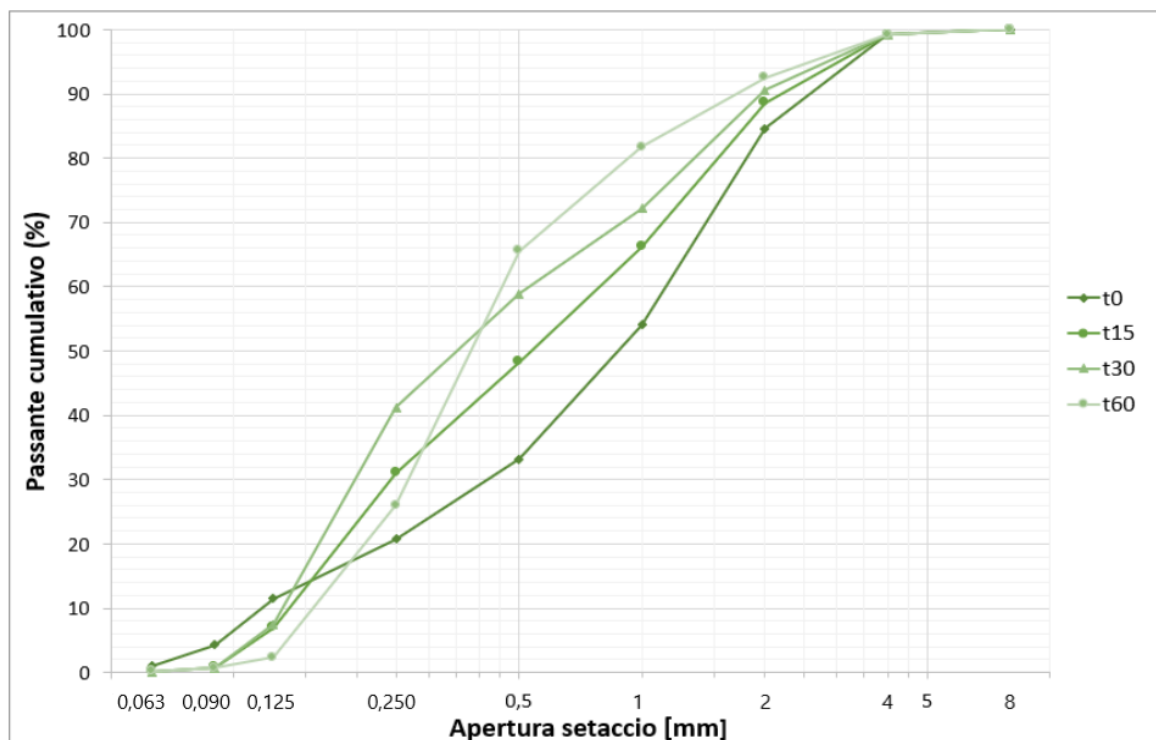


Figura 13: Curva granulometrica di MS tal quale, macinato a 15,30 e 60 minuti.

All'aumentare del tempo di macinazione ci si aspetta un aumento del passante ai setacci con maglia più piccola, ma dalle curve granulometriche in (Figura 12 e Figura 13) si può notare che non è sempre così. Può accadere che ad un certo punto della macinazione si verifichi il fenomeno dell'agglomerazione, ovvero quando le particelle del materiale da macinare si uniscono formando agglomerati. Questo fenomeno comporta una ridotta efficienza del processo di macinazione e una distribuzione non uniforme delle dimensioni delle particelle.

La formazione di agglomerati è ben visibile in Figura 14 e questo avviene macinando un'ora entrambi i materiali. Pur essendo composte da particelle molto piccole, questi granuli che si sono creati per la macinazione non risultano passanti in setacci con maglia molto più grande rispetto alla vera dimensione delle particelle.



Figura 14: Formazione di agglomerati in MS e ABA al setaccio con apertura 500 μm .

La composizione chimica e le proprietà fisiche delle materie prime macinate influenzano la tendenza all'agglomerazione. Alcuni materiali possono avere una maggiore affinità a formare grumi durante il processo di macinazione, ma le principali ragioni per cui questo fenomeno si verifica sono le seguenti:

- la temperatura elevata durante il processo di macinazione, specialmente se il materiale è sensibile al calore. L'aumento di temperatura si può verificare per una macinazione prolungata, questo perché l'azione di frantumazione delle particelle durante la macinazione genera calore che può accumularsi e influenzare le proprietà del materiale;
- l'energia introdotta durante la macinazione, perché può causare cambiamenti nelle proprietà fisiche delle particelle, come la loro forma e dimensione. Particelle troppo piccole o troppo sottili possono avere una maggiore tendenza ad agglomerare a causa delle forze elettrostatiche attrattive che si sviluppano;
- l'umidità dell'aria combinata all'estrema finezza del materiale. Le particelle finemente macinate sono più reattive chimicamente. Ciò potrebbe portare a reazioni indesiderate tra le particelle stesse o con l'ambiente circostante, facilitando

la formazione di agglomerati. Infatti, quando c'è un elevato contenuto di umidità nel materiale, il materiale può reagire con l'acqua, permettendo l'agglomerazione delle particelle [58].

Per evitare o ridurre questi effetti negativi, è importante non lasciare il materiale all'aria aperta impedendo che assorba acqua dall'umidità dell'aria e regolare attentamente la durata del processo di macinazione.

È stato effettuato un tentativo per ridurre il fenomeno dell'agglomerazione aggiungendo ad un campione tal quale della MS, una piccolissima percentuale sul peso (0,03%) di glicole dietilenico ($C_4H_{10}O_3$) e si è lasciata macinare per 60 minuti. Al termine della macinazione il campione presenta ancora granuli tipici del fenomeno di agglomerazione (Figura 15).



Figura 15: Formazione di agglomerati in MS con l'aggiunta di glicole dietilenico.

Tenendo in considerazione tutti gli aspetti trattati precedentemente, sono state individuate le curve per le quali ulteriori sessioni di macinazione non contribuiscono significativamente alla riduzione delle dimensioni delle particelle di ogni materiale, per le quali non si creano agglomerati e per la quali si ottiene un passante a $500\ \mu\text{m}$ consistente. In conclusione, si è deciso che il tempo di macinazione ideale è di 30 minuti per MS e di 15 minuti per ABA.

3.1.2. Diffrazione a raggi X

La composizione chimica dei materiali impiegati come precursori è un fattore chiave che incide fortemente sul processo di geopolimerizzazione [57]. Pertanto, in questo studio è stata impiegata la diffrazione a raggi X per determinare la composizione chimica dei precursori. I campioni di MS e ABA preparati per effettuare l'analisi sono stati macinati e setacciati in modo da ottenere polveri con $D_{\max} < 250 \mu\text{m}$, mentre i campioni prelevati per le analisi di GGBFS e MSWI sono tal quali.

La diffrazione a raggi X (XRD) è una tecnica utilizzata nella scienza dei materiali per determinare la struttura atomica e molecolare di un materiale, identificando i composti presenti e le loro quantità. Questo viene fatto irradiando un campione del materiale con raggi X incidenti e quindi misurando le intensità e gli angoli di diffusione dei raggi X che vengono diffratti dal materiale. I raggi X sono radiazioni elettromagnetiche ad alta energia, aventi una lunghezza d'onda compresa approssimativamente fra 10^{-9} e 10^{-12} m, lunghezza confrontabile con le distanze interatomiche. L'intensità dei raggi X sparsi, viene tracciata in funzione dell'angolo di diffrazione e la struttura del materiale è determinata dall'analisi della posizione, dell'angolo e delle intensità dei picchi. Nell'ambito dei precursori alcalini, l'analisi chimica è essenziale per quantificare la presenza di silice, allumina ed altri elementi chiave che influenzano la reattività del precursore.

Sui diffrattogrammi è riportato in ascisse il valore dell'angolo di diffrazione e in ordinate l'intensità dei picchi di diffrazione. In un tipico diffrattogramma si possono individuare:

1. il numero e posizione dei picchi che individuano il sistema cristallino ed il volume della cella;
2. l'intensità dei picchi, che permette di individuare la composizione chimica e struttura del campione;
3. la forma dei picchi, che fornisce informazioni sulla difettosità reticolare, le dimensioni dei grani, stress e deformazioni.

L'identificazione delle fasi cristalline è possibile grazie a database nei quali sono riportate le intensità dei tre picchi più importanti per le diverse sostanze pure e schede che ne riportano tutti i loro picchi. Non esiste una sostanza che abbia lo spettro uguale ad un'altra ma l'indagine si complica quando la polvere in esame è costituita da varie fasi cristalline, in quanto ciascuna di esse fornisce un proprio spettro che si sovrappone a quello delle altre. L'analisi ai raggi X permette quindi l'analisi qualitativa e cristallografica di qualsiasi sostanza cristallina.

È stata effettuata la diffrazione a raggi X sui campioni dei quattro materiali di interesse, ovvero GGBFS, MS, ABA e MSWI.

Il diffrattogramma della loppa d'altoforno (GGBFS) in Figura 16, presenta intensità dei picchi molto bassa. Lo spettro è alquanto rumoroso, indice di un materiale quasi completamente amorfo, infatti l'unica sequenza di picchi che si distingue dagli altri è attribuibile alla calcite (C).

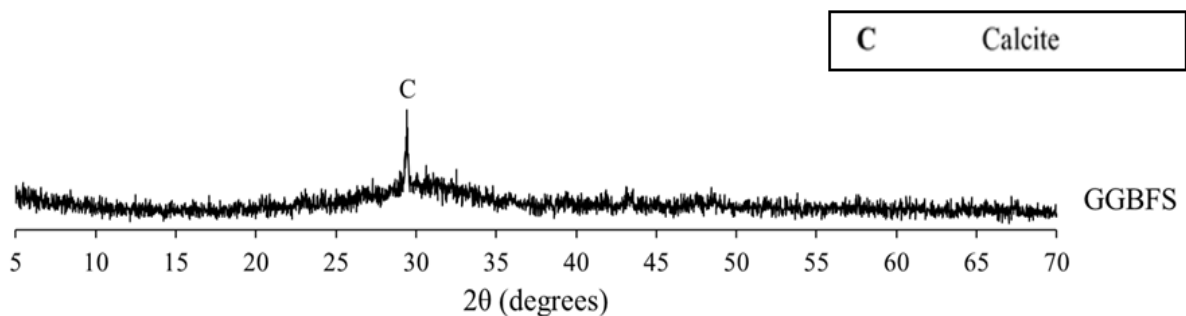


Figura 16: Diffrattogramma GGBFS.

I pattern di diffrazione degli altri materiali sono riportati in Figura 17.

Lo spettro XRD di MS evidenzia che il materiale è cristallino, in quanto presenta molti picchi e ben definiti. Le principali fasi cristalline dell'MS sono muscovite (M) e quarzo (Q). Le fasi minori sono: albite (A), biotite (T), calcite (C), clinocloro (E).

Il pattern di ABA suggerisce che il materiale è semi-cristallino perché si notano picchi non definiti e tratti dello spettro dati da frazioni amorphe, come si vede nella deviazione della linea di base tra i valori 2θ di 25 e 35.

Le principali fasi cristalline sono la kovdorskite (K), la arcanite (R), la bütschliite (U). Le fasi cristalline minori sono l'anidrite (N), la bobierrite (B), la fairchildite (F) ed il quarzo (Q).

Anche il diffrattogramma di MSWI indica che il materiale è semi-cristallino. Vi sono tratti dello spettro con picchi ben definiti ed altri tratti in cui gli stessi non sono distinguibili a causa del rumore.

La principale fase cristallina è la portlandite (P), mentre le fasi minori sono: anidrite (N), calcite (C), alite (H), gesso (L), silvite (S).

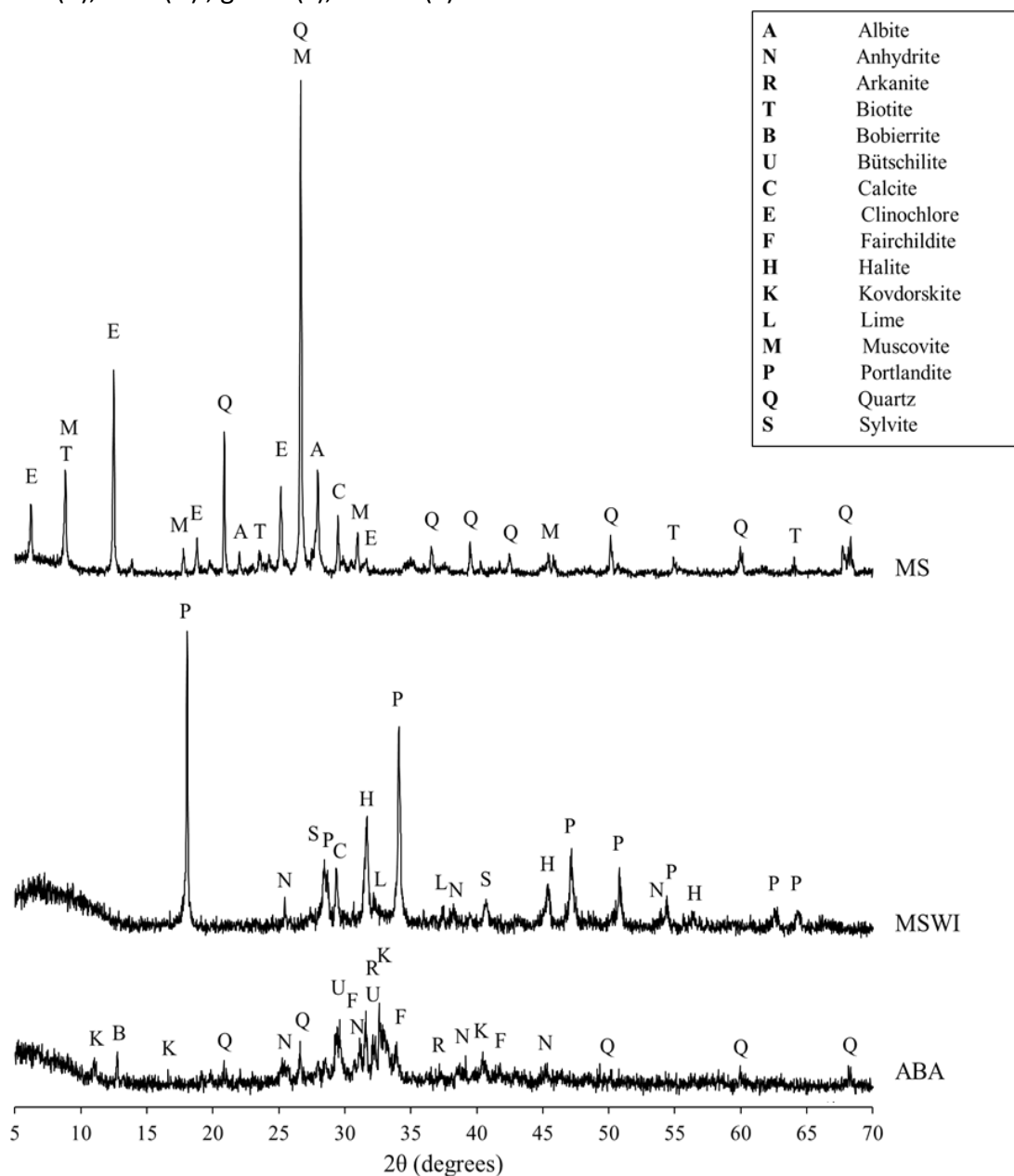


Figura 17: Diffrattogrammi di MS, MSWI e ABA.

3.1.3. Microscopio elettronico a scansione (SEM)

Il SEM, ovvero il microscopio elettronico a scansione, è uno strumento attraverso il quale è possibile condurre un'indagine di tipo non distruttivo grazie all'interazione tra un fascio di elettroni e il campione, oggetto d'esame. Permette di ottenere informazioni di tipo morfologico e strutturale e di individuare gli elementi chimici presenti in un materiale.

Nel microscopio elettronico a scansione una "sonda" molto sottile di elettroni viene focalizzata sulla superficie del campione all'interno del microscopio e viene indotta ad esercitare una scansione in forma di una successione di linee parallele. L'analisi chimica con il SEM viene realizzata misurando l'energia e la distribuzione delle intensità dei raggi X generati dal fascio elettronico sul campione utilizzando un rivelatore a dispersione di energia EDS (spettrometria per dispersione di energia). L'analisi che viene prodotta può essere sia dell'area che in quel momento viene ingrandita, oppure, fermando la scansione del fascio elettronico, di un punto di interesse sulla superficie del campione (microanalisi). Dato che la porzione di spazio eccitata dal fascio elettronico, che produce lo spettro X, è un intorno del punto di pochi micron, il SEM+EDX è un potente mezzo di indagine su solidi chimicamente disomogenei a scala microscopica.

Anche in questo caso i campioni di MS e ABA preparati per effettuare l'analisi sono stati macinati e setacciati in modo da ottenere polveri con $D_{max} < 250 \mu\text{m}$, mentre i campioni prelevati per le analisi di GGBFS e MSWI sono tal quali.

Di seguito vengono riportati risultati delle analisi per i campioni GGBFS, MSWI, ABA e MS. Per ogni campione viene riportata la scansione SEM di due differenti zone dello stesso campione, il diffrattogramma e la relativa tabella in cui sono indicati gli elementi chimici rilevati. L'analisi è qualitativa e quantitativa, infatti nella tabella sono riportate le percentuali sul peso totale di ogni elemento presente.

1. Campione GGBFS: in Figura 18 e Figura 19 e sono riportate le scansioni al SEM di due zone del campione GGBFS. Le particelle risultano di forma tondeggiate.

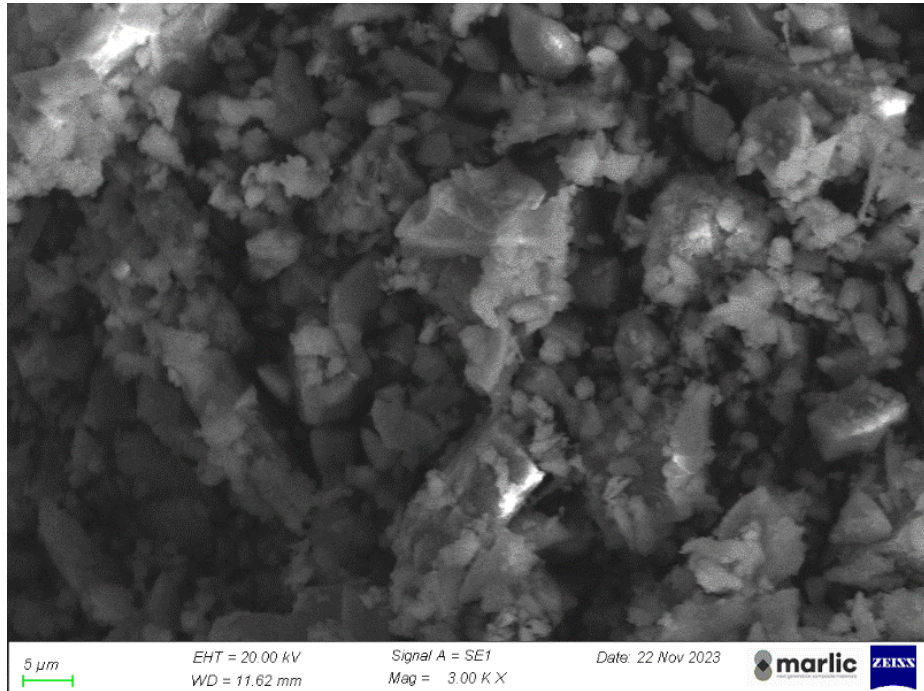


Figura 18: Scansione SEM del campione GGBF-zona 1.

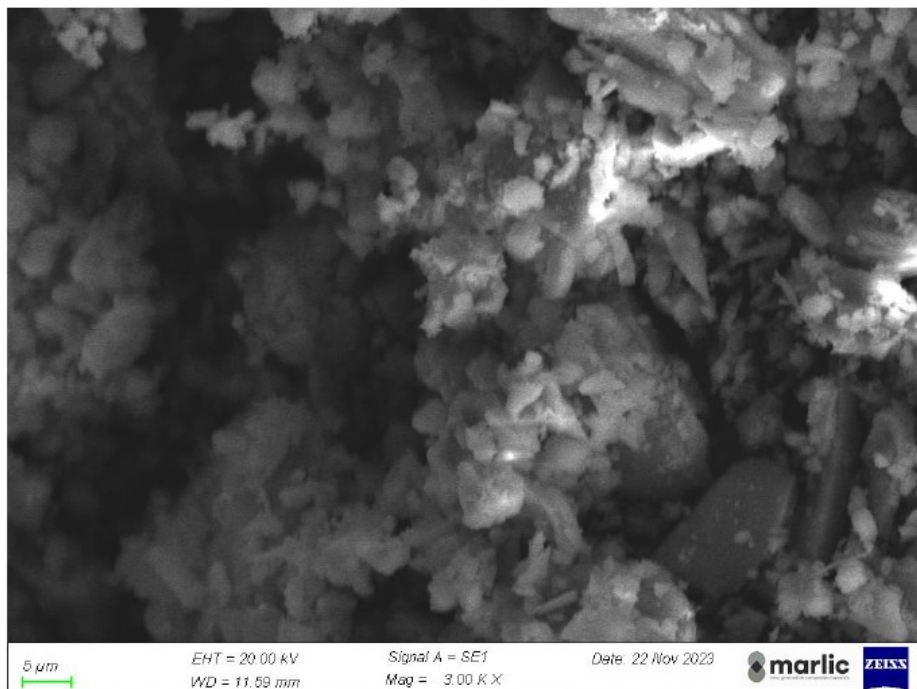


Figura 19: Scansione SEM del campione GGBF-zona 2.

Dal diffrattogramma in Figura 20 si notano i picchi del calcio (Ca) e del silicio (Si). La tabella sottostante mostra che la GGBFS ha un alto contenuto di calcio (31,85% in peso) e di silicio (11,98% in peso). L'alluminio (Al) invece è il 4,86% in peso.

I risultati della prova XRD hanno permesso di identificare il materiale come amorfo, perciò sapendo che contiene calcio, silicio ed alluminio, dalla letteratura possiamo dire che la GGBFS è un materiale reattivo.

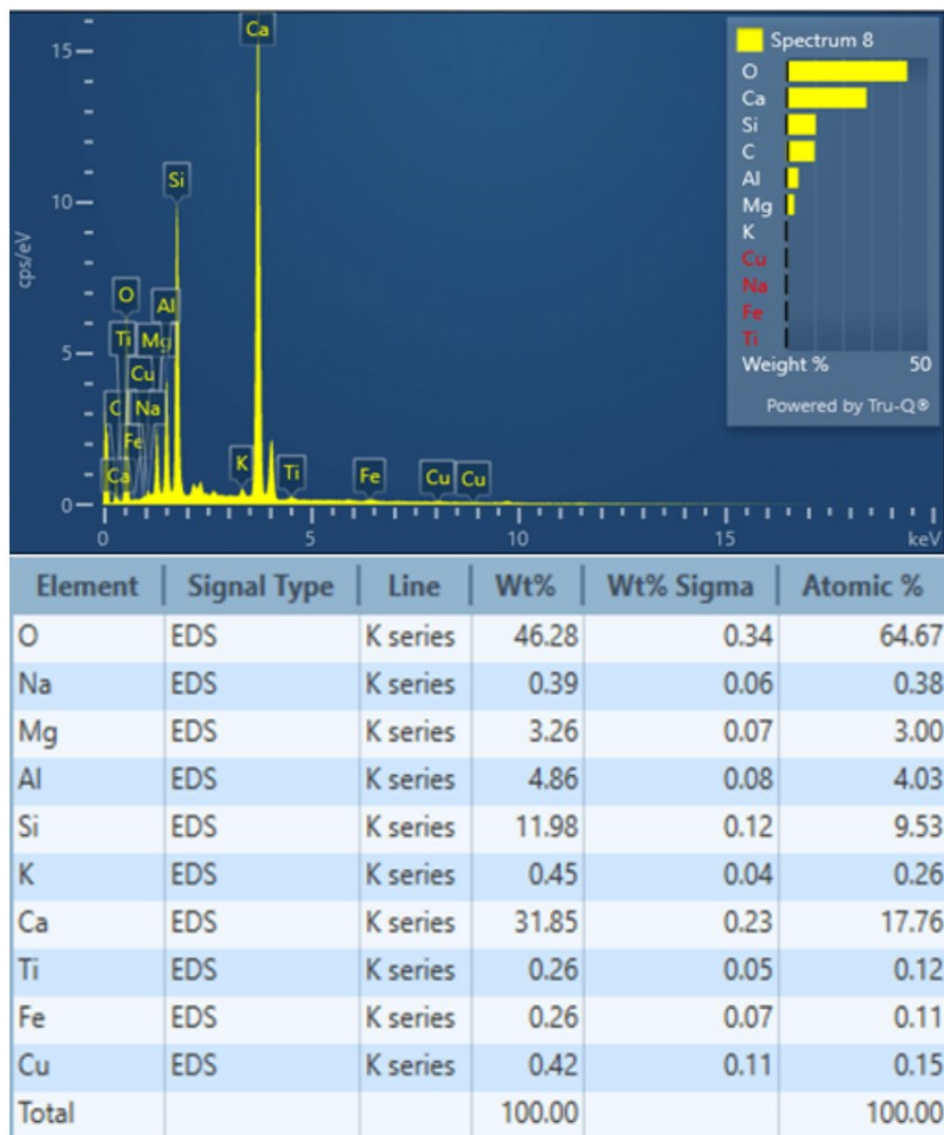


Figura 20: Diffrattogramma campione GGBFS- zona 1 (sopra); risultati indagini SEM+EDX campione GGBFS- zona 1 (sotto).

2. Campione MSWI: in Figura 22 e Figura 21 sono riportate le scansioni al SEM di due zone del campione MSWI.

Questo materiale, essendo una cenere volante, presenta particelle molto piccole e tondeggianti.



Figura 22: Scansione SEM del campione MSWI-zona 1.

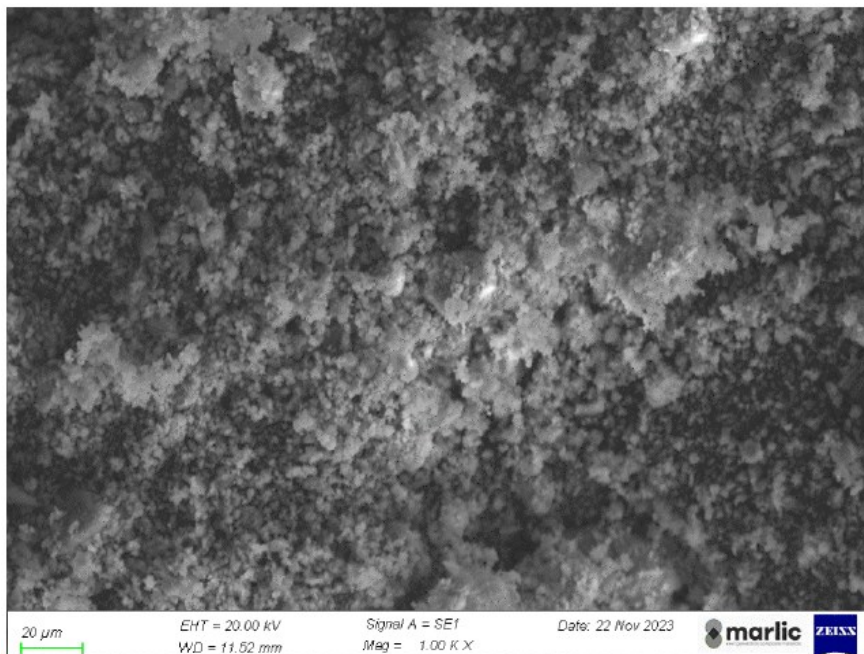


Figura 21: Scansione SEM del campione MSWI-zona 2.

Nel diffrattogramma in Figura 23 si distinguono chiaramente i picchi del calcio (Ca) e cloro (Cl). La tabella sottostante informa che i due elementi presenti in maggior quantità sono il calcio (31,26% in peso) e il cloro (11,86% in peso). In minor quantità è presente anche il potassio (K) (3,21% in peso).

I risultati dalla prova XRD hanno classificato MSWI come semi-cristallino, quindi è noto che ha una parte amorfa. Dalle analisi SEM-EDX risulta l'elevata presenza di calcio e perciò si può dire che il materiale è potenzialmente reattivo.

Come spiegato precedentemente, in letteratura è segnalata la possibile reazione espansiva della MSWI in ambiente basico a causa della presenza di elementi metallici. Nel campione analizzato risultano tracce di alluminio (Al) e zinco (Zn).

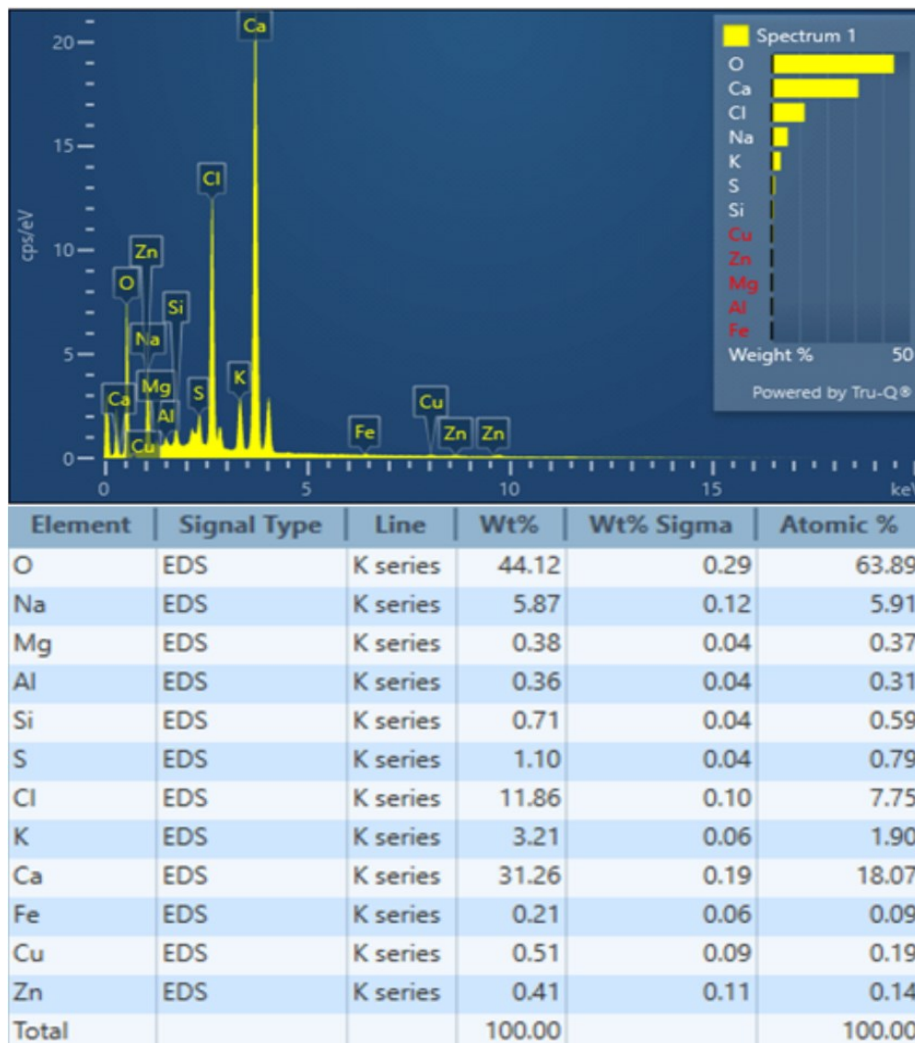


Figura 23: Diffrattogramma campione MSWI-zona 1 (sopra); risultati indagini SEM+EDX campione MSWI- zona 1 (sotto).

3. Campione ABA: in Figura 25 e Figura 24 sono riportate le scansioni al SEM di due zone del campione ABA. Anche in questo caso si nota che le particelle sono prevalentemente tondeggianti.

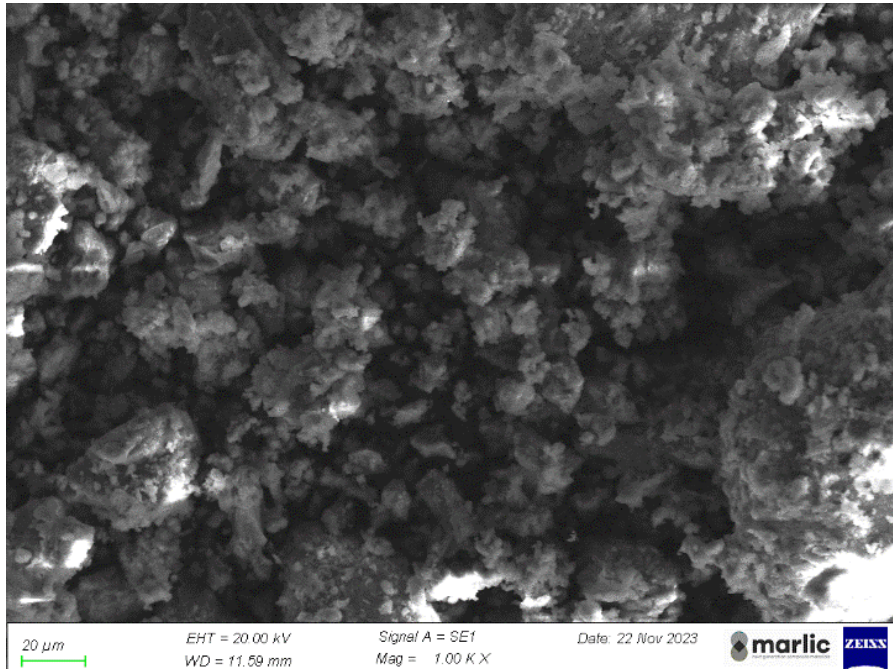


Figura 25: Scansione SEM del campione ABA-zona 1.

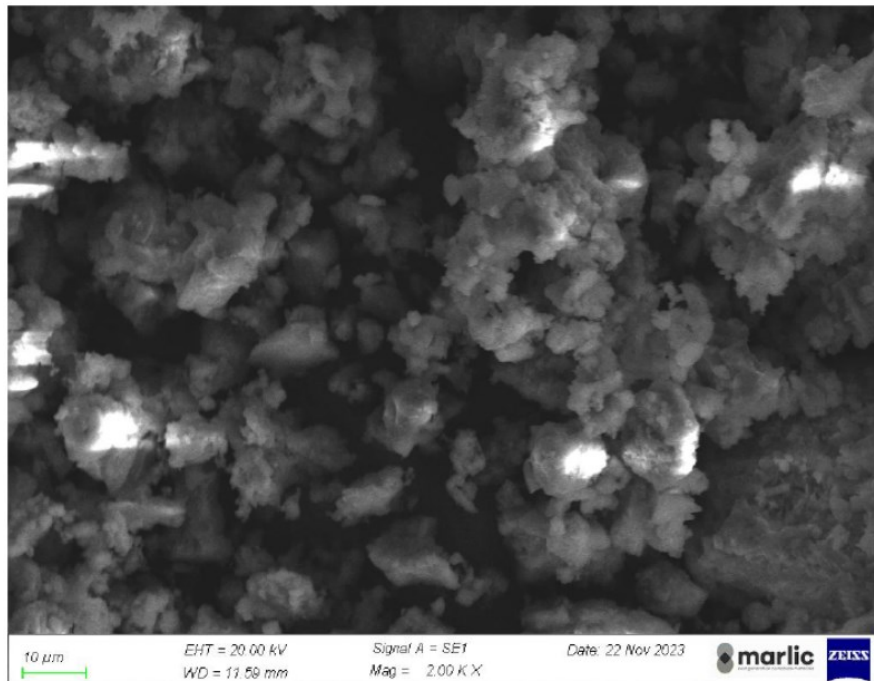


Figura 24: Scansione SEM del campione ABA-zona 2.

Dal diffrattogramma in Figura 26 si nota il picco del potassio (K). La tabella sottostante riporta che ABA ha un alto contenuto di potassio, che è il 29,32% in peso. Sono presenti anche il calcio (9,54% in peso) e il silicio (6,00% in peso).

Dalla prova XRD il materiale risulta semi-cristallino e poiché contiene calcio e silicio, si può affermare che ABA è potenzialmente reattivo. Inoltre, l'elevata presenza di potassio indica che il materiale potrebbe essere anche idoneo a svolgere non solo la funzione di precursore, ma anche di attivatore.

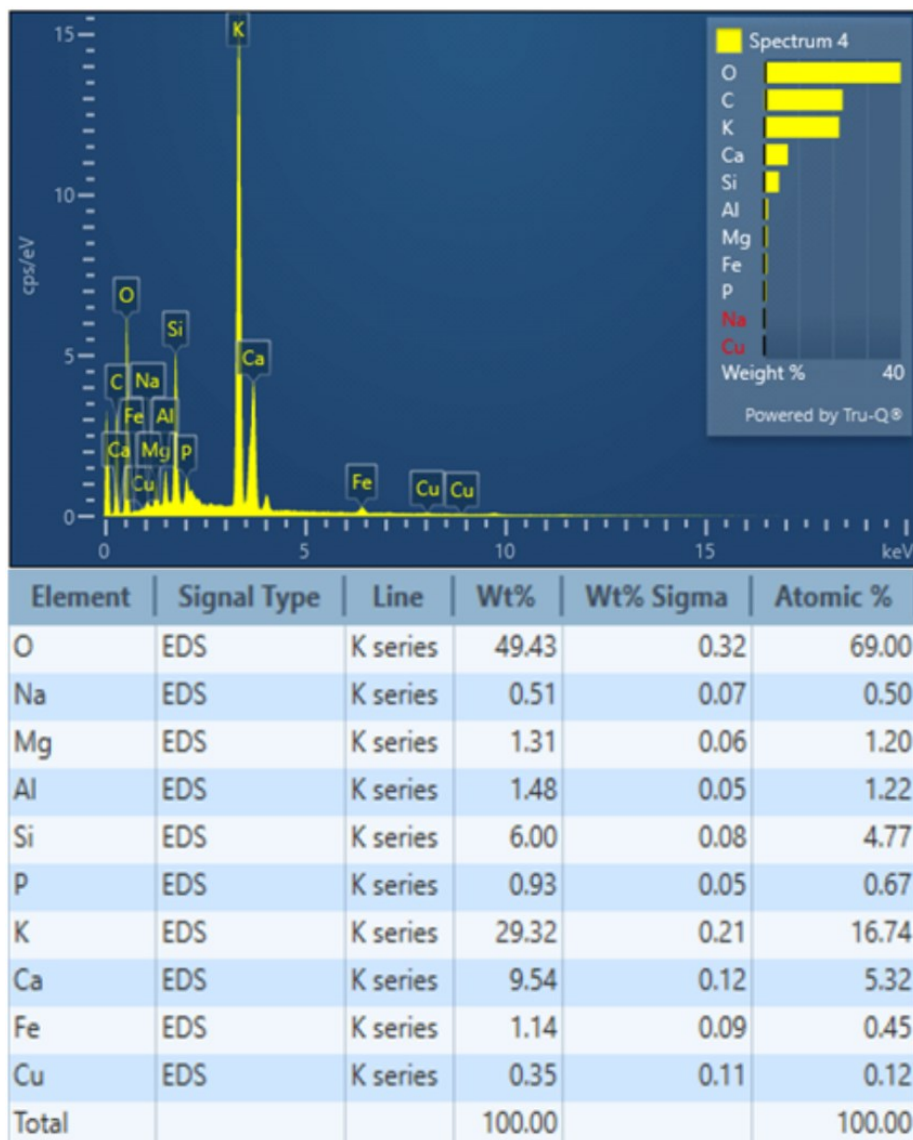


Figura 26: Diffrattogramma campione ABA-zona 1 (sopra); risultati indagini SEM+EDX campione ABA- zona 1 (sotto).

4. Campione MS: in Figura 28 e Figura 27 sono riportate le scansioni al SEM di due zone del campione. Le particelle hanno di forma tondeggiante anche per la MS.

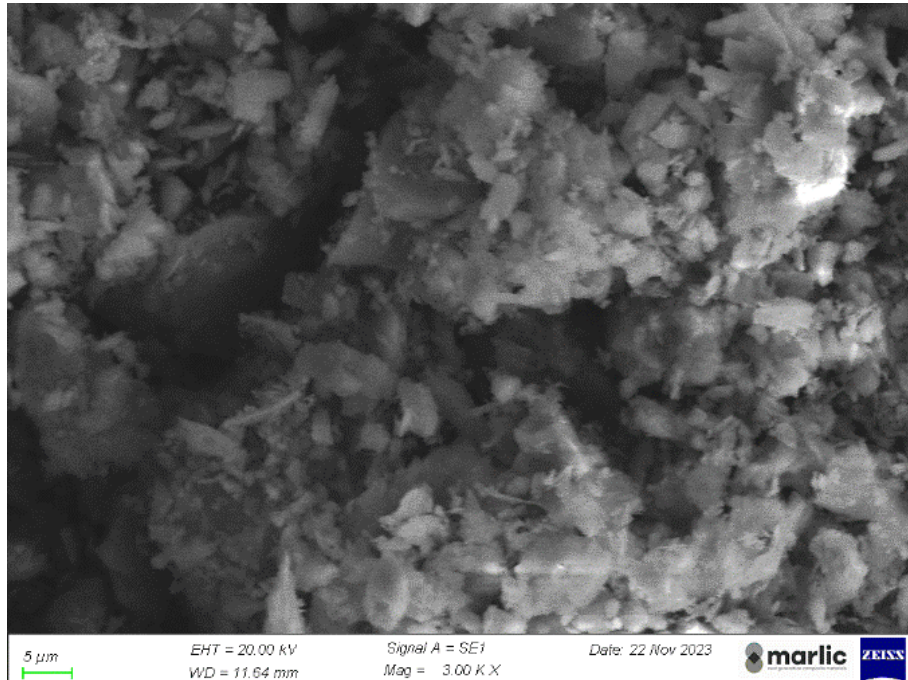


Figura 28: Scansione SEM del campione MS-zona 1.

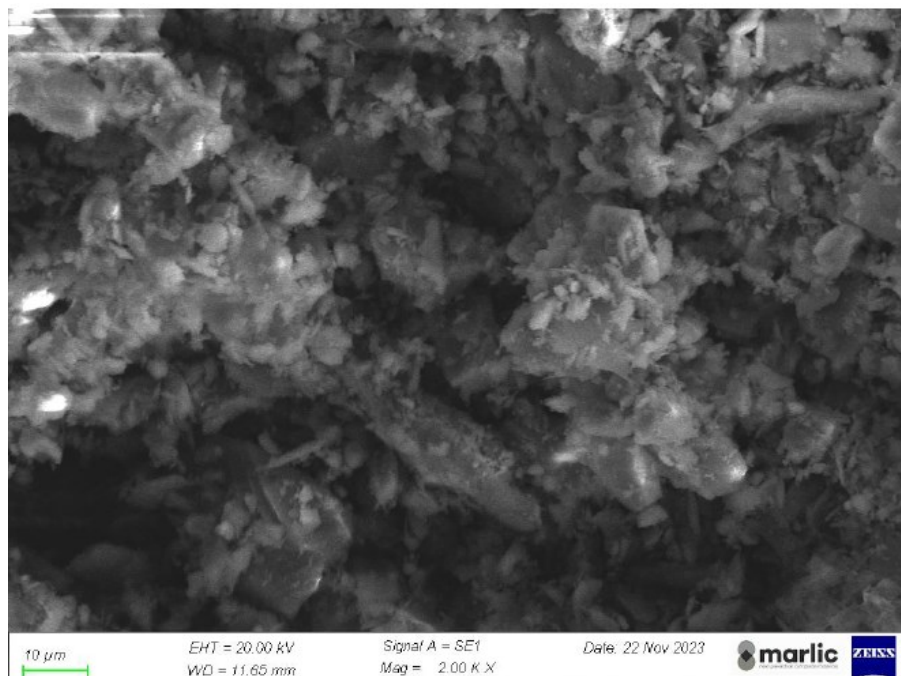


Figura 27: Scansione SEM del campione MS-zona 2.

Nel diffrattogramma in Figura 29 si distingue il picco del silicio (Si). Dalla tabella sottostante si legge che il contenuto di silicio è alto, ovvero per il 24,79% in peso. Anche l'alluminio (Al) è presente in quantità elevata, ovvero per l'8,65% in peso.

I risultati dalla prova XRD hanno classificato MSWI come materiale cristallino. A causa della sua composizione cristallina, l'alluminio e l'alta percentuale di silicio non sono in forma amorfa e perciò sono poco reattivi.

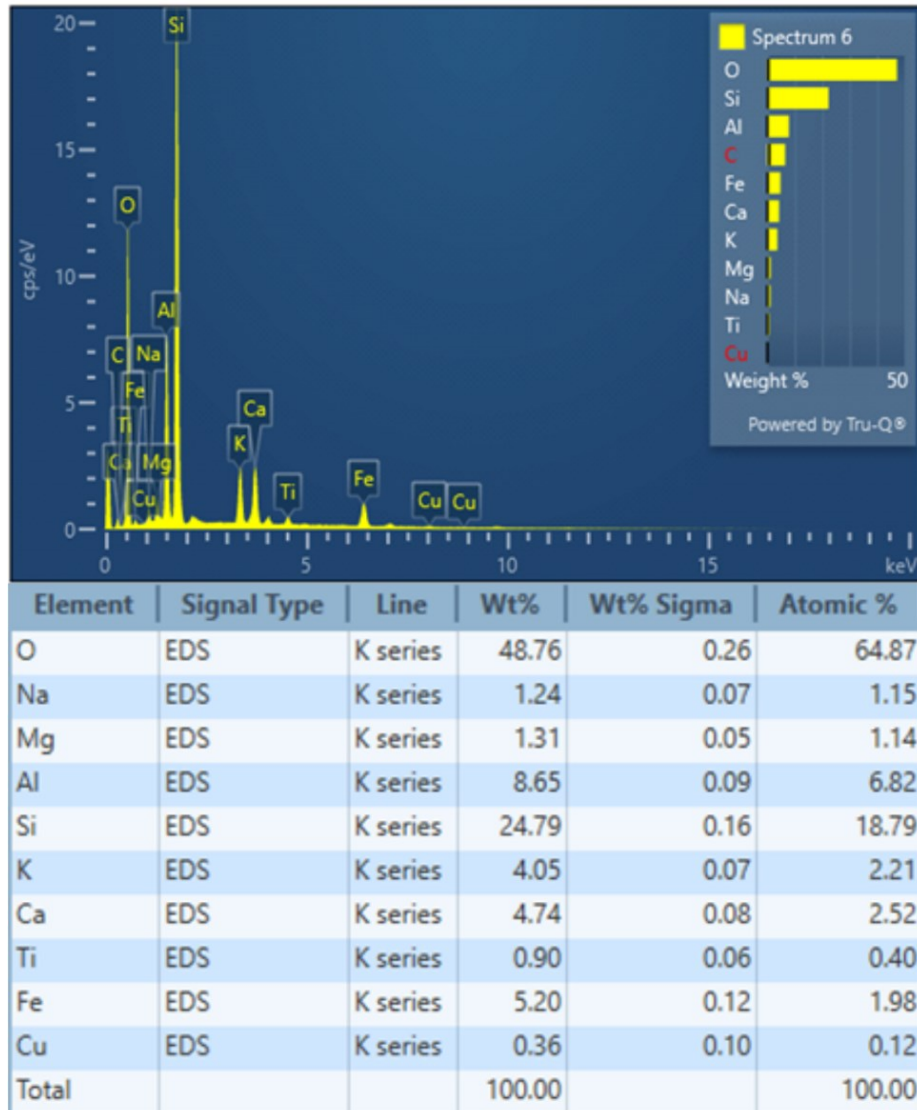


Figura 29: Diffrattogramma campione MS-zona 1 (sopra); risultati indagini SEM+EDX campione MS-zona 1 (sotto).

3.1.4. Prova di reattività in ambiente alcalino

La prova di reattività in ambiente alcalino è una procedura sperimentale finalizzata a valutare la capacità di un materiale di reagire in ambiente alcalino e quindi determinare quanto della sostanza costituente il materiale può andare in soluzione. Nei materiali alternativi al cemento, la reattività del precursore alcalino influisce sulla formazione e sulla stabilità dei legami all'interno della matrice cementizia e, di conseguenza, sulle sue prestazioni. Maggiore è la quantità di materiale che va in soluzione, maggiore è la sua reattività e si può affermare che maggiore è il grado di reazione e maggiore sarà la resistenza del materiale realizzato. Questo accade perché rimangono meno componenti inattivate all'interno della matrice finale che non contribuiscono alla resistenza meccanica [5, 56]. A tal proposito è importante che i precursori abbiano un alto contenuto di silice reattiva. Occorre infatti prediligere polveri ricche di silice amorfa rispetto alla fase cristallina che necessita di maggiore energia per essere coinvolta nel processo.

La prova è stata eseguita seguendo la procedura proposta da Lancellotti et al. [59]. Di seguito vengono riportati i passaggi effettuati, suddividendo la prova in 4 macrofasi:

1. Test alcalino: pesare 1 g di materiale all'interno del bicchiere di teflon (Figura 30a) e aggiungere alla polvere 100 ml di soluzione alcalina NaOH 8M. Mettere all'interno del bicchiere l'ancora magnetica (Figura 30b) e chiudere il bicchiere con il tappo in teflon con il nastro adesivo. È necessario utilizzare un contenitore in teflon perché la soluzione verrà successivamente scaldata e il contenitore raggiungerà temperature elevate nella zona a contatto con la piastra riscaldante.

Accendere l'agitatore elettromagnetico con piastra riscaldante e posizionare il bicchiere chiuso sulla piastra (Figura 30c).



Figura 30: Peso della polvere (a); posizionamento dell'ancora magnetica (b); bicchiere di teflon caricato e posizionato sull'agitatore elettromagnetico (c).

Lasciare il contenitore con la soluzione per 5 h agitando a 80 ± 2 °C (temperatura della soluzione) e quindi filtrare la soluzione calda con l'aiuto di carta da filtro indurita da 5 μm posizionata in un imbuto sorretto da un supporto (Figura 31a). Una volta filtrato il liquido dalla polvere è necessario lavare il bicchiere in teflon con acqua distillata e filtrare, in modo da eliminare tutti i residui di soluzione alcalina. Utilizzare un bicchiere graduato in polipropilene da 1 L per raccogliere tutta la soluzione alcalina e l'acqua di lavaggio (Figura 31b). Riempire il bicchiere graduato con acqua di lavaggio fino a 350 ml.



Figura 31: Filtrazione della soluzione (a); lavaggio del bicchiere (b).

Al termine del lavaggio, la soluzione analizzata con la cartina tornasole risulta ancora fortemente basica, come visibile in Figura 32. Le cartine al tornasole sono cartine trattate con indicatori universali che permettono variazioni cromatiche in tutta la scala del pH.



Figura 32: pH basico delle soluzioni verificato con la cartina tornasole.

2. Acidificazione della soluzione alcalina: inserire all'interno del bicchiere graduato 100 ml di soluzione HNO_3 8M (acido nitrico) utilizzando una pipetta con capacità da 50 ml, per raggiungere un pH acido pari ad 1 per la misurazione all'ICP. È necessario fare attenzione perché quando la soluzione alcalina e quella acida si mescolano, la reazione è esotermica e viene rilasciato molto calore, perciò è bene mescolarle in un contenitore circondato da acqua e ghiaccio (Figura 33a).

La soluzione risultante ha pH pari ad 1 (Figura 33b).



Figura 33: Acidificazione della soluzione alcalina (a); pH acido delle soluzioni verificato con la cartina tornasole (b).

3. Portare a volume: una volta acidificata la soluzione, versarla in un matraccio tarato in polipropilene e portare al volume di 500 ml con acqua distillata (Figura 34a). Successivamente travasare e conservare la soluzione in contenitori con controtappo e tappo a vite (Figura 34b).

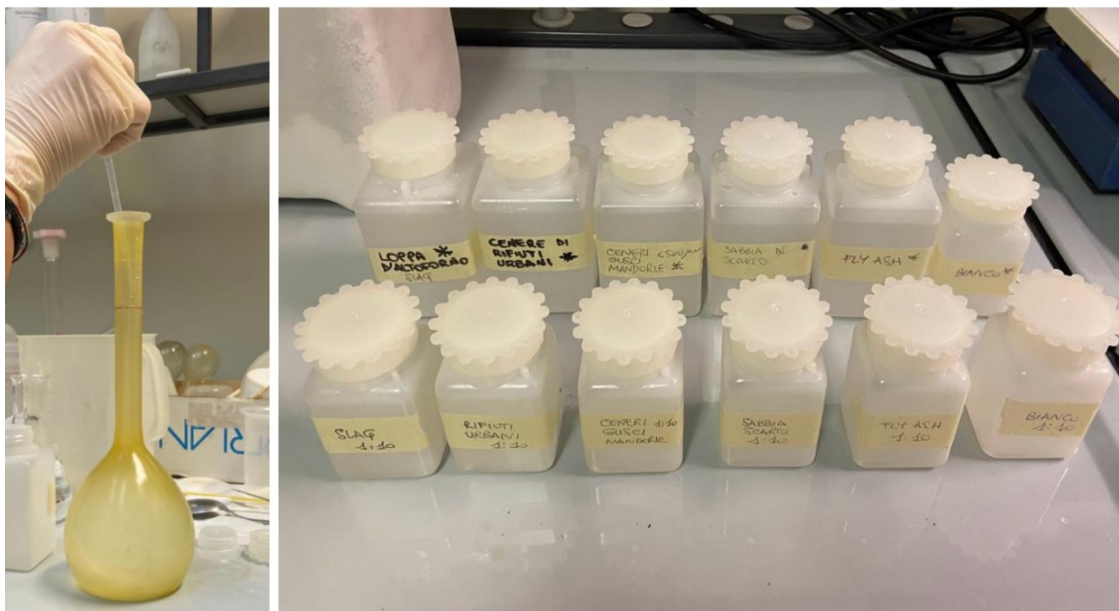


Figura 34: Soluzioni portate a volume con matraccio (a); contenitori con controtappo per conservare tutti i campioni da analizzare (b).

4. Risultati ottenuti con l'ICP-OES: i campioni preparati vengono analizzati con tecniche di spettrometria di emissione ottica, grazie all'ICP-OES, che è uno strumento versatile e preciso utilizzato nei laboratori chimici per la determinazione dei metalli. L'acronimo ICP-OES sta per "Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectroscopy". Con questa definizione si identifica uno strumento analitico in grado di misurare la luce (emissione ottica) prodotta da un campione liquido quando viene introdotto in un plasma di gas argon, accoppiato induttivamente. Attraverso questo meccanismo è possibile quantificare i metalli contenuti nel campione misurandone, per ognuno, l'intensità della luce emessa con specifico banco ottico (sistema di specchi, lenti e reticoli). Per la determinazione in ICP-OES è necessario avere campioni in forma liquida. L'ICP-OES (o ICP-AES) permette di determinare i metalli in concentrazioni molto variabili ed in molteplici matrici, motivo per cui risulta oggi la tecnica più versatile per la

determinazione dei metalli nelle acque, nei terreni, nei sedimenti o anche negli alimenti e nei prodotti petroliferi.

L'analisi è stata effettuata sui campioni acidificati. In particolare, sono stati analizzati gli elementi Al, Si, Ca, K, Fe e Mg con uno spettrometro ICP-OES PerkinElmer Optima 8300 (Tabella 3).

Tabella 3: Determinazione ICP-OES delle specie solubili di Si, Al, Ca, K, Fe e Mg (esprese come mg/L) in NaOH 8M a 80 °C.

Materiale	Si [mg/L]	Al [mg/L]	Ca [mg/L]	K [mg/L]	Fe [mg/L]	Mg [mg/L]
GGBFS	201	95	165	12	-	-
MS	106	46	14	44	-	-
ABA	91	26	62	514	-	-
MSWI	29	27	215	67	-	-

Dai risultati ottenuti si nota che la GGBFS ha un elevato contenuto di Si, Ca e Al reattivi. L'ABA ha un altissimo contenuto di K, Si e Ca, la MS di Si, Al e K e la MSWI di Ca e K.

Gli esiti della prova di reattività confermano i risultati ottenuti dalle prov e XDR e SEM-EDX.

3.1.5. Calcolo della densità

La densità dei precursori deve necessariamente essere calcolata per poter realizzare i mix design e calcolare di volta in volta la quantità in peso di legante necessaria per ogni miscela. La densità delle polveri si misura disponendo di una bilancia di precisione e di un picnometro calibrato che consente la misurazione della densità dei solidi e dei liquidi. È costituito da un'ampolla in vetro chiusa con un tappo dotato di capillare per definire il livello di liquido costante. Il picnometro utilizzato per eseguire la prova ha capacità 100 ml.

I passaggi da seguire per eseguire correttamente la prova sono i seguenti:

1. Pesare il picnometro vuoto, asciutto e perfettamente pulito (Figura 35). Una volta presa la misura, tarare la bilancia (m_{pic}).

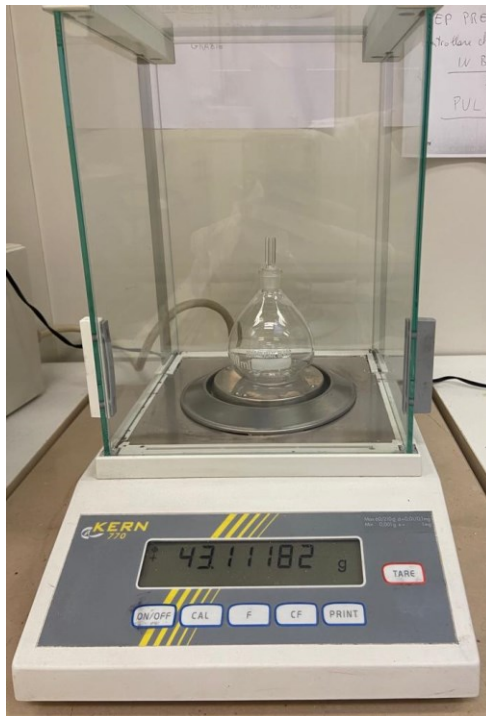


Figura 35: Pesatura picnometro vuoto.

2. Inserire circa 1 g del materiale di cui si vuole calcolare la densità (Figura 36a). Prendere la misura e tarare la bilancia (m_s) (Figura 36b).



Figura 36: Inserimento polveri tramite imbuto (a); pesatura picnometro con polvere (b).

3. Riempire il picnometro con acqua distillata, utilizzando una pipetta per non far sollevare la polvere (Figura 37a). Attendere che tutte le particelle di depositino sul fondo dell'ampolla (Figura 37b) e che l'acqua torni limpida. Posizionare il tappo evitando la formazione di bolle all'interno del capillare, asciugare perfettamente l'ampolla e prendere la misura (m_2) (Figura 37c).



Figura 37: Uso della pipetta per riempire il picnometro (a); picnometro con acqua e polvere in sospensione (b); pesatura picnometro con acqua e polvere(c).

4. Svuotare il picnometro e pulirlo alla perfezione. In questo caso è stata utilizzata una macchina di pulizia ad ultrasuoni per un tempo di due minuti (Figura 38).



Figura 38: Pulizia del picnometro con bagno ad ultrasuoni.

5. Riempire il picnometro con acqua distillata e di nuovo posizionare il tappo evitando la formazione di bolle nel capillare. Prendere la misura $m_{pic,w}$ (Figura 39).

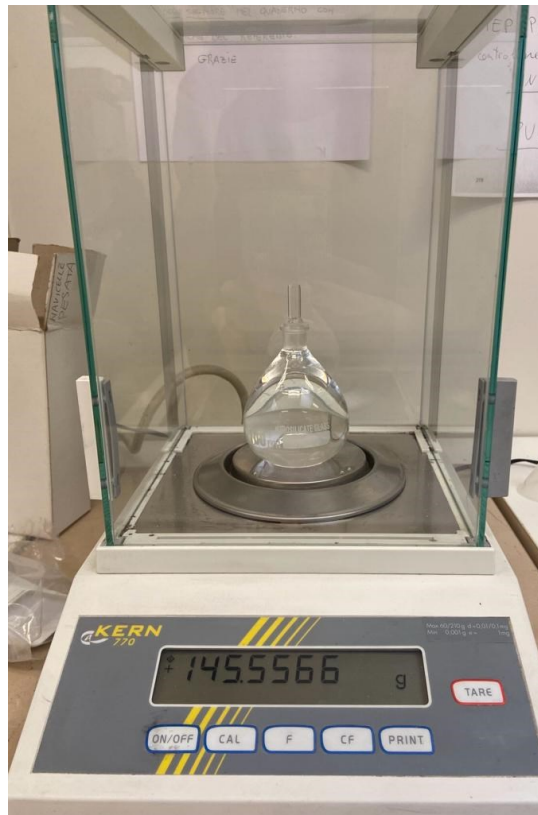


Figura 39: Pesatura picnometro riempito con acqua distillata.

La densità del materiale è data dalla seguente formula:

$$\rho_s = \frac{\rho_A \cdot m_s}{m_1 - m_2}$$

dove:

ρ_A = densità dell'acqua distillata che a 20°C è pari a 0,9982071 [g/cm³];

$m_1 = m_{pic,w} - m_{pic}$ = peso dell'acqua contenuta all'interno del picnometro [g].

La procedura viene ripetuta tre volte per ogni materiale da caratterizzare, così da attenuare gli errori strumentali ed ottenere una misura della densità più veritiera. La densità dei materiali mediata è riportata in Tabella 4:

Tabella 4: Dati raccolti durante la prova per il calcolo della densità.

Materiale	n° misura	m_{pic} [g]	m_s [g]	m_2 [g]	$m_{pic,w}$ [g]	m_1 [g]	ρ_s [g/cm ³]
MS	1	43,11113	1,00749	102,00330	145,46490	102,38697	2,6212
	2	43,11141	1,00749	101,94180	145,46490	102,35349	2,4428
	3	43,11189	1,00690	101,95250	145,47020	102,35831	2,4768
ABA	1	43,11539	1,00510	101,93680	145,49490	102,37951	2,2663
	2	43,11166	1,03443	101,93760	145,50530	102,39364	2,2642
	3	43,11403	1,07120	101,92100	145,50930	102,39527	2,2546
MSWI	1	43,11195	1,06239	101,94500	145,46580	102,35385	2,5938
	2	43,11184	1,00430	101,96320	145,51020	102,39836	2,3037
	3	43,11212	1,00334	101,94570	145,48630	102,37418	2,3374

3.1.6. Calcolo del pH

Il calcolo del pH è stato effettuato con l'obiettivo di comprendere la capacità di un materiale di fungere da attivatore. Per dissolvere i precursori dell'alluminosilicato e avviare l'attivazione, alcuni studiosi [60] hanno verificato che risultano buoni attivatori per alcali attivati i materiali con un pH superiore ad 11.

Sono state eseguite le misurazioni del pH di tutti i precursori utilizzati: GGBFS, MS, ABA e MSWI. I campioni per la prova sono stati preparati in un becher di vetro, mettendo al suo interno 5 g di polvere (Figura 41a) e 50 g di acqua distillata (Figura 41b) e un'ancora magnetica. Ogni becher viene sigillato con il parafilm e tenuto 30 minuti su un agitatore elettromagnetico (Figura 41c).

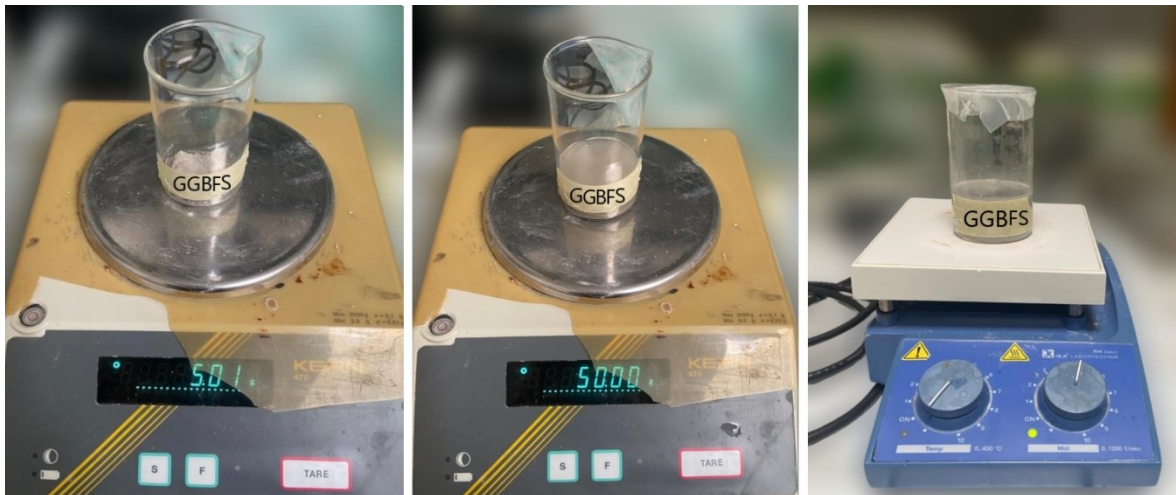


Figura 41: Pesatura polvere (a); pesatura acqua (b); posizionamento del campione sull'agitatore elettromagnetico (c).

L'analisi del pH è stata effettuata utilizzando il pH-metro da banco "XS pH 60 VioLab". È stata fatta una curva di calibrazione a due punti con uno std (standard) a pH acido, 4.11, ed uno std con valore di pH basico, 12.45, come riportato dal grafico sottostante (Figura 40):

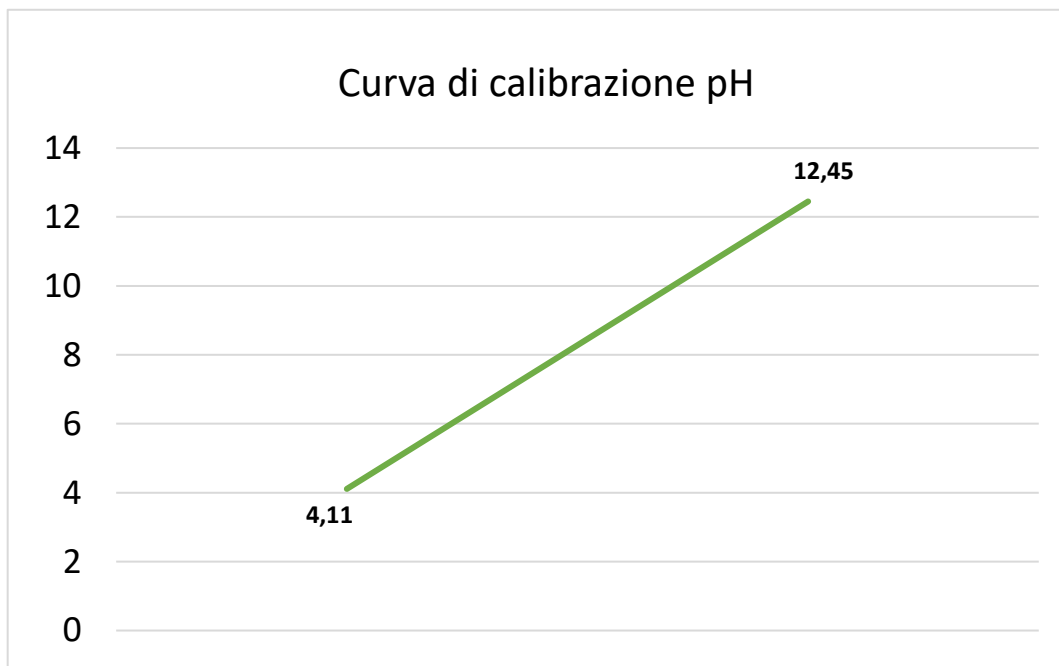


Figura 40: Grafico curva di calibrazione pH.

Lo strumento è dotato di un elettrodo che viene immerso nel campione di cui si vuole conoscere il pH. Una pila interna allo strumento produce corrente elettrica, che passa all'interno di un tubicino di vetro poroso, arrivando fino alla sostanza. In base alle modifiche che la corrente elettrica subisce a causa degli ioni, viene stabilito il pH (Figura 42a).

A seguito della prova è buona prassi eseguire un controllo del pH tramite la cartina al tornasole (Figura 42b).

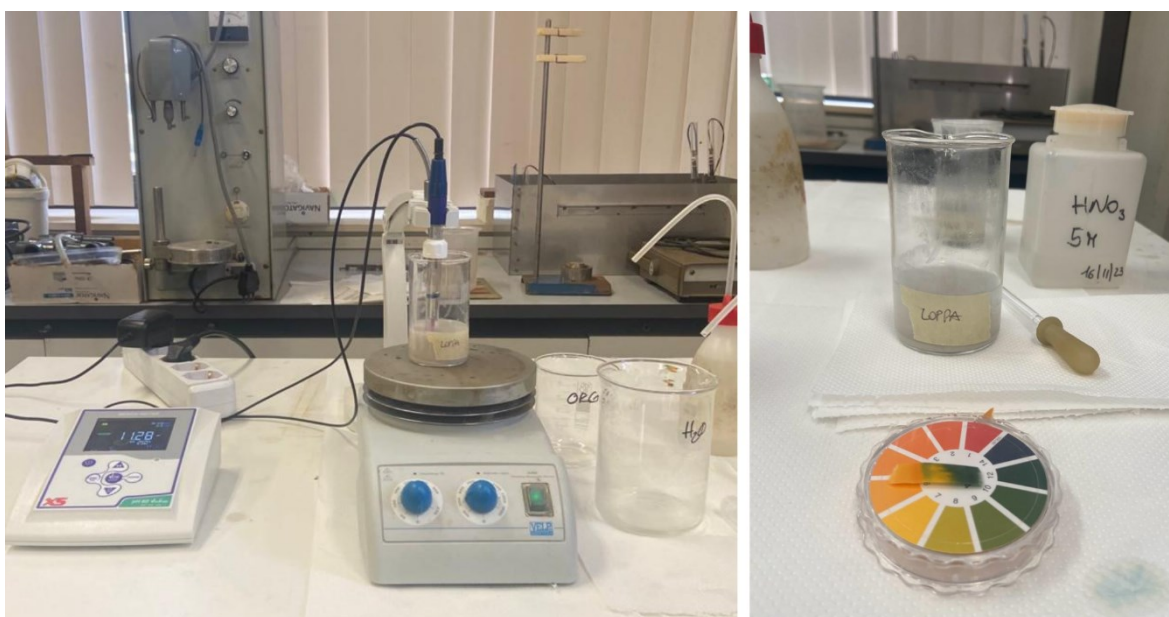


Figura 42: Rilevamento del pH con pH-metro da banco (a); verifica del pH con cartina tornasole (b).

Si è proceduto così alla misurazione dei valori di pH dei rispettivi campioni, ottenendo i risultati visibili in Tabella 5.

Materiale	pH
GGBFS	12,28
MS	8,58
ABA	12,47
MSWI	11,21

Tabella 5: Risultati dei pH di tutti i materiali sottoposti all'analisi.

Tutti valori che rientrano nella curva di calibrazione, tranne quello rilevato per l'ABA. Il pH risulta leggermente superiore rispetto alla curva di calibrazione, ma rientra nel range di errore dello strumento.

I risultati ottenuti confermano che la cenere di biomassa (ABA) e la cenere di rifiuti urbani (MSWI) potenzialmente potrebbero essere usati come attivatori. Per studi futuri, invece che impiegarli in sostituzione della GGBFS e quindi come precursori, potrebbe essere interessante valutare il loro comportamento in sostituzione del NaOH. Questo permetterebbe di minimizzare anche l'impatto ambientale causato dall'attivatore che, come spiegato in precedenza, è il maggior responsabile delle emissioni di CO₂ prodotte dai materiali attivati alcalinamente.

3.2. Le fasi del mix design

La progettazione accurata del mix design, ovvero della miscela, è un'operazione che richiede un'approfondita comprensione delle proprietà fisiche e chimiche dei materiali costituenti, nonché delle specifiche prestazioni richieste per la successiva applicazione di ogni impasto.

La progettazione del mix design delle malte oggetto di studio è possibile grazie all'insieme di prove effettuate precedentemente. Al fine di ottenere al primo tentativo la miscela con le caratteristiche che si ricercano, è bene fare alcune prove preliminari. A questo scopo vengono realizzate delle pastine di prova, sulla base di una bozza di mix design.

I progetti preliminari delle miscele prevedono che la GGBFS venga presa come riferimento, realizzando per ogni w/s e molarità, un mix design che abbia il 100% di GGBFS come legante. Si procede calcolando le altre miscele sostituendo prima il 25%, il 50%, il 75% ed infine il 100% in peso della loppa d'altoforno con gli altri precursori (MS, ABA e MSWI). Tutte le miscele vengono attivate con soluzione alcalina sia 4M che 8M. Il parametro chiave che permette la confrontabilità di tutti gli impasti è la lavorabilità. I mix design verranno calcolati per far sì che tutti i provini di cui si vogliono comparare le caratteristiche meccaniche, fisiche e chimiche, abbiano pari lavorabilità.

3.2.1. Paste di prova

Nonostante l'accurata caratterizzazione dei precursori, la realizzazione di paste di prova per verificare in modo pratico il comportamento dei materiali riduce al minimo la possibilità di imprevisti. Tale approccio consente di valutare in modo approssimativo la consistenza, la presa e l'indurimento del materiale attivato alcalinamente. Inoltre, conoscere a priori il parziale comportamento dei precursori permette di aggiustare il mix design secondo le necessità o addirittura escludere uno o più materiali dalla ricerca perché non idonei allo scopo.

Le pastine vengono realizzate seguendo una bozza di mix design calcolata con basi teoriche. Le miscele per le pastine sono state calcolate considerando sia per gli impasti 4M che per gli impasti 8M un $w/s = 0,38$ per MSWI, MS e ABA.

Il rapporto acqua/solidi (w/s) è una metrica chiave nella progettazione degli impasti cementizi, che indica la quantità di acqua usata per legare una determinata quantità di solidi. In questo contesto, i solidi comprendono sia la soda in scaglie, che il precursore in polvere. Un w/s più basso implica una maggiore quantità di solidi rispetto all'acqua, influenzando la resistenza del materiale.

La preparazione delle pastine deve essere effettuata seguendo una procedura accurata per ottenere risultati rappresentativi. La quantità di attivatore, di acqua e di legante devono essere attentamente misurate, in conformità al mix design. In questa fase, si valuta visivamente la fluidità, manualmente la consistenza delle pastine di prova e l'indurimento a 2 giorni. Si regolano quindi le quantità delle componenti per ottenere la lavorabilità che si sta ricercando, informazioni preziose per il calcolo dei mix design definitivi.

3.2.1.1. Impasti freschi

Durante la preparazione degli impasti, si è riscontrato che tutti gli impasti ottenuti con un'alta percentuale di MSWI non erano lavorabili (Figura 43). È stato necessario alzare il contenuto d'acqua e prepararle con $w/s = 0,56$.



Figura 43: Pastina di MSWI $w/s=0,38$ non lavorabile.

Realizzare le paste è fondamentale anche per far emergere eventuali comportamenti imprevisti dell'impasto. Le paste di prova contenenti MSWI hanno manifestato sin da subito una reazione espansiva. Questo comportamento, visibile in Figura 44, può essere attribuito alla presenza di componenti reattivi nella cenere.

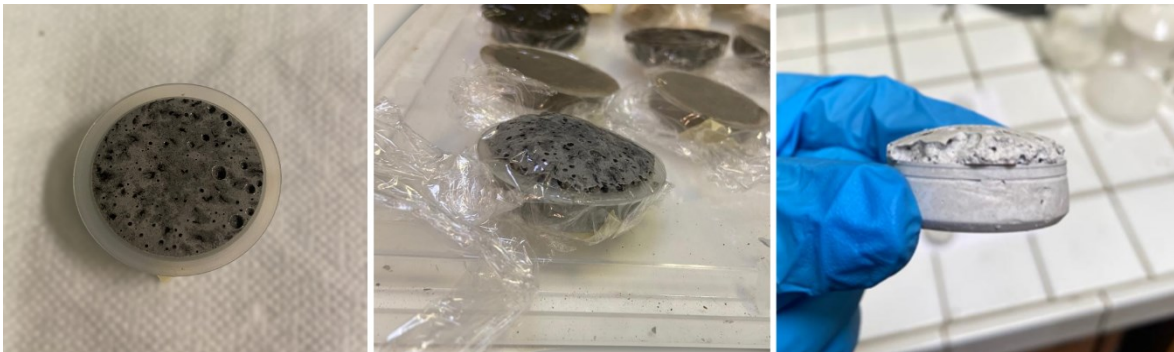


Figura 44: Pastina MSWI all'inizio della reazione espansiva (a); pastina MSWI al termine della fase espansiva (b), pastina MSWI indurita (c).

Diverse ricerche hanno dimostrato che le ceneri di rifiuti solidi urbani sono potenzialmente interessanti come aggiunta minerale per la produzione di calcestruzzo, a condizione che venga impedito il rischio di intrappolamento di bolle di idrogeno prodotte dalla corrosione delle particelle metalliche di alluminio nel calcestruzzo fresco.

I risultati del SEM hanno riscontrato presenza di alluminio (Al) e zinco (Zn) nella MSWI. In questa reazione, l'alluminio e lo zinco reagiscono con l'idrossido di sodio (NaOH) e l'acqua (H₂O) per formare idrogeno (H₂). Il gas idrogeno è liberato sotto forma di bolle, causando un effetto espansivo. Il gas rimane intrappolato nel materiale fresco, impedendo di controllare l'espansione e producendo una rete di bolle che porta ad una significativa riduzione della resistenza ed ad un aumento della permeabilità del calcestruzzo indurito [32]. Inoltre, l'espansione non controllata impedisce la messa in opera. A causa degli effetti collaterali di questa reazione, la cenere di rifiuti solidi urbani (MSWI) non permette di essere utilizzata come precursore alcalino in questa ricerca.

Questo materiale potrebbe però essere utilizzato in contesti in cui le proprietà espansive possono essere sfruttate per soddisfare specifiche esigenze applicative. Una potenziale applicazione per le malte ad effetto espansivo è nei pannelli isolanti leggeri. La struttura porosa di queste malte fa sì che possano essere utilizzate come isolante termico, contribuendo a ridurre la dispersione di calore attraverso le pareti. La porosità potrebbe essere sfruttata anche per l'isolamento acustico, in quanto contribuisce a intrappolare e dissipare le onde sonore offrendo un'opzione leggera per migliorare anche l'acustica degli ambienti.

Nonostante MSWI non possa essere utilizzata per lo scopo della presente tesi, è comunque un materiale interessante che studiato e perfezionato, apre la strada ad altre applicazioni.

3.2.1.2. Paste indurite

È importante monitorare il processo di presa ed indurimento delle pastine. Le paste sono state lasciate maturare 2 giorni, dopodiché si è valutata la presa e approssimativamente la durezza. La scala di durezza va da 1 a 10 e in Figura 45 e Figura 46 sono riportati i risultati valutati per ogni pastina realizzata. Le paste all'interno del riquadro rosso sono quelle con le più alte percentuali di GGBFS ed hanno dimostrato una rapida presa, buon indurimento e adeguata lavorabilità.

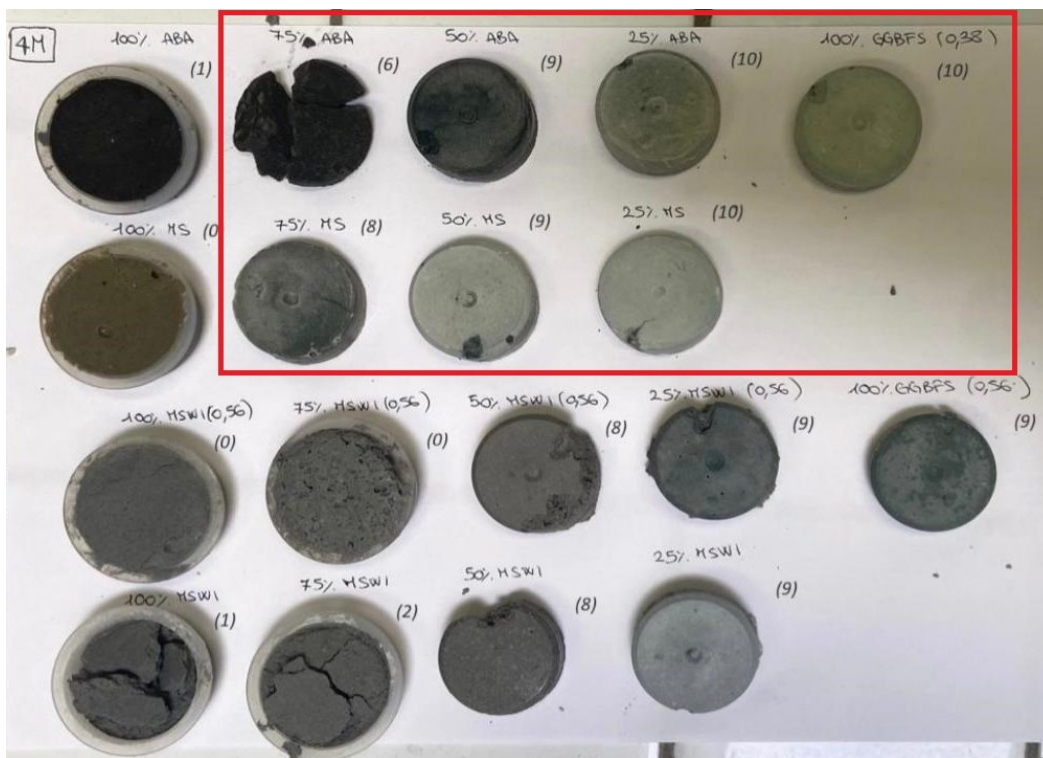


Figura 45: Pastine di prova 4M a 2 giorni con relativa durezza.

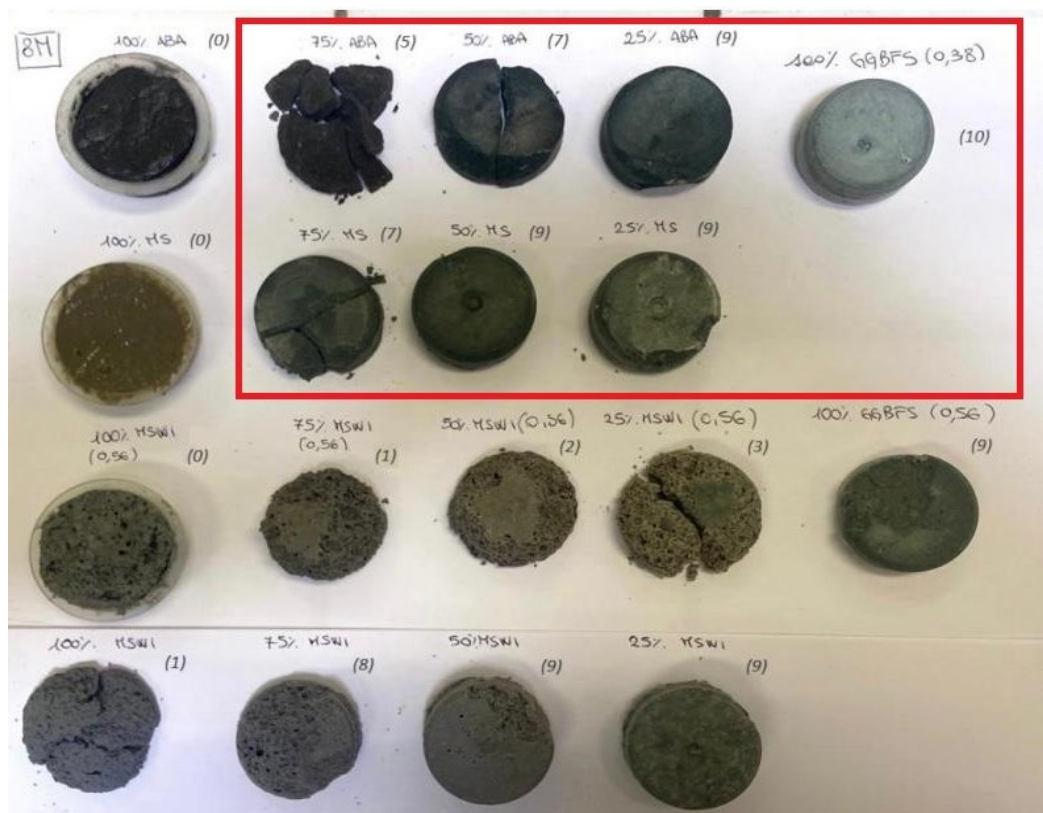


Figura 46: Pastine di prova 8M a 2 giorni con relativa durezza.

Tutte le paste realizzate sostituendo il 100% della loppa con i precursori, ossia 100% ABA, 100% MS e 100% MSWI sia 4M che 8M, hanno ottenuto risultati di durezza molto bassi. Il 100% ABA e 100% MS a 2 giorni non hanno terminato il processo di presa risultando morbide al tatto. Il 100% MSWI ha terminato la presa ma è risultato friabile a causa dell'elevata porosità. Per questo motivo, i mix design che sono stati approfonditi e portati avanti nello studio risultano quelli relativi alle paste riquadrate in rosso in Figura 45 e Figura 46.

Nel capitolo successivo verranno mostrati i mix design definitivi per le combinazioni di materiali che hanno restituito risultati migliori.

3.2.2. Mix design

Come spiegato precedentemente, il parametro che si intende usare per poter confrontare i diversi impasti è la lavorabilità. Durante la realizzazione delle pastine di prova si è riscontrato che a parità di w/s e di tipo di precursori, le pastine attivate con la soluzione 8M erano leggermente più fluide rispetto a quelle 4M. Per questo motivo, per ottenere la pari lavorabilità degli impasti è risultato necessario modificare w/s tra i mix design 4M e 8M.

Con l'obiettivo di ottenere degli impasti con lavorabilità plastica (plastic mortar) tra 140 e 200 mm secondo la norma *UNI EN 1015-6:2007*, i mix design con molarità pari a 4 sono stati calcolati con un $w/s= 0,5$ mentre quelli con molarità pari ad 8 con $w/s=0,45$ (Tabella 6). Per ottenere impasti con consistenza rigida (stiff mortar) minore di 140 mm secondo la suddetta norma, i mix design con molarità pari a 4 sono stati calcolati con un $w/s= 0,40$ mentre quelli con molarità pari ad 8 con $w/s=0,35$ (Tabella 7).

Tabella 6: Mix design di tutti gli impasti per cui si vuole ottenere consistenza plastica.

PLASTIC MORTAR						
MIXTURES NaOH 4M (w/s = 0.50)						
Mixture	ABA [g]	GGBFS [g]	NaOH SOLUTION		S.S.A. SAND	
			NaOH [g]	WATER [g]	DRY SAND [g]	WATER [g]
75% ABA + 25% GGBFS	357	119	41	257	1353	74
50% ABA + 50% GGBFS	240	240	41	259	1365	75
25% ABA + 75% GGBFS	121	363	42	261	1377	76
Mixture	MS [g]	GGBFS [g]	NaOH SOLUTION		S.S.A. SAND	
			NaOH [g]	WATER [g]	DRY SAND [g]	WATER [g]
75% MS+ 25% GGBFS	363	121	42	261	1375	76
50% MS + 50% GGBFS	243	243	42	262	1380	76
25% MS + 75% GGBFS	122	365	42	263	1384	76
100% GGBFS	0	488	42	264	1389	76
MIXTURES NaOH 8M (w/s = 0.45)						
Mixture	ABA [g]	GGBFS [g]	NaOH SOLUTION		S.S.A. SAND	
			NaOH [g]	WATER [g]	DRY SAND [g]	WATER [g]
75% ABA + 25% GGBFS	356	119	81	252	1351	74
50% ABA + 50% GGBFS	240	240	81	254	1363	75
25% ABA + 75% GGBFS	121	362	82	256	1374	76
Mixture	MS [g]	GGBFS [g]	NaOH SOLUTION		S.S.A. SAND	
			NaOH [g]	WATER [g]	DRY SAND [g]	WATER [g]
75% MS + 25% GGBFS	362	121	82	256	1373	75
50% MS + 50% GGBFS	242	242	82	257	1377	76
25% MS + 75% GGBFS	121	364	82	258	1382	76
100% GGBFS	0	488	83	258	1386	76

Tabella 7: Mix design di tutti gli impasti per cui si vuole ottenere consistenza rigida.

STIFF MORTAR						
MIXTURES NaOH 4M (w/s = 0.40)						
Mixture	ABA [g]	GGBFS [g]	NaOH SOLUTION		S.S.A. SAND	
			NaOH [g]	WATER [g]	DRY SAND [g]	WATER [g]
50% ABA + 50% GGBFS	254	254	35	218	1442	79
25% ABA + 75% GGBFS	128	384	35	220	1455	80
100% GGBFS	0	516	36	222	1469	81
MIXTURES NaOH 8M (w/s = 0.35)						
Mixture	ABA [g]	GGBFS [g]	NaOH SOLUTION		S.S.A. SAND	
			NaOH [g]	WATER [g]	DRY SAND [g]	WATER [g]
50% ABA + 50% GGBFS	256	256	66	205	1456	80
25% ABA + 75% GGBFS	129	388	66	207	1470	81
100% GGBFS	0	522	67	209	1484	82

Oltre ai rapporti chimici, anche la relazione tra la fase liquida e la fase solida (w/s) è molto importante perché influenza sia il comportamento del materiale in termini di proprietà reologiche nello stato fresco, sia la porosità, sia le sue proprietà meccaniche [61, 62, 63]. L'aumento del contenuto di acqua a parità delle altre componenti nel mix design, ovvero l'aumento del w/s, porta a una diminuzione della resistenza, soprattutto a compressione. L'acqua non reagita, ovvero che non ha partecipato al processo di idratazione, finita la fase di stagionatura evapora lasciando dei vuoti. Al contrario un w/s eccessivamente basso può comportare perdite di resistenza meccanica perché non c'è acqua sufficiente per far avvenire correttamente il processo di geopolimerizzazione.

Nei mix design riportati in Tabella 6 e Tabella 7 è possibile vedere chiaramente il modo di procedere. Il riferimento è sempre l'impasto con il 100% di GGBFS come precursore, al quale viene sostituito il 25%, il 50% e il 75% in peso con gli altri materiali, ossia ABA e MS.

La sezione "NaOH SOLUTION" nelle tabelle precedenti indica il quantitativo di soda caustica e di acqua necessari per la preparazione della soluzione attivante per entrambe le molarità, 4M e 8M.

La sezione "S.S.A. SAND" invece indica il quantitativo di inerte e di acqua necessario per rendere l'aggregato saturo a superficie asciutta (s.s.a.).

L'inerte utilizzato è un ghiaino con diametro massimo pari a 8 cm. Viene prima essiccato e poi reso s.s.a. aggiungendo il 5,5% in peso di acqua, ovvero viene portato nella condizione in cui i pori interni sono saturi d'acqua, mentre la superficie esterna è asciutta. In questo modo, quando la sabbia viene inserita nell'impasto non assorbe e non rilascia acqua e il rapporto w/s non viene modificato, così come la lavorabilità e la resistenza. Questo passaggio è fondamentale nella realizzazione di materiali attivati alcalinamente perché sono molto sensibili alla variazione del contenuto d'acqua.

3.3. Preparazione dei provini

Nel presente capitolo verranno affrontate le fasi necessarie alla realizzazione dei provini alcali attivati. In primo luogo, si riporterà la scelta dei casseri, giustificando la necessaria

selezione. Successivamente, verrà indicata la sequenza di operazioni per la preparazione degli impasti, comprensiva di una prova di spandimento per valutare l'effettiva lavorabilità dei materiali. Si procederà poi all'illustrazione della fase di getto, scasseratura e stagionatura mettendo in luce l'importanza di queste operazioni nella produzione di provini di qualità.

3.3.1. Casseri

I casseri devono garantire la stabilità e l'integrità del getto durante il processo di formatura e successiva scasseratura.

Per modellare la forma dei provini alcali-attivati sono stati scelti dei casseri in plastica (Figura 47). La soda caustica presente nella soluzione utilizzata per attivare i provini è altamente corrosiva, ma la plastica non soffre la corrosione. Inoltre, l'operazione di scasseratura per casseri in plastica è agevole perché i provini vengono estratti dal cassero in modo pulito, veloce e preciso con l'aria compressa. Però la rimozione dei provini da questi casseri è un'operazione che sollecita i provini e perciò, dato che lo scasso avviene a 2 giorni di stagionatura, può essere un problema per quelli che si presumono essere meno resistenti. Se viene compromessa l'integrità dei provini, vengono invalidati anche i risultati dei test di resistenza successivi. Per questa ragione è stato deciso che per gli impasti con 75% MS e 75% ABA, ovvero quelli teoricamente meno resistenti perché contenenti solo il 25% di GGBFS, saranno utilizzati dei casseri in acciaio.



Figura 47: Casseri in plastica.

I casseri in acciaio (Figura 48a) infatti possono essere montati e smontati. Il cassero viene smontato attorno al provino, che viene liberato senza essere sollecitato, evitando il rischio di danneggiare i provini.

La soda caustica innesca il processo di corrosione dei casseri in acciaio, perciò tutti i casseri in metallo sono stati ricoperti con un sottile strato di scotch per evitarne il deterioramento (Figura 48b).



Figura 48: Cassero in acciaio (a); casseri in acciaio ricoperti con scotch (b).

Prima del getto tutti gli stampi devono essere perfettamente puliti ed è necessario lubrificare le facce interne con un sottile strato di disarmante per facilitare la scasseratura.

3.3.2. Impasti

In questa sezione, si fornirà una panoramica dettagliata di tutti i passaggi eseguiti per la produzione degli impasti per realizzare provini alcali-attivati (Figura 49).

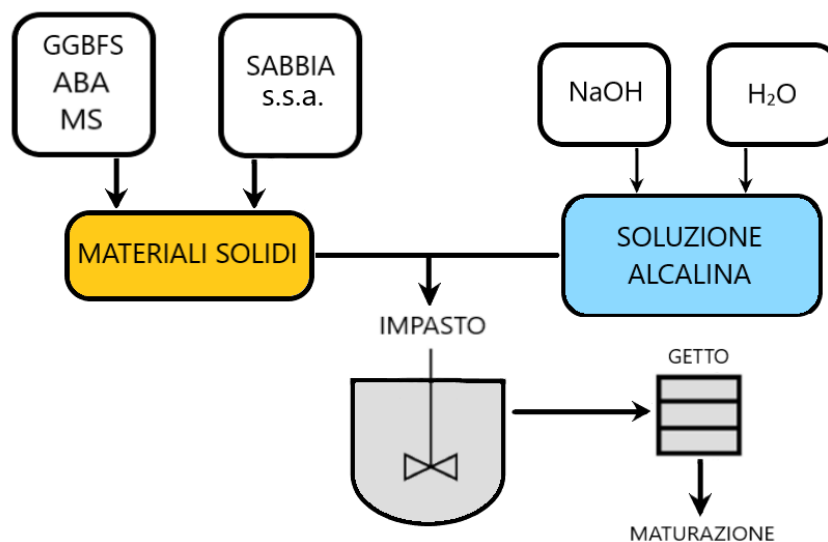


Figura 49: Schematizzazione degli step necessari alla realizzazione dei provini alcali-attivati.

Le quantità degli elementi necessari per la realizzazione di ogni impasto sono specificate nei mix design presentati precedentemente.

Si inizia preparando le soluzioni alcaline. La quantità di soda indicata nel mix design viene pesata (Figura 50a) e versata in un contenitore con controtappo e tappo a vite (Figura 50b). Si tara la bilancia e si pesa la quantità d'acqua, versandola direttamente all'interno del contenitore (Figura 50c).



Figura 50: Pesatura della soda (a), posizionamento della soda nel contenitore che ospiterà la soluzione alcalina (b); pesatura acqua (c).

Quando la soda si dissolve in acqua la reazione è fortemente esotermica. Per questo motivo tutti i contenitori, al momento della reazione, sono stati posizionati all'interno di una pentola con del ghiaccio per evitare che la soluzione raggiungesse temperature troppo elevate. Quando tutta l' NaOH è completamente disciolta nell'acqua e il composto si è raffreddato, è possibile utilizzarlo per preparare gli impasti. Per arrivare a temperatura ambiente la soluzione attivante impiega alcune ore e inoltre il tempo di raffreddamento aumenta all'aumentare della molarità. Le soluzioni vengono quindi preparate il giorno prima di effettuare i getti e lasciate raffreddare (Figura 51).



Figura 51: Soluzioni alcaline.

La vera e propria preparazione degli impasti comincia pesando tutte le polveri (Figura 52), ovvero la quantità di precursore (GGBFS, ABA, MS) come indicate da progetto.



Figura 52: Pesatura delle polveri.

Successivamente vengono pesate l'acqua (Figura 53a) e la sabbia (Figura 53b), che vengono poi mescolate per rendere la sabbia saturata a superficie asciutta (s.s.a.), come spiegato precedentemente (Figura 53c).



Figura 53: Pesatura acqua (a), pesatura sabbia (b), sabbia resa s.s.a (c).

Si uniscono le polveri con la sabbia s.s.a. (Figura 54a) e si mescola per eliminare eventuali grumi e rendere la miscela omogenea (Figura 54b).



Figura 54: Unione delle polveri con la sabbia s.s.a. (a); omogeneizzazione della miscela (b).

Alla miscela viene aggiunta la soluzione attivante mescolando abbondantemente con trapano miscelatore (Figura 55a) fino a raggiungere un impasto omogeneo.

L'impasto pronto è per essere gettato nei casseri (Figura 55b), ma prima è bene verificare che si sia ottenuta la lavorabilità ricercata.



Figura 55: Omogeneizzazione impasto con trapano miscelatore (a); impasto omogeneo pronto per il getto (b).

3.3.3. Prova di spandimento troncoconico

La normativa *UNI EN 1015-3 "Metodi di prova per malte per opere murarie"* indica la procedura per la determinazione della consistenza della malta fresca, mediante l'uso di una tavola a scosse. La presente norma europea specifica un metodo atto a determinare la consistenza di malte appena impastate che viene determinata per mezzo del valore di fluidità.

La prova viene eseguita con un macchinario normato chiamato tavola a scosse (Figura 56). Come descritta nell'appendice A della norma, la macchina è composta dalle seguenti parti:

- un supporto, per la stabilizzazione;

- un albero orizzontale e una camma di sollevamento;
- un'asta mobile di sollevamento;
- una piastra piatta rigida e un disco.

Lo stampo a tronco di cono, anch'esso visibile in Figura 56, è in bronzo. Ha altezza $60 \pm 0,5$ mm e i diametri interno $100 \pm 0,5$ mm e $70 \text{ mm} \pm 0,5$ e le due basi sono perpendicolari al loro asse. La superficie interna e i bordi dello stampo sono lisci. Lo spessore minimo della parete dello stampo è di 14 mm.



Figura 56: Tavola a scosse e stampo troncoconico (con misure).

La prova viene eseguita su un campione di circa 900 g di malta fresca che, dopo essere stata miscelata, viene inserita all'interno dello stampo troncoconico posizionato al centro del disco (Figura 57a). Si dispone la malta in due strati, ciascuno dei quali deve essere costipato mediante almeno 10 brevi colpi di pestello per garantire un riempimento uniforme dello

stampo (Figura 57b). Dopo circa 15 secondi, si solleva lentamente ed in verticale lo stampo troncoconico (Figura 57c). La tavola a scosse viene azionata ed effettua 15 colpi di seguito con frequenza costante (circa un colpo al secondo).



Figura 57: Riempimento dello stampo troncoconico (a); costipamento della malta (b); rimozione dello stampo troncoconico (c).

Si misura il diametro della focaccia di malta nelle due direzioni perpendicolari tra loro utilizzando un calibro (D_1 e D_2). Il diametro di diffusione che caratterizza la consistenza della malta è il valore medio delle due misure, riportate in millimetri (D_m). Attraverso la tabella sottostante (Tabella 8) è possibile ricavare la classe di consistenza della malta secondo la norma *UNI EN 1015-6:2007*.

Consistence in use	Flow value mm
Stiff mortar	< 140 mm
Plastic mortar	140 mm to 200 mm
Soft mortar	> 200 mm

Tabella 8: Classi di consistenza delle malte secondo la *UNI EN 1015-6:2007*.

3.3.4. Getto e scasseratura

Dopo aver individuato la classe di consistenza, gli impasti vengono versati negli appositi casseri preparati in precedenza (Figura 58a). La procedura di getto avviene seguendo le indicazioni del prospetto 1 della normativa *UNI EN 1015-11:2007 "Metodi di prova per malte per opere murarie"* in vista dei test meccanici che verranno effettuati successivamente.

Lo stampo viene riempito suddividendo il getto in due, riempiendo metà cassero e costipandolo a colpi di pestello affinché il materiale si distribuisca in modo uniforme e non vi siano bolle d'aria, per poi gettare il secondo strato ripetendo la procedura. Si rimuove l'impasto in eccesso con una spatola, lasciando la superficie della malta piana e livellata alla parte superiore dello stampo (Figura 58b).



Figura 58: Getto dell'impasto all'interno del cassero (a); provini pronti per la fase stagionatura (b).

Il cassero viene coperto con pellicola e lasciato nella camera climatica a maturare, con condizioni di temperatura pari a 20 °C e umidità relativa 50%. La conservazione del calore e dell'umidità all'interno del conglomerato cementizio assicurano la

perfetta idratazione, con conseguenti ripercussioni positive sulla resistenza meccanica e durabilità, garantendo così il raggiungimento delle migliori caratteristiche prestazionali.

Lo scassero dei provini avviene a 2 giorni dal getto. I bordi dei singoli provini vengono limati per ridurre l'adesione al cassero (Figura 59a), poi si utilizza l'aria compressa che dà la spinta sufficiente a farli scivolare fuori (Figura 59b).



Figura 59: Limatura provini (a); scassatura tramite aria compressa (b).

Una coppia di provini viene testata a flessione e compressione per ottenere le resistenze a 2 giorni. I restanti provini vengono di nuovo ricoperti con la pellicola, etichettati e riposizionati nella camera climatica per completare la maturazione ed essere poi rotti a 7 e 28 giorni.

Di seguito vengono riportate le fotografie di tutti i provini a 2 giorni, appena tolti dal cassero (Figura 60, Figura 61 e Figura 62).

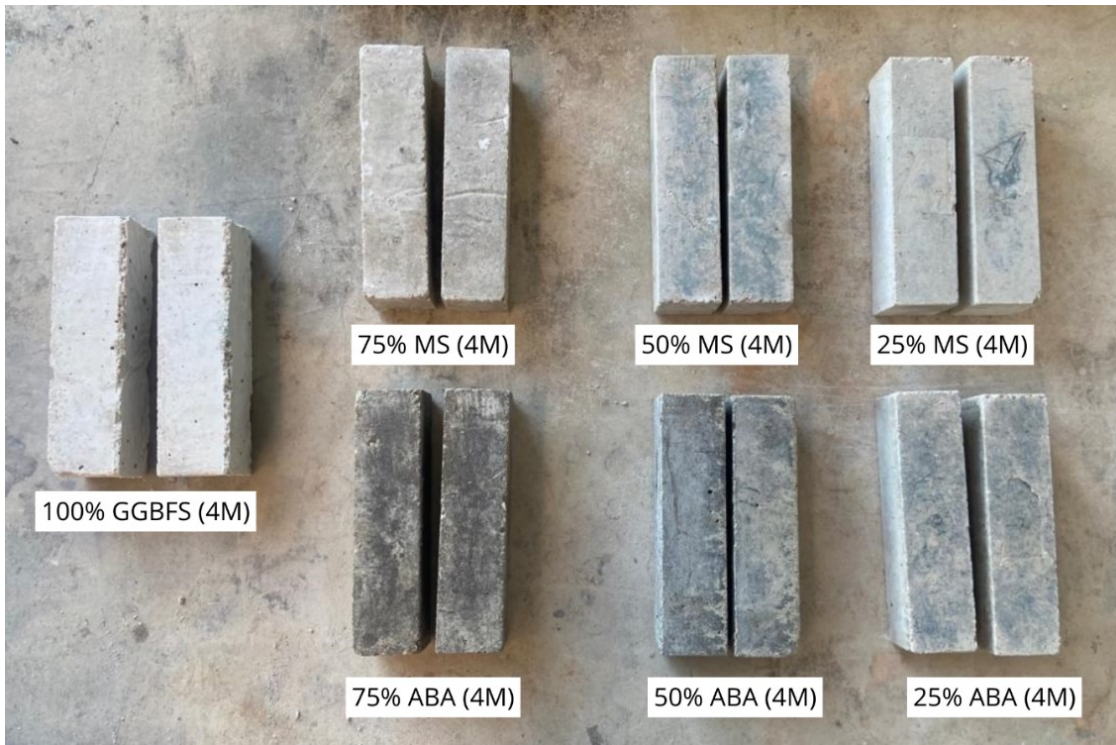


Figura 60: Provini 4M stagionati a 2 giorni.

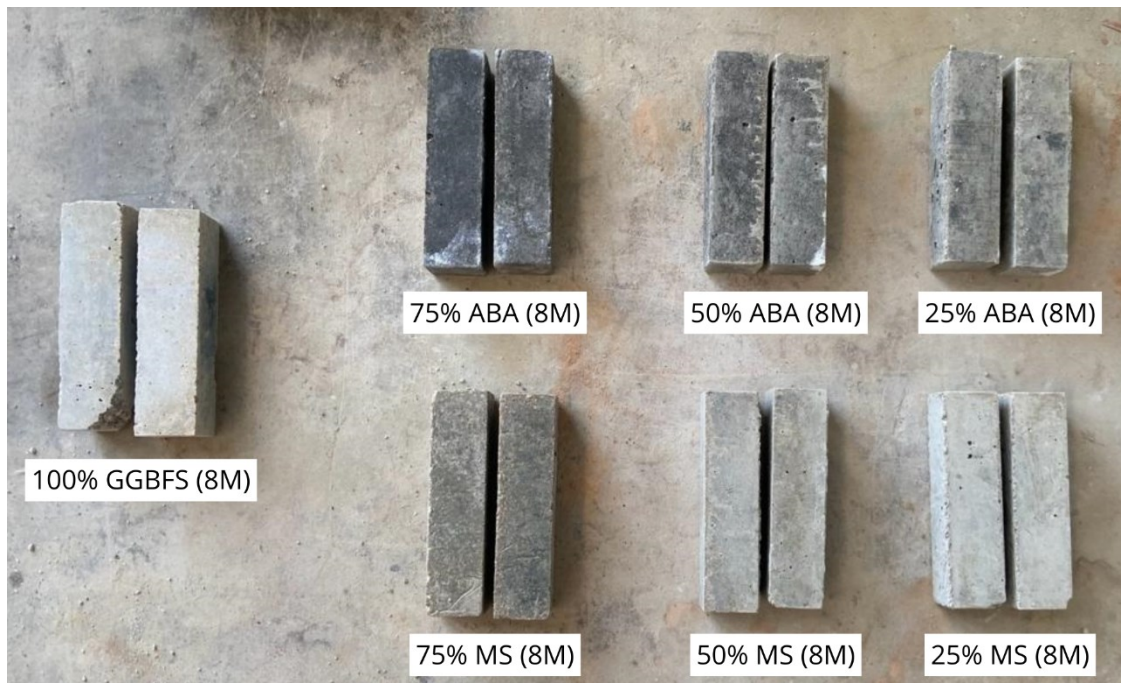


Figura 61: Provini 8M stagionati a 2 giorni.

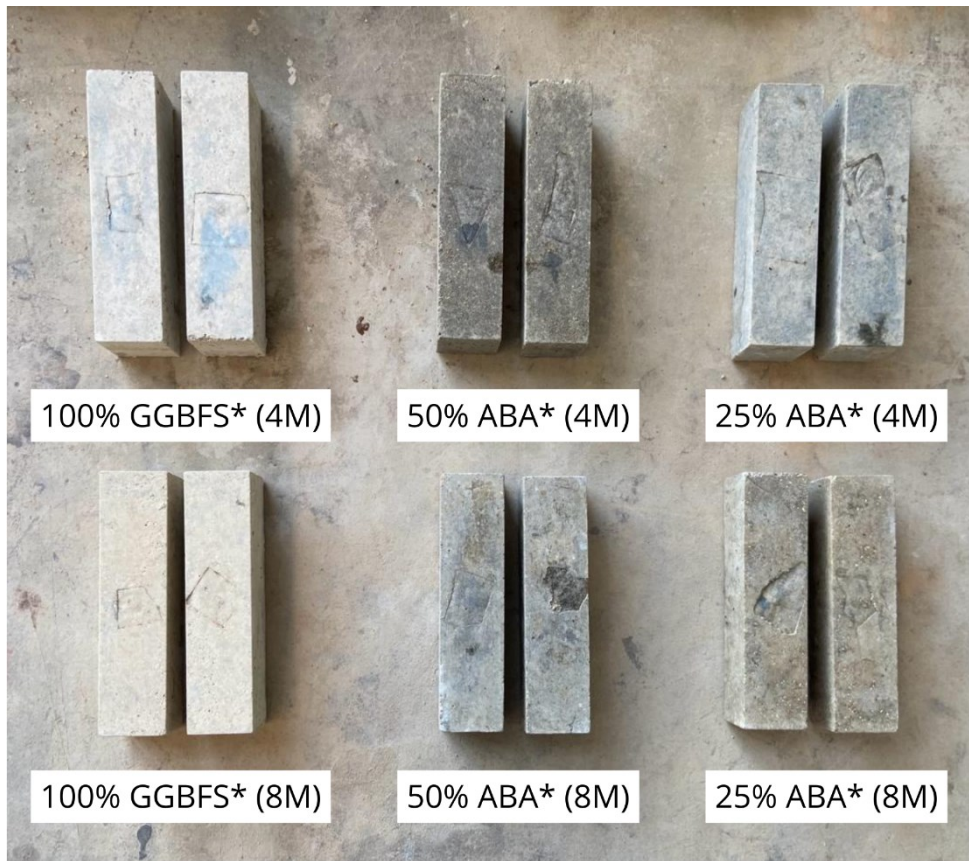


Figura 62: Provini 4M* e 8M* stagionati 2 giorni.

4. PROVE SULLE MALTE INDURITE

Nei seguenti sottocapitoli vengono illustrati tutti i test effettuati sui provini 4 x 4 x 16 cm³. Si eseguono le prove a flessione e compressione che permettono di caratterizzare la resistenza a flessione e compressione a 2, 7 e 28 giorni delle malte realizzate. La resistenza alla compressione viene utilizzata da molti ricercatori come metro di valutazione dell'avvenuta reazione di geopolimerizzazione [64], per questo è senza dubbio la caratteristica più indagata nei materiali attivati alcalinamente.

Viene poi calcolato il modulo elastico dinamico di tutti i provini, eseguendo indagini ultrasoniche.

Infine, viene valutata la tendenza di questi materiali attivati alcalinamente alla formazione di efflorescenze.

4.1. Prova di flessione

La resistenza a flessione dei provini 4 x 4 x 16 cm³ viene determinata mediante l'applicazione di un carico su tre punti sui provini di malta indurita precedentemente preparati, secondo la normativa *UNI EN 1015-11:2007 "Metodi di prova per malte per opere murarie – Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita"*. I provini sono stati testati a 2, 7 e 28 giorni.

La prova viene effettuata caricando il provino attraverso la cella di carico della pressa utilizzata per effettuare la prova (Figura 64). La cella di carico è collegata ad una centralina di acquisizione e rielaborazione dei dati che permette di ottenere i valori delle forze [N] esercitate durante la prova.

Rielaborando i dati, le forze vengono convertite in tensioni [N/mm²] con la seguente formula:

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

dove:

- $\bar{\sigma}_f$ = resistenza a flessione [N/mm^2];
- F = carico massimo applicato [N];
- l = distanza tra gli assi dei supporti, pari a 100 mm;
- b e h sono i lati della sezione quadrata del provino [mm], nel presente caso 40 mm (Figura 63);

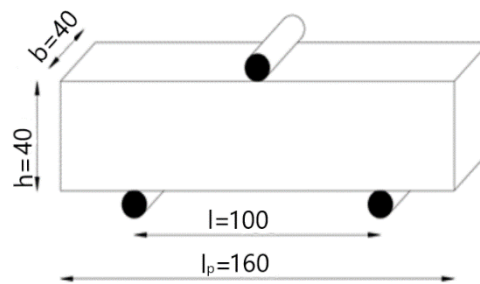


Figura 63: Schema della prova di flessione come da normativa UNI EN 1015-11:2007.



Figura 64: Macchina di compressione Galbadini usata nella sperimentazione (a); setup di prova a flessione prima e dopo la rottura (b).

4.2. Prova di compressione

I due spezzoni risultanti dalla prova di flessione sono stati sottoposti a prova di compressione semplice. La resistenza a compressione viene determinata mediante l'applicazione di un carico distribuito su un'area di 40 x 40 mm sul moncone del provino 4 x 4 x 16 cm³, secondo la normativa *UNI EN 1015-11:2007 "Metodi di prova per malte per opere murarie – Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita"*. I provini sono stati testati a 2, 7 e 28 giorni.

Come per la prova a flessione, lo spezzone viene caricato tramite la cella di carico della macchina utilizzata per effettuare la prova (Figura 64a), collegata ad una centralina di acquisizione e rielaborazione dei dati che permette di ottenere i valori delle forze [N] esercitate durante la prova.

La resistenza a compressione è stata determinata secondo la formula:

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

dove:

- σ_c = resistenza di compressione [N/mm²];
- F = forza di compressione [N];
- A = superficie di applicazione della forza F, pari a 1600 mm².



Figura 65: Setup di prova a compressione.

4.3. Indagini ultrasoniche

L'indagine ultrasonica è una prova non distruttiva applicabile alle malte ed ai calcestruzzi, con la quale è possibile determinare la velocità di propagazione degli impulsi delle onde longitudinali ultrasoniche nel calcestruzzo o nelle malte che hanno raggiunto la maturazione. Nel presente caso, la prova è stata svolta su tutti i provini al 28esimo giorno di stagionatura.

La prova è normata dalla *UNI EN 12504-4:2021 "Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici"*. La misurazione della velocità di propagazione dell'impulso ultrasonico può essere usata per le seguenti determinazioni:

- uniformità del calcestruzzo;

- presenza di fessure o vuoti;
- difetti di getto;
- variazioni delle proprietà nel tempo;
- modulo di elasticità dinamico.

In questo caso, la prova è stata svolta con il fine di conoscere il modulo elastico dinamico (E_d) di provini.

L'indagine ultrasonica sfrutta la relazione tra il modulo elastico dinamico (E_d) del materiale e la velocità (V) con la quale le onde ultrasoniche, applicate con una frequenza di 50 kHz, lo attraversano. Il calcolo viene effettuato utilizzando la formula:

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

dove:

- V è la velocità delle onde [m/s];
- E_d indica il modulo di elasticità dinamico [N/m²];
- ρ è la massa volumica del materiale espressa [kg/m³];
- ν è il modulo di Poisson supposto pari a 0,20 per tutti i provini;
- k è una costante dipendente dal modulo di Poisson ν e risulta pari a 1,05.

Lo strumento è composto da due sonde. La trasmittente che manda l'onda ultrasonica e la ricevente che riceve il segnale e lo manda al lettore di dati.

Prima di misurare la velocità di propagazione delle onde attraverso tutti i provini, lo strumento deve essere calibrato a 25,3 μ s tramite l'utilizzo di un cilindro centrale con funzione di calibro (Figura 66b).

La misura è fortemente influenzata dalla scabrosità delle superfici del materiale da testare.

Per ovviare al problema, prima di effettuare qualunque misurazione è importante che la superficie della sonda e l'area su cui questa poggerà vengano ricoperte di un sottile strato di grasso (Figura 66a e Figura 67a), in maniera tale che aderiscano perfettamente l'un l'altra.



Figura 66: Posizionamento sottile strato di grasso sulle sonde (a); calibrazione dello strumento (b).

Le sonde vengono posizionate sulle due basi minori dei provini (Figura 67b) e viene rilevato il tempo che le onde impiegano ad attraversarlo, partendo dalla sonda emittente e arrivando alla ricevente.



Figura 67: Posizionamento sottile strato di grasso sulle basi minori dei provini (a); misurazione del tempo di percorrenza delle onde ultrasoniche attraverso il provino (b).

Sapendo che la distanza alla quale le due sonde sono posizionate è di 16 cm, cioè la lunghezza del provino, è possibile calcolare la velocità (V) di propagazione delle onde all'interno del provino. In generale si rilevano riduzioni della velocità di propagazione quando nel materiale sono presenti zone di disaggregazione, fessurazioni e bolle d'aria.

La massa volumica (ρ) è stata valutata dividendo il peso di ogni provino (P) per il proprio volume apparente (256 cm³).

Invertendo la formula è stato possibile ricavare il modulo elastico dinamico di ogni provino.

4.4. Test delle efflorescenze

Le efflorescenze si presentano con la formazione di sostanze saline in forma di ciuffi o di piccoli filamenti biancastri, costituite da microscopici cristalli [25] sulla superficie dei materiali.

Si creano perché all'interno dei provini vi sono sali in soluzione. Rimangono disciolti nell'acqua d'impasto che non ha partecipato all'idratazione ed è rimasta libera. Quando i provini vengono lasciati all'aria, l'acqua libera (contenente sali in soluzione) in prossimità della superficie a contatto con l'aria, evapora. Al passaggio di stato dell'acqua, i sali cristallizzano sulla superficie dei provini.

I provini con lavorabilità plastica, dopo il periodo di stagionatura di 28 giorni in camera climatica (temperatura 20°C e umidità relativa 50%) e avvolti con la pellicola, vengono estratti dalla pellicola, posizionati come visibile in Figura 68 e riposti nuovamente nella camera climatica. Il test prevede di attendere 7 giorni lasciando i provini all'aria aperta e attendere la comparsa delle efflorescenze.

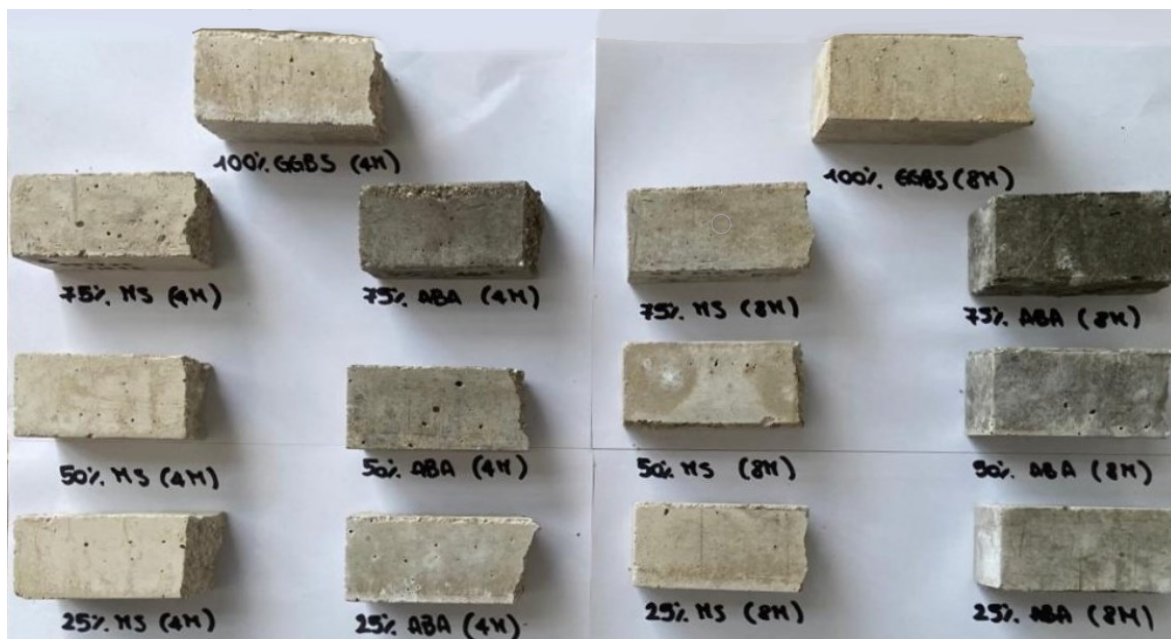


Figura 68: Provini 4M e 8M appena rimossi dalla pellicola, prima della formazione delle efflorescenze.

5. RISULTATI ED OSSERVAZIONI

Le prove effettuate precedentemente hanno dato origine ad una grande quantità di dati che sono stati elaborati e riportati di seguito tramite grafici e tabelle. In questa sezione verranno osservati e commentati i risultati più interessanti riscontrati, cercando di trarre conclusioni dal lavoro di ricerca svolto.

5.1. Consistenza della malta fresca

I risultati della prova di spandimento troncoconico, misurati ed elaborati come indicato dalla *UNI EN 1015-3: "Metodi di prova per malte per opere murarie"*, vengono riportati nelle tabelle sottostanti. Il diametro di spandimento è stato misurato nelle due direzioni ortogonali (D_1 e D_2). Il diametro risultante (D_m) utilizzato per identificare la consistenza della malta è la media tra D_1 e D_2 . Nelle foto sottostanti sono riportate le foto degli spandimenti di ogni impasto realizzato.

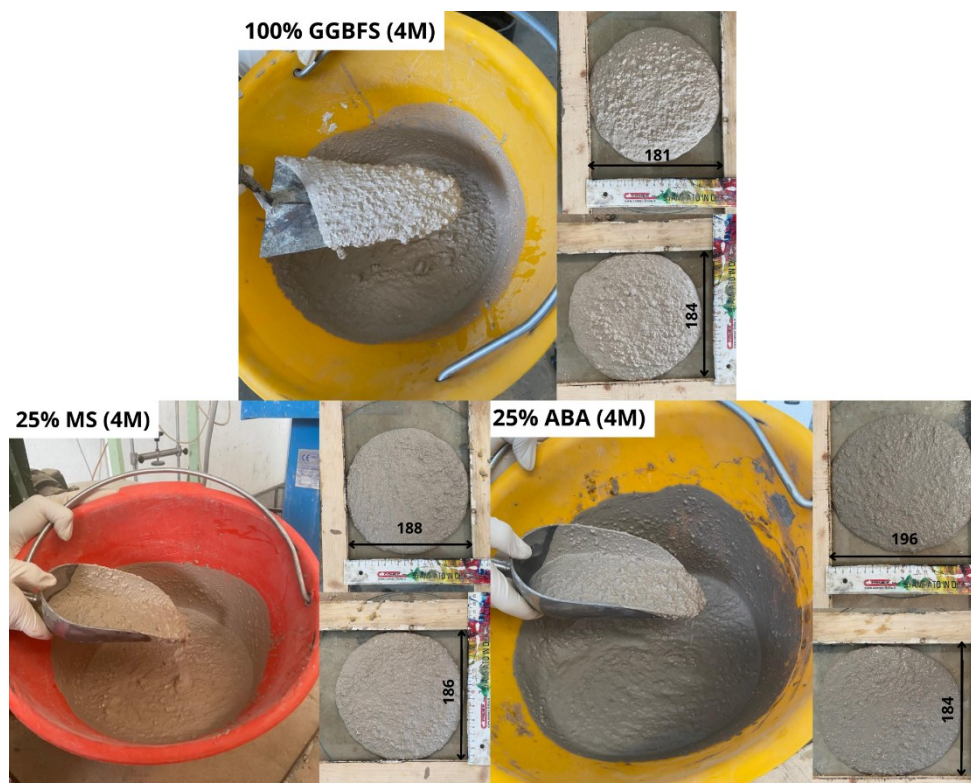


Figura 69: Spandimenti (D_1 e D_2) per 100%GGBF (4M), 25%MS (4M) e 25% ABA (4M).

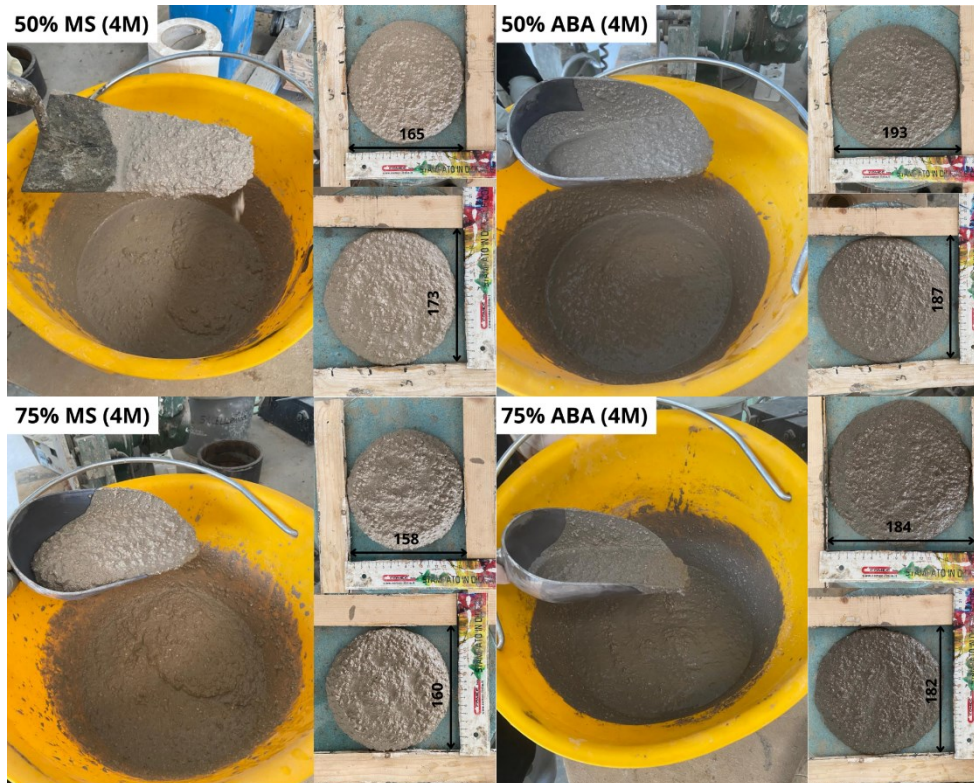


Figura 70: Spandimenti (D_1 e D_2) per 50%MS (4M), 75%MS (4M), 50%ABA (4M) e 75%ABA (4M).

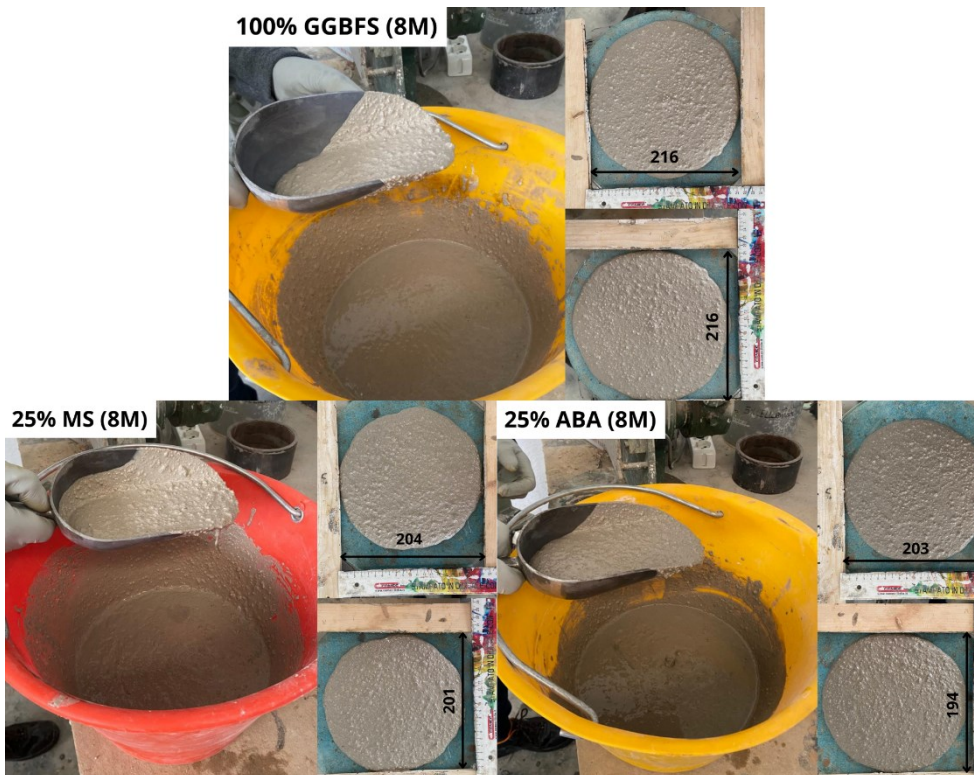


Figura 71: Spandimenti (D_1 e D_2) per 100%GGBF(8M), 25%MS (8M) e 25% ABA (8M).

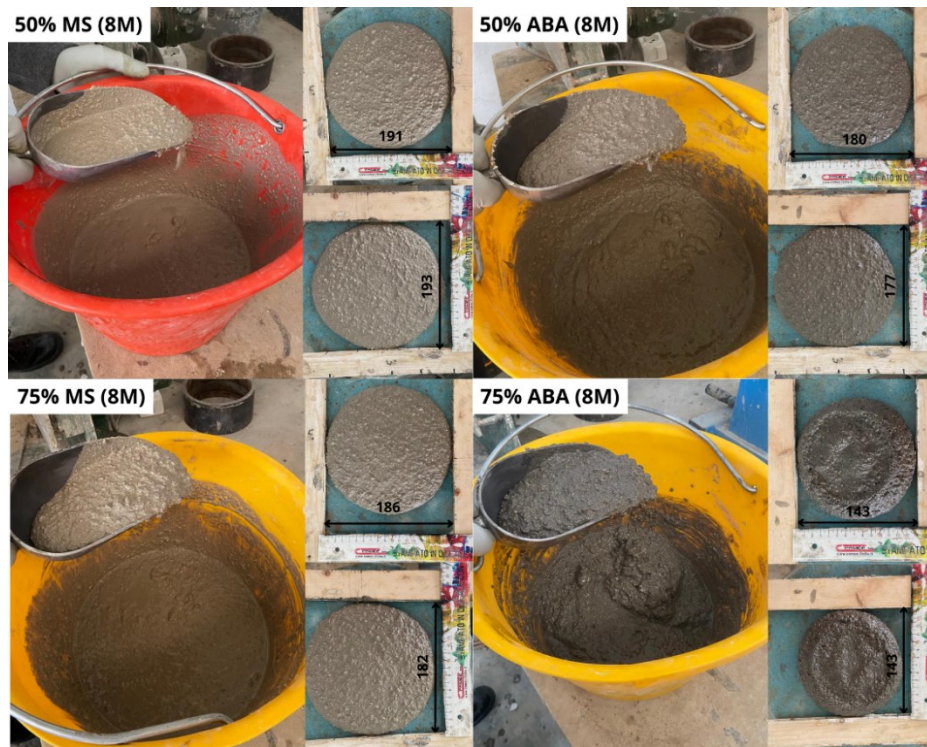


Figura 72: Spandimenti (D1 e D2) per 50%MS (8M), 75%MS (8M), 50%ABA (8M) e 75%ABA (8M).



Figura 73: Spandimenti (D1 e D2) per 100%GGBFS* (4M), 25%ABA* (4M) e 50%ABA* (4M).

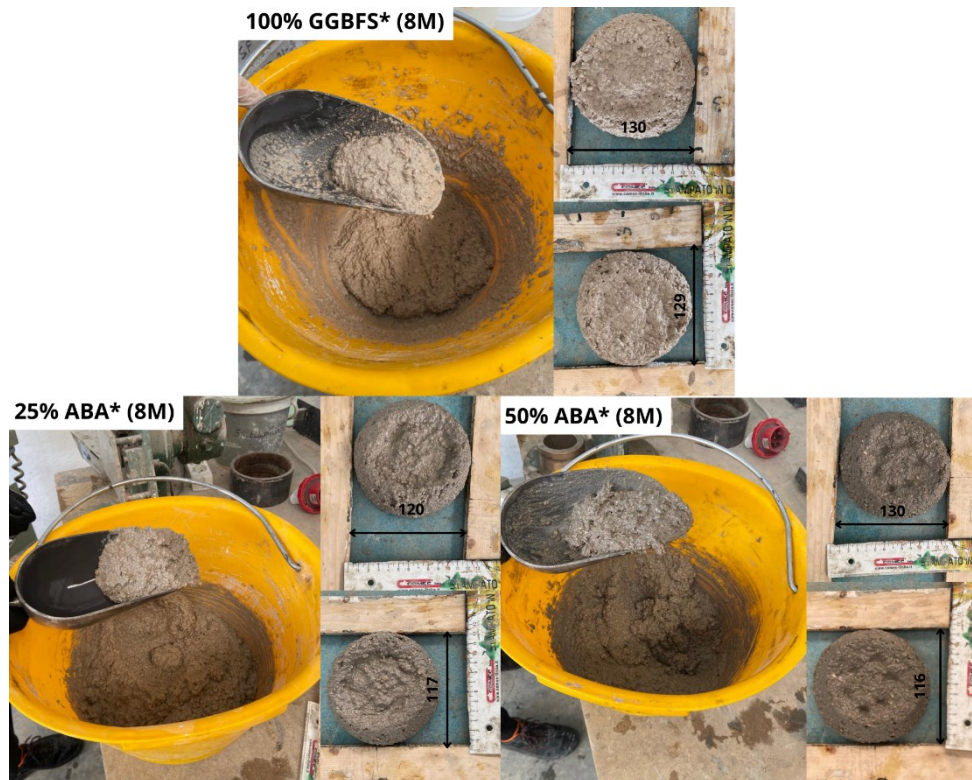


Figura 74: Spandimenti (D_1 e D_2) per 100%GGBFS* (8M), 25%ABA* (8M) e 50%ABA*(8M).

I mix design per la realizzazione dei provini sono stati calcolati con l'obiettivo di ottenere la stessa lavorabilità per gli impasti 4M e 8M. Per i provini con w/s maggiore, si voleva ottenere una consistenza plastica (plastic mortar), mentre per i provini con w/s più basso, consistenza rigida (stiff mortar). Il valore di consistenza viene determinato secondo la norma *UNI EN 1015-3* tramite la Tabella 8 (vedi paragrafo 3.3.3. "Prova di spandimento troncoconico"). Nelle tabelle sottostanti sono riportati i valori D_1 , D_2 e la loro media D_m .

I risultati ottenuti per le malte con w/s più alto ($w/s=0,450$ per 4M e $w/s=0,45$ per 8M) sono:

- impasti 4M: tutte le malte 4M hanno consistenza plastica (plastic mortar), come desiderato (Tabella 9);

Tabella 9: Risultati spandimenti malte 4M.

Tipo	Spandimento tronco conico			Consistenza all'atto
	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	D _m [mm]	
100% GGBFS (4M)	181	184	182,5	PLASTIC
25% ABA (4M)	196	184	190	PLASTIC
50% ABA (4M)	193	187	190	PLASTIC
75% ABA (4M)	184	182	183	PLASTIC
25% MS (4M)	188	186	187	PLASTIC
50% MS (4M)	165	173	169	PLASTIC
75% MS (4M)	158	160	159	PLASTIC

- impasti 8M: tutte le malte presentano consistenza plastica, tranne 100% GGBFS (8M) e 25% MS (8M) che risultano avere consistenza tenera (maggiore di 200 mm, soft mortar), come visibile in Tabella 10. Tenendo in considerazione che queste ultime rientrano nel campo delle malte tenere per pochi millimetri, si può ancora utilizzare la lavorabilità come metro di confronto.

Tabella 10: Risultati spandimenti malte 8M.

Tipo	Spandimento tronco conico			Consistenza all'atto
	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	D _m [mm]	
100% GGBFS (8M)	216	216	216	SOFT
25% ABA (8M)	203	194	198,5	PLASTIC
50% ABA (8M)	180	177	178,5	PLASTIC
75% ABA (8M)	143	143	143	PLASTIC
25% MS (8M)	204	201	202,5	SOFT
50% MS (8M)	191	193	192	PLASTIC
75% MS (8M)	186	182	184	PLASTIC

La classificazione ottenuta per le malte con w/s più basso (w/s=0,40 per 4M e w/s=0,35 per 8M) è di consistenza rigida (stiff mortar) per tutti gli impasti, come visibile in Tabella 11.

Tabella 11: Risultati spandimenti malte 4M* e 8M*.

Tipo	Spandimento tronco conico			Consistenza all'atto
	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	D _m [mm]	
100% GGBFS* (4M)	135	130	132,5	STIFF
25% ABA* (4M)	135	136	135,5	STIFF
50% ABA* (4M)	140	139	139,5	STIFF
100% GGBFS* (8M)	130	129	129,5	STIFF
25% ABA* (8M)	120	117	118,5	STIFF
50% ABA* (8M)	130	116	123	STIFF

5.2. Resistenza a flessione

Nel presente capitolo vengono riportate le tabelle con i risultati relativi a tutte le prove a flessione svolte sui provini 4 x 4 x 16 cm³ dopo un periodo di stagionatura di 2, 7 e 28 giorni.

Si riportano per ogni tipologia di impasto: la forza di flessione massima (F_{max}), la conseguente tensione di flessione ($\sigma_{f,max}$) e la tensione di flessione mediata su due provini di stesso materiale ($\sigma_{f,m,max}$), la deviazione standard riferita alla tensione e il coefficiente di variazione (CV%).

Nelle tabelle e figure successive vengono riportati i risultati delle prove a flessione a 2, 7 e 28 giorni per i provini 4M (Tabella 12, Tabella 13 e Tabella 14), per i provini 8M (Tabella 15, Tabella 16 e Tabella 17) e per i provini 4M* e 8M* (Tabella 18, Tabella 19 e Tabella 20).

Tabella 12: Risultati delle prove a flessione a 2 giorni per provini 4M.

PROVE A FLESSIONE PROVINI 4M (2 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{f,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{f,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS (4M)	Provino 1	1,09	2,56	2,74	0,18	6,41
	Provino 2	1,24	2,91			
25% ABA (4M)	Provino 1	1,38	3,24	3,30	0,05	1,61
	Provino 2	1,43	3,35			
50% ABA (4M)	Provino 1	0,93	2,18	2,23	0,05	2,15
	Provino 2	0,97	2,27			
75% ABA (4M)	Provino 1	0,30	0,70	0,70	0,00	0,00
	Provino 2	0,30	0,70			
25% MS (4M)	Provino 1	0,78	1,83	1,81	0,02	1,32
	Provino 2	0,76	1,79			
50% MS (4M)	Provino 1	0,50	1,17	1,15	0,02	2,04
	Provino 2	0,48	1,13			
75% MS (4M)	Provino 1	0,30	0,70	0,68	0,02	3,45
	Provino 2	0,28	0,66			

Tabella 13: Risultati delle prove a flessione a 7 giorni per provini 4M.

PROVE A FLESSIONE PROVINI 4M (7 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{f,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{f,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS (4M)	Provino 1	1,32	3,09	3,28	0,19	5,71
	Provino 2	1,48	3,47			
25% ABA (4M)	Provino 1	1,63	3,82	4,11	0,29	7,12
	Provino 2	1,88	4,41			
50% ABA (4M)	Provino 1	1,24	2,91	2,91	0,00	0,00
	Provino 2	1,24	2,91			
75% ABA (4M)	Provino 1	0,70	1,64	1,61	0,04	2,19
	Provino 2	0,67	1,57			
25% MS (4M)	Provino 1	1,44	3,38	3,07	0,30	9,92
	Provino 2	1,18	2,77			
50% MS (4M)	Provino 1	0,89	2,09	1,96	0,13	6,59
	Provino 2	0,78	1,83			
75% MS (4M)	Provino 1	0,44	1,03	1,11	0,08	7,37
	Provino 2	0,51	1,20			

Tabella 14: Risultati delle prove a flessione a 28 giorni per provini 4M.

PROVE A FLESSIONE PROVINI 4M (28 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{f,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{f,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS (4M)	Provino 1	1,41	3,30	3,35	0,05	1,43
	Provino 2	1,45	3,40			
25% ABA (4M)	Provino 1	1,82	4,26	3,97	0,28	7,16
	Provino 2	1,57	3,69			
50% ABA (4M)	Provino 1	1,48	3,47	3,35	0,12	3,49
	Provino 2	1,38	3,23			
75% ABA (4M)	Provino 1	0,83	1,93	1,98	0,05	2,28
	Provino 2	0,86	2,02			
25% MS (4M)	Provino 1	1,56	3,66	3,72	0,06	1,71
	Provino 2	1,61	3,78			
50% MS (4M)	Provino 1	0,95	2,23	2,22	0,00	0,12
	Provino 2	0,95	2,22			
75% MS (4M)	Provino 1	0,59	1,38	1,35	0,04	2,61
	Provino 2	0,56	1,31			

Tabella 15: Risultati delle prove a flessione a 2 giorni per provini 8M.

PROVE A FLESSIONE PROVINI 8M (2 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{f,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{f,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS (8M)	Provino 1	0,58	1,36	1,38	0,02	1,69
	Provino 2	0,60	1,41			
25% ABA (8M)	Provino 1	0,68	1,59	1,57	0,03	1,87
	Provino 2	0,66	1,54			
50% ABA (8M)	Provino 1	0,60	1,41	1,35	0,06	4,35
	Provino 2	0,55	1,29			
75% ABA (8M)	Provino 1	0,41	0,96	0,97	0,01	1,20
	Provino 2	0,42	0,98			
25% MS (8M)	Provino 1	0,64	1,51	1,56	0,05	3,40
	Provino 2	0,69	1,62			
50% MS (8M)	Provino 1	0,41	0,96	0,96	0,00	0,00
	Provino 2	0,41	0,96			
75% MS (8M)	Provino 1	0,23	0,54	0,54	0,00	0,00
	Provino 2	0,23	0,54			

Tabella 16: Risultati delle prove a flessione a 7 giorni per provini 8M.

PROVE A FLESSIONE PROVINI 8M (7 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{f,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{f,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS (8M)	Provino 1	1,32	3,09	3,25	0,15	4,69
	Provino 2	1,45	3,40			
25% ABA (8M)	Provino 1	1,35	3,16	3,11	0,06	1,89
	Provino 2	1,30	3,05			
50% ABA (8M)	Provino 1	0,89	2,09	2,19	0,11	4,81
	Provino 2	0,98	2,30			
75% ABA (8M)	Provino 1	0,60	1,41	1,46	0,06	4,00
	Provino 2	0,65	1,52			
25% MS (8M)	Provino 1	0,99	2,32	2,84	0,52	18,18
	Provino 2	1,43	3,35			
50% MS (8M)	Provino 1	0,65	1,52	1,50	0,02	1,56
	Provino 2	0,63	1,48			
75% MS (8M)	Provino 1	0,35	0,82	0,79	0,04	4,48
	Provino 2	0,32	0,75			

Tabella 17: Risultati delle prove a flessione a 28 giorni per provini 8M.

PROVE A FLESSIONE PROVINI 8M (28 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{f,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{f,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS (8M)	Provino 1	1,68	3,94	3,36	0,57	17,07
	Provino 2	1,19	2,79			
25% ABA (8M)	Provino 1	1,65	3,87	3,87	1,21	31,28
	Provino 2	0,92	2,16			
50% ABA (8M)	Provino 1	1,59	3,73	3,53	0,20	5,65
	Provino 2	1,42	3,33			
75% ABA (8M)	Provino 1	0,87	2,04	2,06	0,02	1,14
	Provino 2	0,89	2,09			
25% MS (8M)	Provino 1	1,49	3,49	3,73	0,23	6,29
	Provino 2	1,69	3,96			
50% MS (8M)	Provino 1	1,02	2,39	2,51	0,12	4,67
	Provino 2	1,12	2,63			
75% MS (8M)	Provino 1	0,47	1,10	1,05	0,05	4,44
	Provino 2	0,43	1,01			

Tabella 18: Risultati delle prove a flessione a 2 giorni per provini 4M* e 8M*.

PROVE A FLESSIONE PROVINI 4M* e 8M* (2 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{f,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{f,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS* (4M)	Provino 1	1,44	3,38	3,13	0,25	7,87
	Provino 2	1,23	2,88			
25% ABA* (4M)	Provino 1	1,69	3,96	4,15	0,19	4,52
	Provino 2	1,85	4,34			
50% ABA* (4M)	Provino 1	1,01	2,37	2,60	0,23	9,01
	Provino 2	1,21	2,84			
100% GGBFS* (8M)	Provino 1	2,26	5,30	4,70	0,60	12,72
	Provino 2	1,75	4,10			
25% ABA* (8M)	Provino 1	1,35	3,16	3,04	0,13	4,25
	Provino 2	1,24	2,91			
50% ABA* (8M)	Provino 1	1,12	2,63	2,57	0,06	2,28
	Provino 2	1,07	2,51			

Tabella 19: Risultati delle prove a flessione a 7 giorni per provini 4M* e 8M*.

PROVE A FLESSIONE PROVINI 4M* e 8M* (7 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{f,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{f,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS* (4M)	Provino 1	1,84	4,31	4,18	0,13	3,08
	Provino 2	1,73	4,05			
25% ABA* (4M)	Provino 1	2,18	5,11	5,07	0,04	0,69
	Provino 2	2,15	5,04			
50% ABA* (4M)	Provino 1	1,53	3,59	3,80	0,21	5,56
	Provino 2	1,71	4,01			
100% GGBFS* (8M)	Provino 1	2,59	6,07	5,74	0,33	5,71
	Provino 2	2,31	5,41			
25% ABA* (8M)	Provino 1	1,98	4,64	4,69	0,05	1,00
	Provino 2	2,02	4,73			
50% ABA* (8M)	Provino 1	1,56	3,66	3,63	0,02	0,65
	Provino 2	1,54	3,61			

Tabella 20: Risultati delle prove a flessione a 28 giorni per provini 4M* e 8M*.

PROVE A FLESSIONE PROVINI 4M* e 8M* (28 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{f,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{f,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS* (4M)	Provino 1	1,97	4,62	4,55	0,07	1,52
	Provino 2	1,91	4,49			
25% ABA* (4M)	Provino 1	2,04	4,77	4,89	0,11	2,34
	Provino 2	2,13	5,00			
50% ABA* (4M)	Provino 1	1,61	3,78	3,99	0,20	5,13
	Provino 2	1,79	4,19			
100% GGBFS* (8M)	Provino 1	2,35	5,51	5,20	0,31	5,88
	Provino 2	2,09	4,89			
25% ABA* (8M)	Provino 1	2,13	5,00	5,03	0,04	0,74
	Provino 2	2,16	5,07			
50% ABA* (8M)	Provino 1	1,60	3,74	3,86	0,12	3,10
	Provino 2	1,70	3,98			

Osservando la Figura 75 e Figura 76, si può notare che tutti i provini sottoposti alla prova, hanno manifestato la frattura in mezzeria, tipica della rottura a flessione.

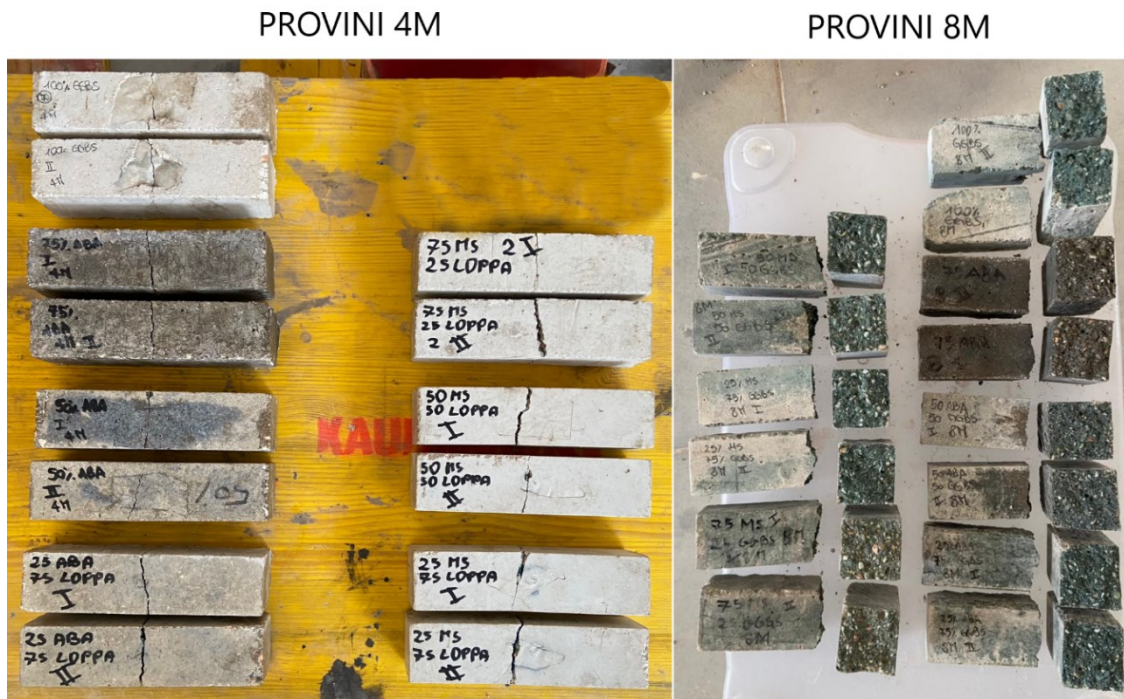


Figura 75: Provini 4M e 8M rotti a flessione.

PROVINI 4M* e 8M*



Figura 76: Provini 4M* e 8M* rotti a flessione.

Sulla base dell'andamento dei valori ottenuti dalle tabelle visualizzate in precedenza, sono stati elaborati dei grafici per semplificare la visualizzazione d'insieme dei risultati.

Si riporta il grafico delle tensioni massime a flessione ($\sigma_{f,m,max}$) raggiunte a 2, 7 e 28 giorni dai provini 4M e 8M con w/s più alti.

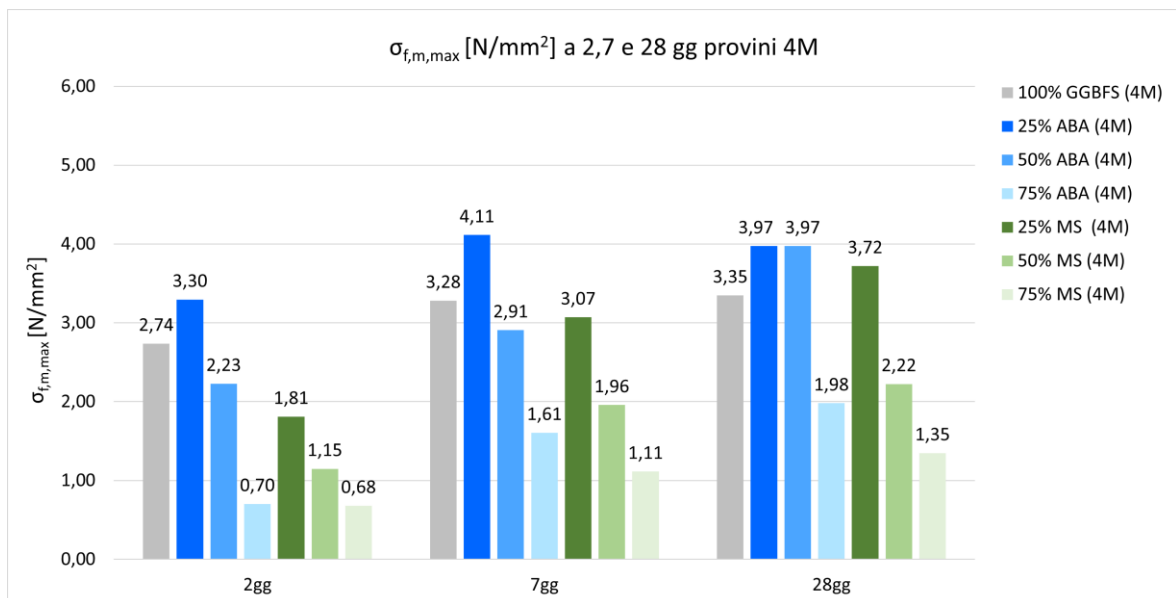


Figura 77: Tensioni massime a flessione ($\sigma_{m,max}$) raggiunte a 2, 7 e 28 giorni dai provini 4M.

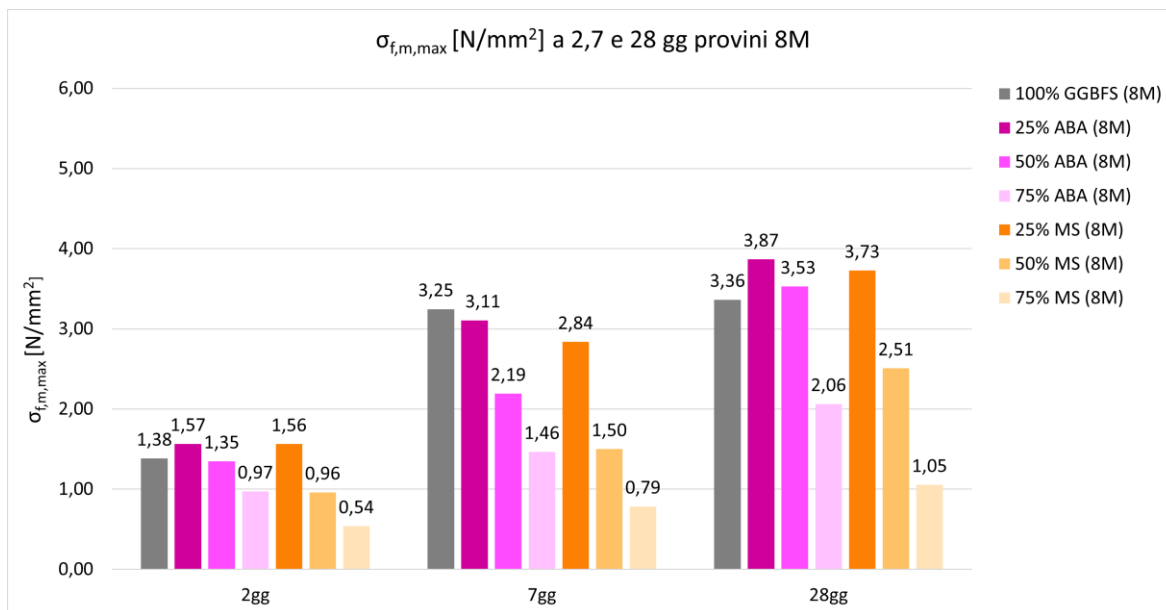


Figura 78: Tensioni massime a flessione ($\sigma_{f,m,max}$) raggiunte a 2, 7 e 28 giorni dai provini 8M.

Dai grafici in Figura 77 e Figura 78 è evidente che le resistenze a flessione sia per i provini 4M che per i provini 8M, crescono tra la stagionatura a 2 e 7 giorni, ma rimangono pressoché invariati tra la stagionatura a 7 e 28 giorni. In generale, tutti i provini raggiungono tensioni massime a flessione ($\sigma_{f,m,max}$) molto basse.

In Figura 79 è riportato il grafico delle tensioni massime a flessione ($\sigma_{f,m,max}$) raggiunte a 28 giorni dai provini 4M e 8M.

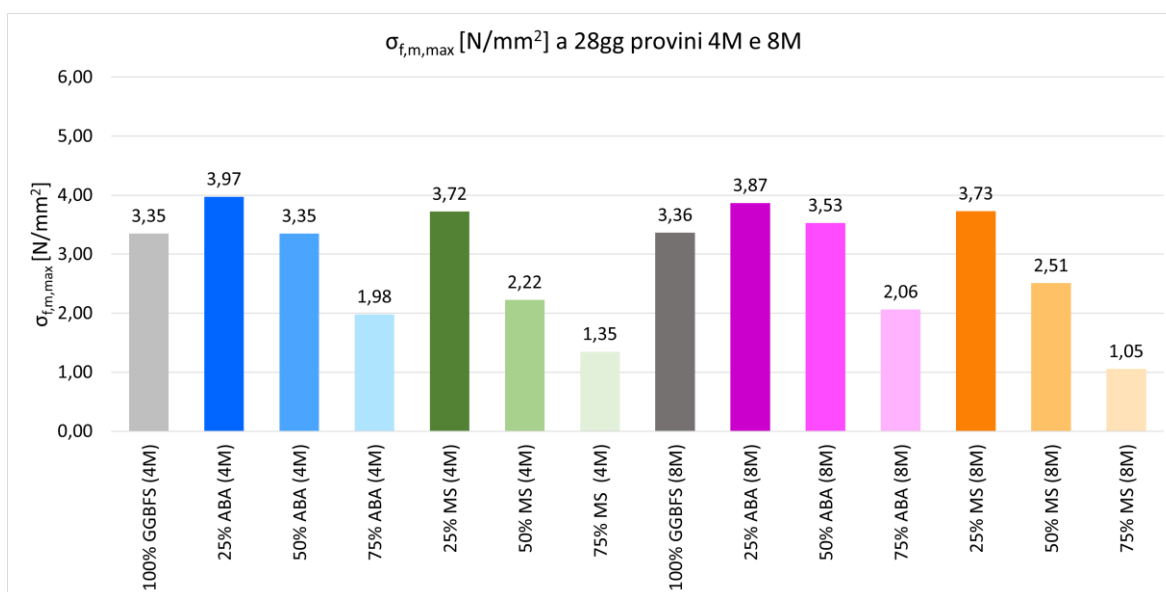


Figura 79: Tensioni massime a flessione ($\sigma_{f,m,max}$) raggiunte a 28 giorni dai provini 4M e 8M.

Si nota che le resistenze a flessione più elevate risultano dai provini 25% ABA e 25% MS, sia 4M che 8M, che superano le tensioni massime raggiunte dai provini 100% GGBFS 4M e 8M. È interessante far notare che, per entrambe le molarità, il provino 50% ABA raggiunge resistenze al pari del 100% GGBFS.

I provini meno resistenti risultano essere 75% MS e 75% ABA sia 4M che 8M, infatti si nota che eccedendo con la sostituzione (in peso) di ABA e MS alla GGBFS, la resistenza a flessione diminuisce.

Non si riscontrano differenze significative tra le resistenze dei provini 8M e 4M.

Nel grafico in Figura 80 vengono visualizzate le tensioni massime a flessione ($\sigma_{f,m,max}$) raggiunte dai provini 4M* e 8M* con w/s più bassi a 2,7, e 28 giorni.

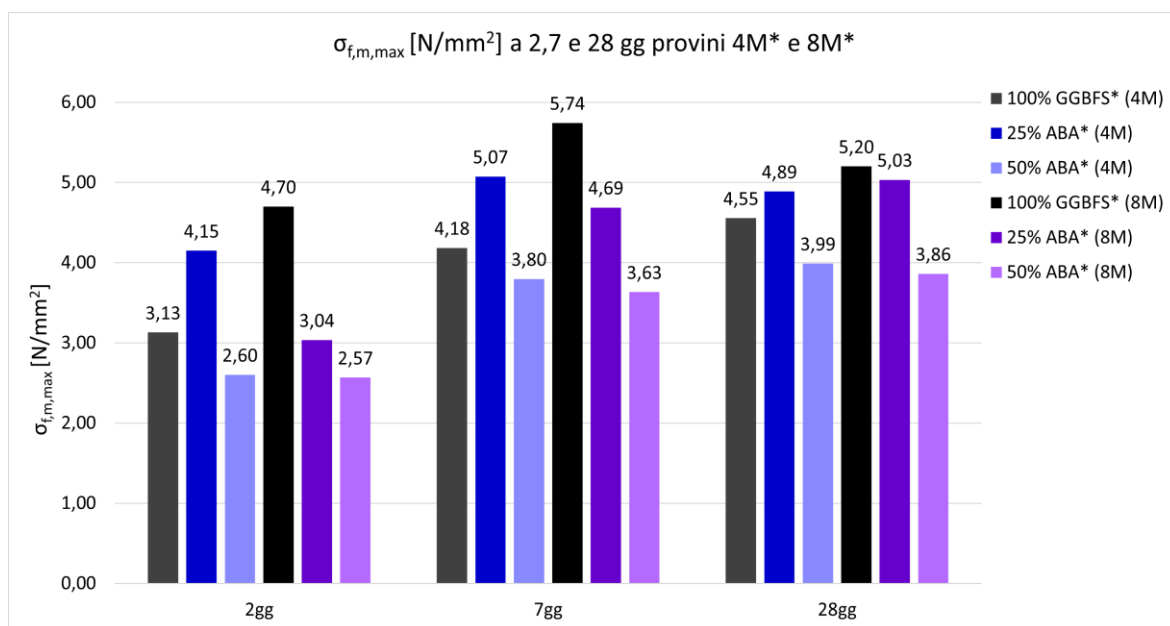


Figura 80: Tensioni massime a flessione ($\sigma_{m,max}$) raggiunte a 2, 7 e 28 giorni dai provini 4M* e 8M*.

Dal grafico soprastante si evince che le resistenze a flessione sia per i provini 4M che per i provini 8M, crescono tra la stagionatura a 2 e 7 giorni, ma rimangono pressoché invariati tra la stagionatura a 7 e 28 giorni. I provini con w/s più bassi si comportano come quelli con w/s più alti, infatti anche quest'ultimi ottengono tensioni massime a flessione basse.

In Figura 81 è riportato il grafico delle tensioni massime a flessione ($\sigma_{f,m,max}$) raggiunte a 28 giorni dai provini 4M* e 8M*.

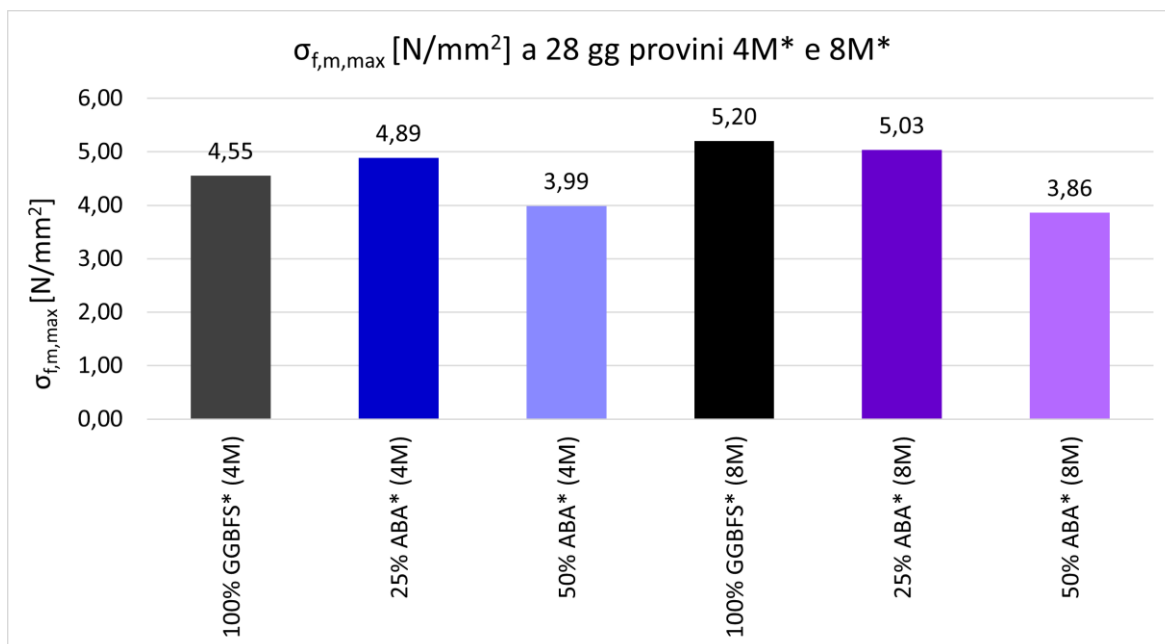


Figura 81: Tensioni massime a flessione ($\sigma_{m,max}$) raggiunte a 28 giorni dai provini 4M* e 8M*.

Si nota che le resistenze a flessione più elevate risultano dal provino 100% GGBFS* (8M) e a seguire dai provini 25% ABA*, sia 4M che 8M. Ad ogni modo non si riscontrano differenze significative tra le resistenze dei provini 8M e 4M.

In ultimo si evidenziano le differenze riscontrate in termini di resistenza a flessione ($\sigma_{m,max}$) tra i provini 4M e 8M con w/s più alti e i provini 4M* e 8M* con w/s più bassi stagionati a 28 giorni a parità di percentuale di precursori riportando il grafico in Figura 82.

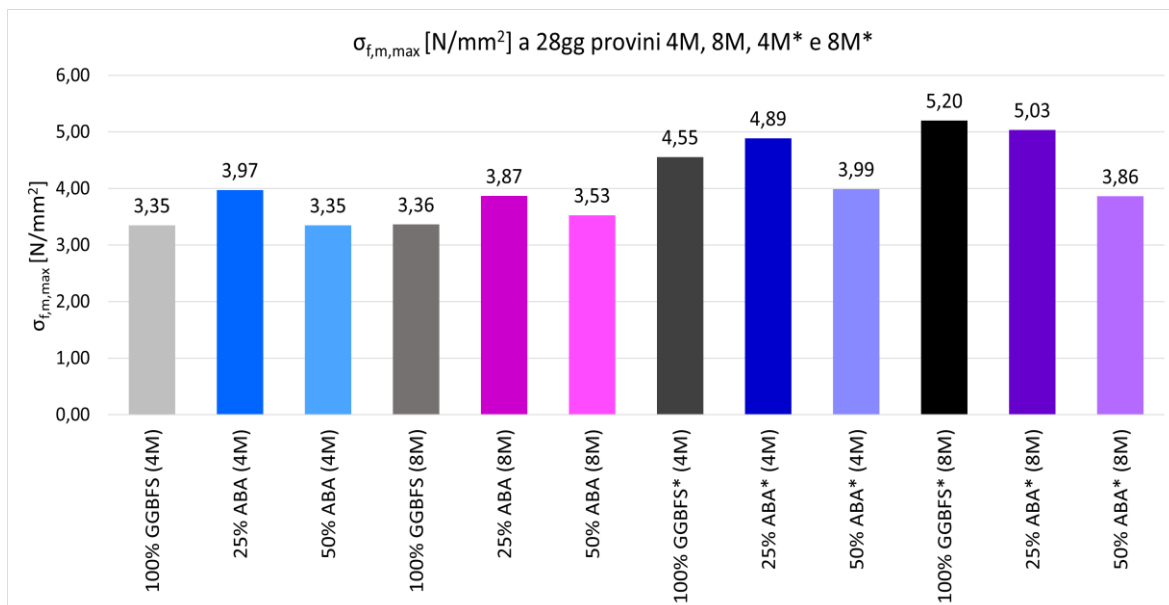


Figura 82: Tensioni massime a flessione ($\sigma_{m,max}$) raggiunte a 28 giorni dai provini 4M, 8M, 4M* e 8M*.

È ben visibile che i provini i cui impasti avevano lavorabilità plastica risultano meno resistenti a flessione rispetto ai provini con impasti di lavorabilità rigida. L'aumento del rapporto w/s nel mix design comporta una diminuzione della resistenza a flessione.

5.3. Resistenza a compressione

Nel presente capitolo vengono riportate le tabelle con i risultati relativi a tutte le prove a flessione svolte sui provini 4 x 4 x 16 cm³ dopo un periodo di stagionatura di 2, 7 e 28 giorni.

Si riportano per ogni tipologia di impasto: la forza a compressione massima ($F_{c,max}$), la conseguente tensione di compressione ($\sigma_{c,max}$) e la tensione di compressione mediata su due provini di stesso materiale ($\sigma_{c,m,max}$), la deviazione standard riferita alla tensione e il coefficiente di variazione (CV%).

Nelle tabelle e figure successive vengono riportati i risultati delle prove a compressione a 2, 7 e 28 giorni per i provini 4M (Tabella 21, Tabella 22 e Tabella 23), per i provini 8M (Tabella 24, Tabella 25 e Tabella 26) e per i provini 4M* e 8M* (Tabella 27, Tabella 28 e Tabella 29).

Tabella 21: Risultati delle prove a compressione a 2 giorni per provini

PROVE A COMPRESSIONE PROVINI 4M (2 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{c,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{c,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS (4M)	Provino 1	8,39	5,25	5,10	0,12	2,31
	Provino 2	7,93	4,96			
	Provino 3	8,18	5,11			
25% ABA (4M)	Provino 1	12,32	7,70	7,67	0,09	1,12
	Provino 2	12,42	7,76			
	Provino 3	12,09	7,56			
50% ABA (4M)	Provino 1	10,73	6,71	6,44	0,19	2,99
	Provino 2	10,03	6,27			
	Provino 3	10,15	6,34			
75% ABA (4M)	Provino 1	3,43	2,15	2,21	0,06	2,65
	Provino 2	3,51	2,20			
	Provino 3	3,66	2,29			
25% MS (4M)	Provino 1	6,12	3,82	3,79	0,07	1,86
	Provino 2	6,17	3,85			
	Provino 3	5,91	3,69			
50% MS (4M)	Provino 1	3,78	2,36	2,40	0,10	3,97
	Provino 2	4,05	2,53			
	Provino 3	3,69	2,31			
75% MS (4M)	Provino 1	1,88	1,18	1,21	0,06	5,06
	Provino 2	1,84	1,15			
	Provino 3	2,06	1,29			

Tabella 22: Risultati delle prove a compressione a 7 giorni per provini 4M.

PROVE A COMPRESSIONE PROVINI 4M (7 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{c,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{c,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS (4M)	Provino 1	10,38	6,49	6,77	0,38	5,60
	Provino 2	10,44	6,52			
	Provino 3	11,70	7,31			
25% ABA (4M)	Provino 1	15,87	9,92	9,85	0,06	0,63
	Provino 2	15,77	9,86			
	Provino 3	15,63	9,77			
50% ABA (4M)	Provino 1	12,38	7,74	7,71	0,19	2,41
	Provino 2	12,66	7,92			
	Provino 3	11,94	7,46			
75% ABA (4M)	Provino 1	6,86	4,29	4,09	0,27	6,51
	Provino 2	6,81	4,26			
	Provino 3	5,94	3,71			
25% MS (4M)	Provino 1	9,00	5,63	5,80	0,26	4,52
	Provino 2	9,87	6,17			
	Provino 3	8,97	5,60			
50% MS (4M)	Provino 1	5,42	3,39	3,45	0,05	1,52
	Provino 2	5,54	3,46			
	Provino 3	5,62	3,51			
75% MS (4M)	Provino 1	2,83	1,77	1,77	0,01	0,43
	Provino 2	2,84	1,77			
	Provino 3	2,81	1,76			

Tabella 23: Risultati delle prove a compressione a 28 giorni per provini 4M.

PROVE A COMPRESSIONE PROVINI 4M (28 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{c,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{c,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS (4M)	Provino 1	18,01	11,25	11,57	0,22	1,93
	Provino 2	18,78	11,74			
	Provino 3	18,90	11,81			
	Provino 4	18,33	11,46			
25% ABA (4M)	Provino 1	21,65	13,53	13,44	0,20	1,46
	Provino 2	21,34	13,34			
	Provino 3	21,93	13,71			
	Provino 4	21,10	13,18			
50% ABA (4M)	Provino 1	15,64	9,78	9,53	0,24	2,48
	Provino 2	15,02	9,39			
	Provino 3	14,74	9,21			
	Provino 4	15,57	9,73			
75% ABA (4M)	Provino 1	9,18	5,74	5,74	0,19	3,22
	Provino 2	9,62	6,01			
	Provino 3	9,14	5,71			
	Provino 4	8,78	5,49			
25% MS (4M)	Provino 1	13,93	8,71	8,54	0,16	1,88
	Provino 2	13,78	8,61			
	Provino 3	13,71	8,57			
	Provino 4	13,24	8,28			
50% MS (4M)	Provino 1	8,01	5,00	5,16	0,23	4,39
	Provino 2	8,87	5,54			
	Provino 3	7,98	4,99			
	Provino 4	8,15	5,10			
75% MS (4M)	Provino 1	4,02	2,51	2,51	0,03	1,01
	Provino 2	4,07	2,55			
	Provino 3	4,01	2,51			
	Provino 4	3,96	2,48			

Tabella 24: Risultati delle prove a compressione a 2 giorni per provini 8M.

PROVE A COMPRESSIONE PROVINI 8M (2 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{c,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{c,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS (8M)	Provino 1	5,99	3,74	3,96	0,17	4,19
	Provino 2	6,63	4,14			
	Provino 3	6,39	3,99			
25% ABA (8M)	Provino 1	6,17	3,86	3,75	0,09	2,35
	Provino 2	5,83	3,64			
	Provino 3	6,03	3,77			
50% ABA (8M)	Provino 1	5,41	3,38	3,26	0,09	2,67
	Provino 2	5,08	3,17			
	Provino 3	5,18	3,24			
75% ABA (8M)	Provino 1	3,20	2,00	2,13	0,09	4,34
	Provino 2	3,48	2,18			
	Provino 3	3,54	2,22			
25% MS (8M)	Provino 1	5,71	3,57	3,50	0,11	3,19
	Provino 2	5,34	3,34			
	Provino 3	5,73	3,58			
50% MS (8M)	Provino 1	3,48	2,17	2,16	0,08	3,49
	Provino 2	3,31	2,07			
	Provino 3	3,60	2,25			
75% MS (8M)	Provino 1	1,95	1,22	1,16	0,04	3,87
	Provino 2	1,78	1,11			
	Provino 3	1,84	1,15			

Tabella 25: Risultati delle prove a compressione a 7 giorni per provini 8M.

PROVE A COMPRESSIONE PROVINI 8M (7 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{c,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{c,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS (8M)	Provino 1	10,50	6,56	6,76	0,17	2,44
	Provino 2	11,15	6,97			
	Provino 3	10,79	6,74			
25% ABA (8M)	Provino 1	10,02	6,26	6,34	0,06	1,01
	Provino 2	10,14	6,34			
	Provino 3	10,27	6,42			
50% ABA (8M)	Provino 1	8,18	5,11	5,03	0,14	2,87
	Provino 2	7,72	4,83			
	Provino 3	8,24	5,15			
75% ABA (8M)	Provino 1	5,49	3,43	3,39	0,04	1,21
	Provino 2	5,45	3,41			
	Provino 3	5,33	3,33			
25% MS (8M)	Provino 1	9,22	5,76	5,71	0,10	1,71
	Provino 2	8,92	5,57			
	Provino 3	9,27	5,80			
50% MS (8M)	Provino 1	5,31	3,32	3,29	0,06	1,84
	Provino 2	5,12	3,20			
	Provino 3	5,35	3,34			
75% MS (8M)	Provino 1	2,24	1,40	1,48	0,06	4,07
	Provino 2	2,47	1,54			
	Provino 3	2,40	1,50			

Tabella 26: Risultati delle prove a compressione a 28 giorni per provini 8M.

PROVE A COMPRESSIONE PROVINI 8M (28 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{c,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{c,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS (8M)	Provino 1	18,28	11,43	10,86	0,36	3,32
	Provino 2	16,92	10,58			
	Provino 3	17,48	10,92			
	Provino 4	16,84	10,52			
25% ABA (8M)	Provino 1	14,99	9,37	9,19	0,49	5,28
	Provino 2	13,44	8,40			
	Provino 3	14,86	9,29			
	Provino 4	15,55	9,72			
50% ABA (8M)	Provino 1	12,39	7,74	7,76	0,07	0,92
	Provino 2	12,51	7,82			
	Provino 3	12,54	7,84			
	Provino 4	12,25	7,65			
75% ABA (8M)	Provino 1	6,58	4,11	4,35	0,25	5,76
	Provino 2	6,55	4,09			
	Provino 3	7,27	4,55			
	Provino 4	7,44	4,65			
25% MS (8M)	Provino 1	13,53	8,46	8,93	0,34	3,78
	Provino 2	14,17	8,86			
	Provino 3	15,03	9,39			
	Provino 4	14,45	9,03			
50% MS (8M)	Provino 1	8,35	5,22	5,30	0,18	3,35
	Provino 2	8,93	5,58			
	Provino 3	8,48	5,30			
	Provino 4	8,16	5,10			
75% MS (8M)	Provino 1	3,19	1,99	2,07	0,08	3,76
	Provino 2	3,52	2,20			
	Provino 3	3,25	2,03			
	Provino 4	3,30	2,06			

Tabella 27: Risultati delle prove a compressione a 2 giorni per provini 4M* e 8M*.

PROVE A COMPRESSIONE PROVINI 4M* e 8M* (2 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{c,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{c,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS* (4M)	Provino 1	10,07	6,30	6,22	0,25	4,03
	Provino 2	9,42	5,89			
	Provino 3	10,38	6,49			
25% ABA* (4M)	Provino 1	18,78	11,74	11,68	0,07	0,59
	Provino 2	18,53	11,58			
	Provino 3	18,76	11,72			
50% ABA* (4M)	Provino 1	12,86	8,04	8,20	0,12	1,46
	Provino 2	13,24	8,27			
	Provino 3	13,29	8,30			
100% GGBFS* (8M)	Provino 1	15,98	9,98	9,95	0,07	0,73
	Provino 2	15,76	9,85			
	Provino 3	16,03	10,02			
25% ABA* (8M)	Provino 1	11,66	7,29	7,11	0,13	1,76
	Provino 2	11,21	7,00			
	Provino 3	11,28	7,05			
50% ABA* (8M)	Provino 1	10,64	6,65	6,09	0,41	6,66
	Provino 2	9,12	5,70			
	Provino 3	9,48	5,92			

Tabella 28: Risultati delle prove a compressione a 7 giorni per provini 4M* e 8M*.

PROVE A COMPRESSIONE PROVINI 4M* e 8M* (7 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{c,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{c,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS* (4M)	Provino 1	15,47	9,67	9,83	0,18	1,86
	Provino 2	15,58	9,74			
	Provino 3	16,14	10,09			
25% ABA* (4M)	Provino 1	23,40	14,63	14,63	0,08	0,54
	Provino 2	23,56	14,72			
	Provino 3	23,24	14,53			
50% ABA* (4M)	Provino 1	18,90	11,82	11,66	0,11	0,94
	Provino 2	18,59	11,62			
	Provino 3	18,50	11,56			
100% GGBFS* (8M)	Provino 1	23,80	14,88	14,76	0,32	2,14
	Provino 2	24,11	15,07			
	Provino 3	22,92	14,32			
25% ABA* (8M)	Provino 1	16,27	10,17	10,21	0,58	5,65
	Provino 2	17,50	10,94			
	Provino 3	15,24	9,53			
50% ABA* (8M)	Provino 1	12,57	7,86	8,16	0,22	2,66
	Provino 2	13,38	8,36			
	Provino 3	13,20	8,25			

Tabella 29: Risultati delle prove a compressione a 28 giorni per provini 4M* e 8M*.

PROVE A COMPRESSIONE PROVINI 4M*e 8M* (28 gg)						
Tipo	n° provino	$F_{c,max}$ [kN]	$\sigma_{c,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{c,m,max}$ [N/mm ²]	Dev. Standard [N/mm ²]	CV%
100% GGBFS* (4M)	Provino 1	22,70	14,06	14,19	0,17	1,18
	Provino 2	23,08	14,42			
	Provino 3	22,52	14,07			
25% ABA* (4M)	Provino 1	27,65	17,28	17,61	0,31	1,75
	Provino 2	28,06	17,54			
	Provino 3	28,84	18,02			
50% ABA* (4M)	Provino 1	21,13	13,21	13,37	0,19	1,39
	Provino 2	21,80	13,63			
	Provino 3	21,22	13,27			
100% GGBFS* (8M)	Provino 1	31,27	19,54	18,95	0,68	3,58
	Provino 2	30,88	19,30			
	Provino 3	28,79	18,00			
25% ABA* (8M)	Provino 1	21,19	13,25	13,38	0,16	1,17
	Provino 2	21,29	13,30			
	Provino 3	21,77	13,60			
50% ABA* (8M)	Provino 1	15,98	9,98	9,66	0,48	4,98
	Provino 2	14,37	8,98			
	Provino 3	16,04	10,02			

Tutti i provini sottoposti alla prova hanno manifestato la tipica rottura a clessidra che si origina con la compressione (Figura 83).

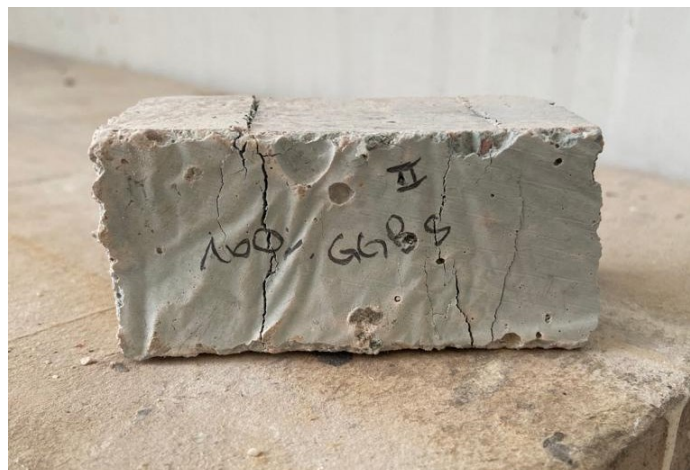


Figura 83: Spezzone di provino testato a compressione con tipica rottura a clessidra.

Sulla base dell'andamento dei valori ottenuti sono stati elaborati dei grafici per semplificare la visualizzazione d'insieme dei risultati.

Si riporta il grafico delle tensioni massime a compressione ($\sigma_{c,m,max}$) raggiunte a 2, 7 e 28 giorni dai provini 4M e 8M con w/s più alti.

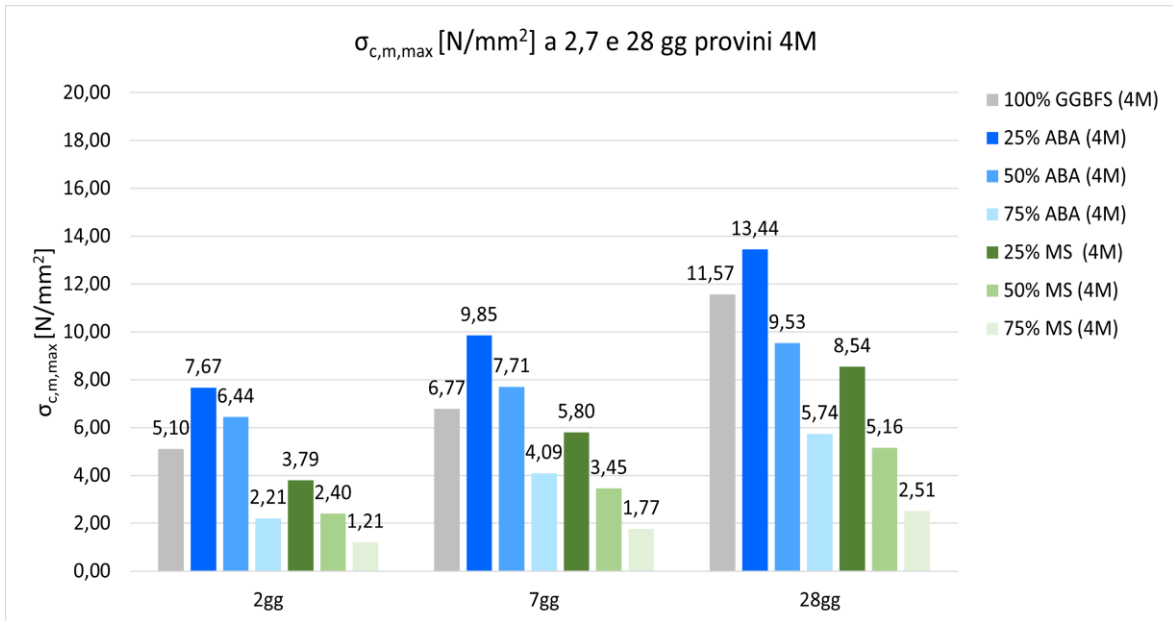


Figura 84: Tensioni massime a compressione ($\sigma_{c,m,max}$) raggiunte a 2, 7 e 28 giorni dai provini 4M.

Dai grafici in Figura 84 e Figura 85 è evidente che le resistenze a compressione sia per i provini 4M che per i provini 8M, crescono in modo costante all'aumentare del tempo di stagionatura.

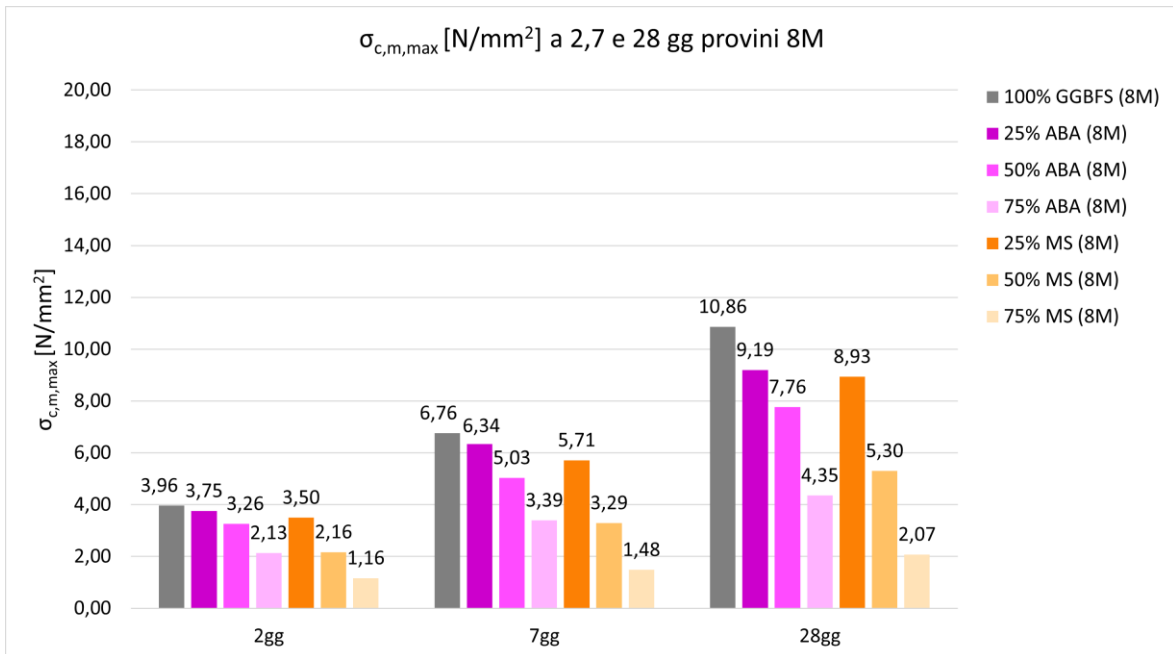


Figura 85: Tensioni massime a compressione ($\sigma_{c,m,max}$) raggiunte a 2, 7 e 28 giorni dai provini 8M.

In Figura 86 è riportato il grafico delle tensioni massime a flessione ($\sigma_{m,max}$) raggiunte a 28 giorni dai provini 4M e 8M.

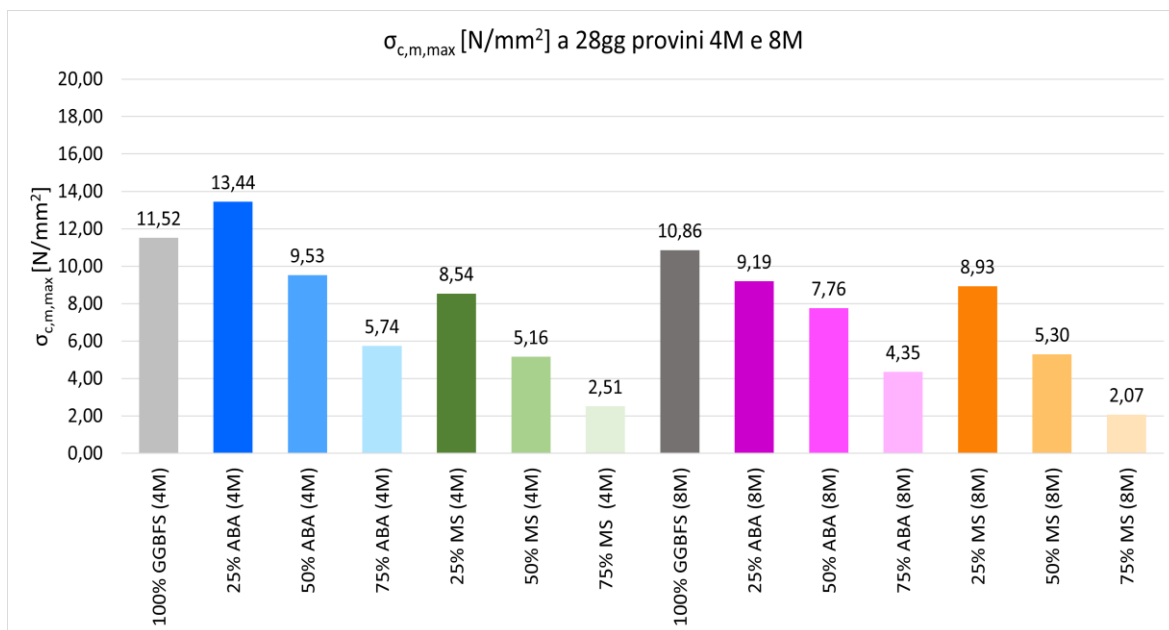


Figura 86: Tensioni massime a compressione ($\sigma_{c,m,max}$) raggiunte a 28 giorni dai provini 4M e 8M.

Anche per la compressione, al contrario di come ci si aspettava, a parità di percentuale di precursori, i provini 8M restituiscono risultati più bassi rispetto ai 4M.

Infatti il provino che restituisce la resistenza a compressione più elevata è 25% ABA (4M) con $\sigma_{c,m,max}= 13,44$ N/mm², seguito dal 100%GGBFS (4M) con $\sigma_{c,m,max}=11,52$ N/mm².

Il miglior provino degli 8M è il 100% GGBFS (8M) che raggiunge $\sigma_{c,m,max}=10,86$ N/mm².

I provini meno resistenti, anche in questo caso risultano essere quelli con il 75% MS e 75% ABA per entrambe le molarità. Anche per la compressione si nota che quando la GGBFS viene sostituita con alte percentuali in peso di ABA e MS, la resistenza diminuisce.

Nel grafico in Figura 87 vengono visualizzate le tensioni massime a compressione ($\sigma_{c,m,max}$) raggiunte dai provini 4M* e 8M* con w/s più bassi a 2,7, e 28 giorni.

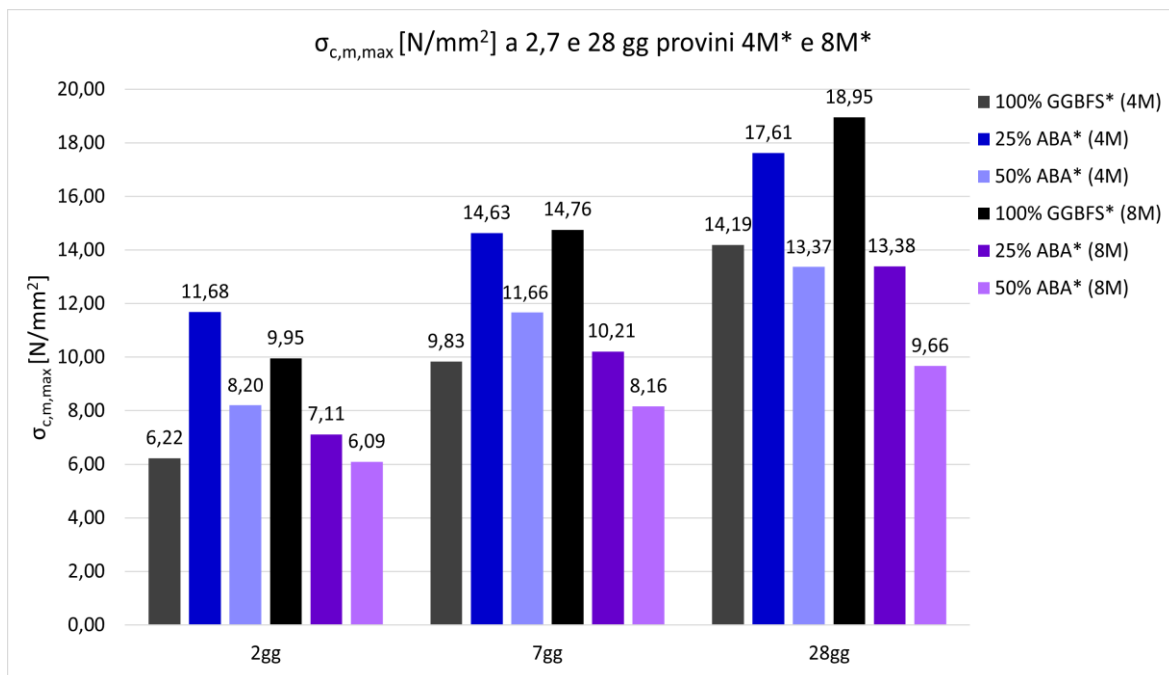


Figura 87: Tensioni massime a compressione ($\sigma_{c,m,max}$) raggiunte a 2, 7 e 28 giorni dai provini 4M* e 8M*.

Dal grafico soprastante è ben visibile l'aumento costante delle resistenze a compressione sia per i provini 4M* che per i provini 8M* all'aumentare del tempo di stagionatura.

In Figura 88 è riportato il grafico delle tensioni massime a flessione ($\sigma_{c,m,max}$) raggiunte a 28 giorni dai provini 4M* e 8M*.

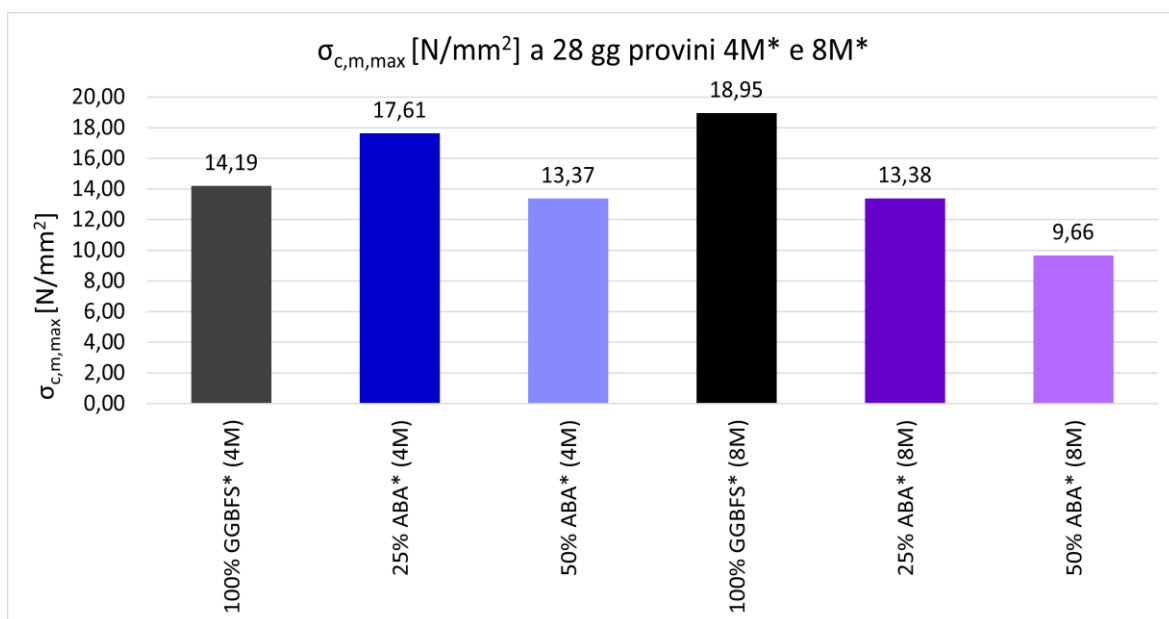


Figura 88: Tensioni massime a compressione ($\sigma_{c,m,max}$) raggiunte a 28 giorni dai provini 4M* e 8M*.

Le resistenze a flessione più elevate vengono raggiunte dai provini 100% GGBFS* (8M) ($\sigma_{c,m,max}= 18,95 \text{ N/mm}^2$) e dal 25% ABA* (4M) ($\sigma_{c,m,max}= 17,61 \text{ N/mm}^2$). Anche in questo caso, il provino realizzato con il 25% di ABA, supera il suo riferimento 100% GGBFS* (4M) che ha resistenze simili al 50% ABA* (4M) (circa $\sigma_{c,m,max}= 14,00 \text{ N/mm}^2$).

Inoltre, si può confermare che i provini che contengono ABA attivati a 8M sono meno resistenti di quelli con la stessa percentuale di ABA attivati a 4M.

Infine è interessante evidenziare le differenze riscontrate in termini di resistenza a compressione ($\sigma_{c,m,max}$) tra i provini 4M e 8M con w/s più alti e i provini 4M* e 8M* con w/s più bassi stagionati a 28 giorni a parità di percentuale di precursori (Figura 89).

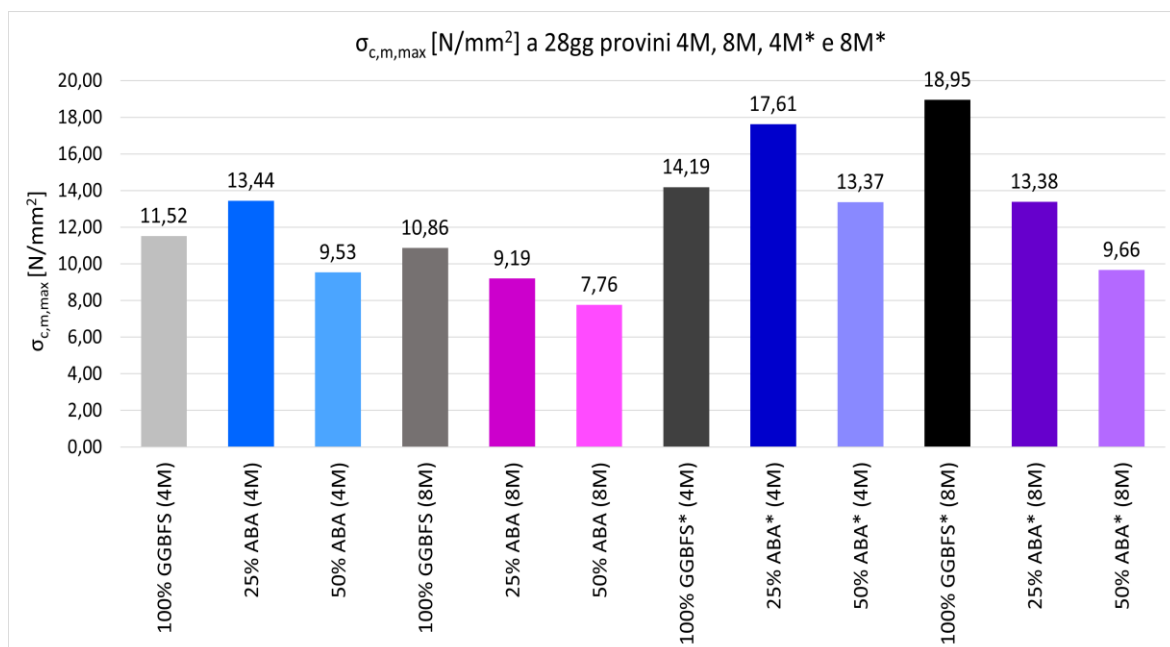


Figura 89: Tensioni massime a compressione ($\sigma_{c,m,max}$) raggiunte a 28 giorni dai provini 4M, 8M, 4M* e 8M*.

Anche per la compressione, si riscontra che a parità di percentuale di precursori, l'aumento del rapporto w/s nel mix design comporta una diminuzione della resistenza. Si nota che la gerarchia delle resistenze dei provini a lavorabilità plastica e rigida rimane uguale, se non per il provino 100% GGBFS* (8M) che invece sale vertiginosamente all'abbassarsi del w/s.

5.4. Modulo elastico dinamico

Il modulo elastico di ogni provino è stato ricavato dall'elaborazione dei dati ottenuti tramite la prova ultrasonica, come spiegato in precedenza. I risultati sono riferiti al periodo di stagionatura di 28 giorni dei provini $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Il modulo elastico per ogni tipo di provino è stato ricavato mediando i risultati ottenuti tra due provini.

Nelle tabelle seguenti sono mostrati i valori del modulo elastico dinamico per tutti i provini. Per completezza vengono riportati anche i valori di peso, massa volumica, tempo di percorrenza e velocità delle onde ultrasoniche.

Di seguito vengono riportate le tabelle contenenti i risultati dell'indagine ultrasonica da cui sono stati ricavati i valori del modulo elastico dinamico per i provini 4M (Tabella 30), 8M (Tabella 31).

Tabella 30: Risultati della prova ultrasonica per il calcolo del modulo elastico medio ($E_{d,m}$) provini 4M.

Tipo	n° provino	Peso	Massa volumica	Tempo di percorrenza	Velocità	Modulo dinamico	Modulo dinamico medio
		P [g]	ρ [kg/m ³]	t_p [μs]	V [m/s]	E_d [GPa]	$E_{d,m}$ [GPa]
100% GGBFS (4M)	Provino 1	577,30	2255,08	40,20	3980,10	32,2	32,0
	Provino 2	575,93	2249,73	40,30	3970,22	31,9	
25% ABA (4M)	Provino 1	572,04	2234,53	41,50	3855,42	29,9	29,7
	Provino 2	561,39	2192,93	41,40	3864,73	29,5	
50% ABA (4M)	Provino 1	530,27	2071,37	45,30	3532,01	23,3	23,2
	Provino 2	536,10	2094,14	45,60	3508,77	23,2	
75% ABA (4M)	Provino 1	573,37	2239,73	50,40	3174,60	20,3	19,8
	Provino 2	560,52	2189,53	51,20	3125,00	19,2	
25% MS (4M)	Provino 1	556,37	2173,32	40,80	3921,57	30,1	29,9
	Provino 2	558,97	2183,48	41,20	3883,50	29,6	
50% MS (4M)	Provino 1	551,61	2154,73	43,70	3661,33	26,0	26,1
	Provino 2	551,70	2155,08	43,50	3678,16	26,2	
75% MS (4M)	Provino 1	558,72	2182,50	52,60	3041,83	18,2	18,0
	Provino 2	550,58	2150,70	52,60	3041,83	17,9	

Tabella 31: Risultati della prova ultrasonica per il calcolo del modulo elastico medio ($E_{d,m}$) dei provini 8M.

Tipo	n° provino	Peso	Massa volumica	Tempo di percorrenza	Velocità	Modulo dinamico	Modulo dinamico medio
		P [g]	ρ [kg/m ³]	t_p [μ s]	V [m/s]	E_d [GPa]	$E_{d,m}$ [GPa]
100% GGBFS (8M)	Provino 1	542,11	2117,62	42,00	3809,52	27,7	26,9
	Provino 2	540,64	2111,88	43,20	3703,70	26,1	
25% ABA (8M)	Provino 1	559,93	2187,23	44,50	3595,51	25,4	26,0
	Provino 2	562,07	2195,59	43,70	3661,33	26,5	
50% ABA (8M)	Provino 1	547,78	2139,77	47,40	3375,53	21,9	21,9
	Provino 2	545,92	2132,50	47,40	3375,53	21,9	
75% ABA (8M)	Provino 1	546,79	2135,90	53,20	3007,52	17,4	17,4
	Provino 2	543,62	2123,52	53,00	3018,87	17,4	
25% MS (8M)	Provino 1	557,92	2179,38	43,00	3720,93	27,2	27,3
	Provino 2	566,30	2212,11	43,10	3712,30	27,4	
50% MS (8M)	Provino 1	562,69	2198,01	45,70	3501,09	24,2	23,8
	Provino 2	550,63	2150,90	46,00	3478,26	23,4	
75% MS (8M)	Provino 1	569,84	2225,94	54,40	2941,18	17,3	17,0
	Provino 2	551,62	2154,77	54,50	2935,78	16,7	

Si riporta l'istogramma dei moduli elastici dinamici medi ($E_{d,m}$) per provini 4M e 8M (Figura 90).

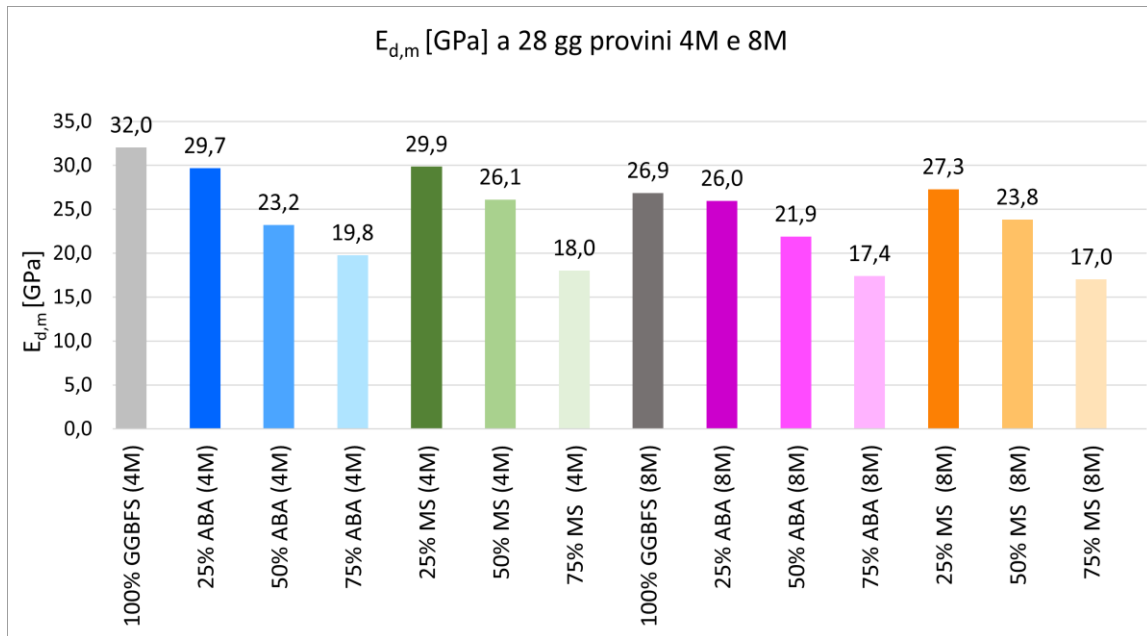


Figura 90: Istogramma con moduli elastici dinamici medi ($E_{d,m}$) per provini 4M e 8M.

A seguito dei risultati ottenuti, si osserva che i provini che presentano moduli elastici dinamici più elevati sono quelli attivati con la soluzione 4M. In particolare, il provino 100% GGBFS (4M) raggiunge il valore più elevato $E_{d,m} = 32,0$ GPa, seguito da 25% ABA (4M) e 25% MS (4M) che restituiscono valori intorno ai 30,0 GPa.

Il provino 8M più performante risulta essere il 25% MS (8M) $E_{d,m} = 27,3$ GPa, superando di poco il 100% GGBFS (8M) che ottiene $E_{d,m} = 26,9$ GPa.

I provini con i moduli elastici più bassi risultano quelli con il 75% di ABA e di MS per entrambe le molarità. In generale, anche per il modulo elastico si nota che all'aumentare del contenuto di ABA e MS il modulo elastico diminuisce.

Nella Tabella 32 sottostante si riportano i risultati dell'indagine ultrasonica da cui sono stati ricavati i valori del modulo elastico dinamico per i provini 4M* e 8M*.

Tabella 32: Risultati della prova ultrasonica per il calcolo del modulo elastico medio ($E_{d,m}$) dei provini 4M e 8M*.*

Tipo	n° provino	Peso	Massa volumica	Tempo di percorrenza	Velocità	Modulo dinamico	Modulo dinamico medio
		P [g]	ρ [kg/m ³]	t_p [μ s]	V [m/s]	E_d [GPa]	$E_{d,m}$ [GPa]
100% GGBFS* (4M)	Provino 1	575,74	2248,98	41,10	3892,94	30,7	30,6
	Provino 2	582,51	2275,43	41,50	3855,42	30,4	
25% ABA* (4M)	Provino 1	571,99	2234,34	41,70	3836,93	29,6	29,1
	Provino 2	575,12	2246,56	42,50	3764,71	28,7	
50% ABA* (4M)	Provino 1	548,37	2142,07	45,50	3516,48	23,8	24,2
	Provino 2	554,52	2166,09	45,00	3555,56	24,6	
100% GGBFS* (8M)	Provino 1	588,54	2298,98	39,70	4030,23	33,6	33,3
	Provino 2	581,38	2271,02	39,80	4020,10	33,0	
25% ABA* (8M)	Provino 1	564,54	2205,23	43,70	3661,33	26,6	28,3
	Provino 2	575,50	2248,05	41,60	3846,15	29,9	
50% ABA* (8M)	Provino 1	562,02	2195,39	44,60	3587,44	25,4	25,3
	Provino 2	542,38	2118,67	44,00	3636,36	25,2	

Si riporta il grafico dei moduli elastici dinamici medi ($E_{d,m}$) per provini 4M* e 8M* (Figura 91).

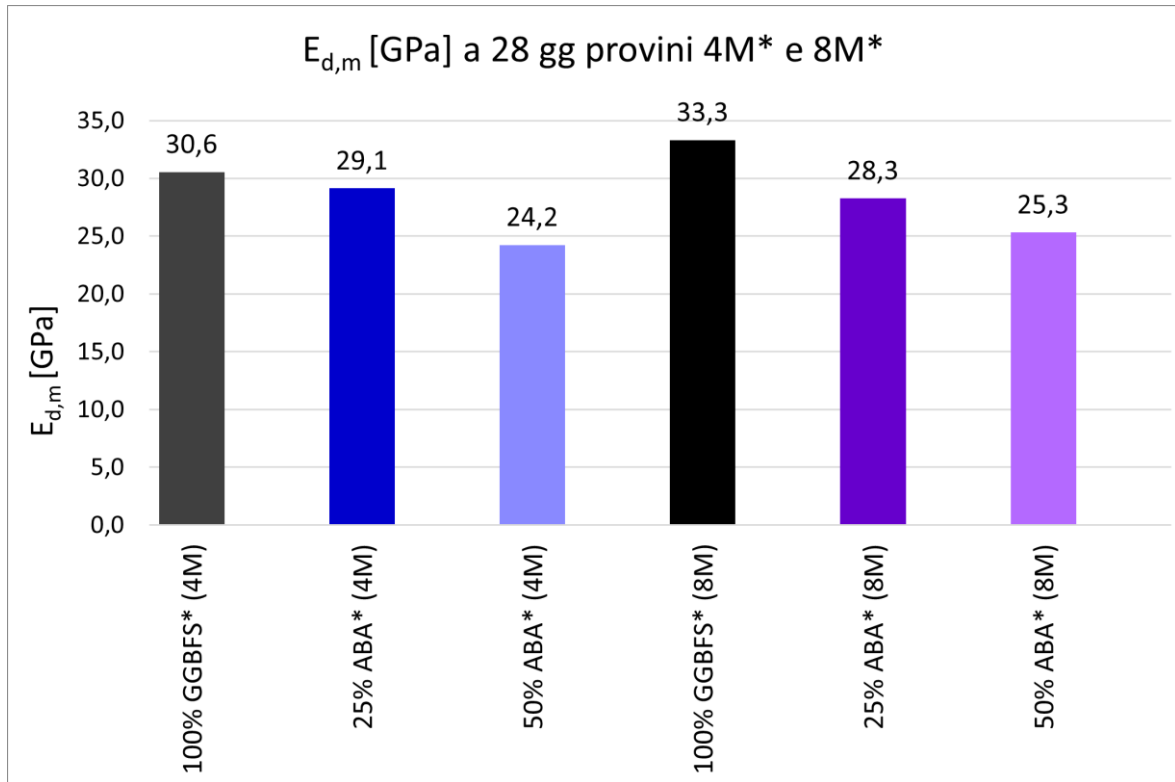


Figura 91: Istogramma con moduli elastici dinamici medi ($E_{d,m}$) per provini 4M* e 8M*.

Per i provini con w/s più bassi, il modulo elastico maggiore risulta per 100% GGBFS* (4M) con $E_{d,m}= 30,6$ GPa e il provino 100% GGBFS* (8M) con $E_{d,m}= 33,3$ GPa. Si osserva che nei provini in cui è presente l'ABA querlii attivati con 4M hanno risultati leggermente maggiori rispetto agli 8M*.

In ultimo, anche per il modulo elastico vengono confrontate le differenze che si riscontrano tra i provini 4M e 8M con w/s più altri e i provini 4M* e 8M* con w/s più bassi stagionati a 28 giorni a parità di percentuale di precursori (Figura 92).

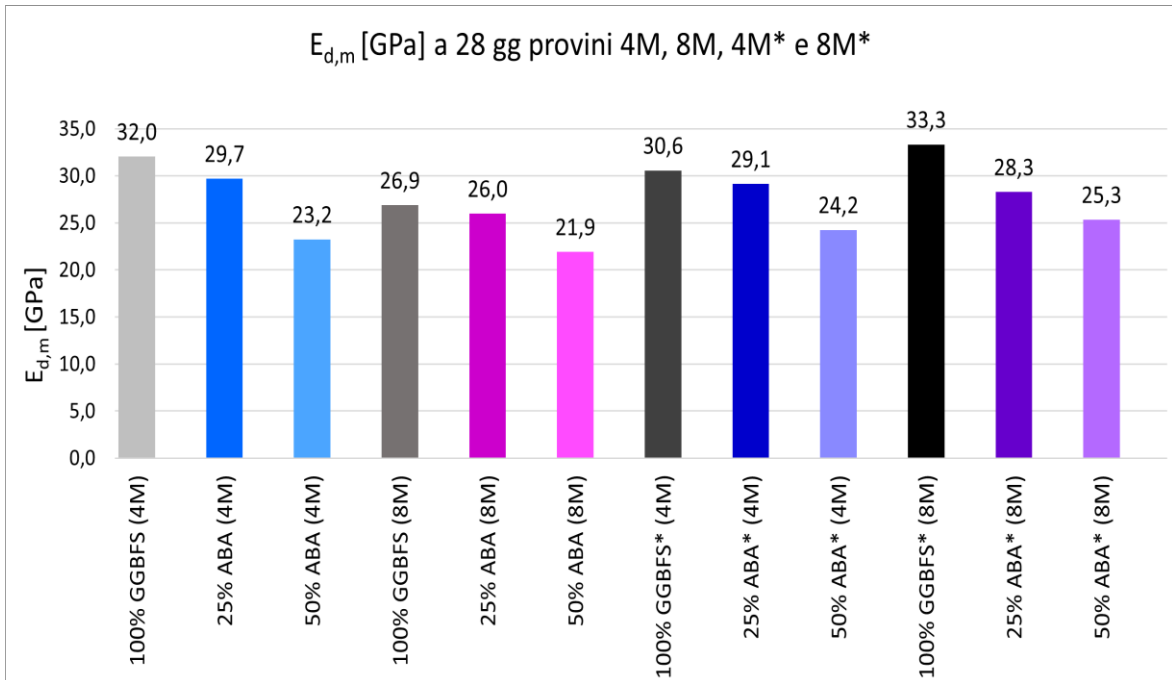


Figura 92: Istogramma con moduli elastici dinamici medi ($E_{d,m}$) dei provini 4M, 8M, 4M* e 8M*.

Il provino che restituisce il modulo elastico più alto in assoluto è il 100% GGBFS* (8M), ma subito a seguire c'è il 100% GGBFS (4M) che ha w/s maggiore ed è attivato con soluzione meno concentrata.

Inoltre è interessante far notare anche che il provino 25% ABA (4M) e il 100% GGBFS (4M) restituiscono modulo dinamico leggermente maggiore rispetto al 25% ABA* (4M) e 100% GGBFS* (4M), nonostante il w/s maggiore.

In generale, maggiore è il contenuto di GGBFS e maggiore è il modulo elastico dinamico.

Il modulo elastico dinamico fornisce indicazioni sulla resistenza del materiale, dalla teoria è noto che maggiore è E_d , più il provino dovrebbe essere performante. In generale si può affermare che i risultati ottenuti sono coerenti con le tipologie di malta anche se il modulo elastico dei provini con il 25% di ABA attivati con 4M è sempre leggermente minore di quello dei provini con il 100% di GGBFS attivati con 4M, mentre dalle prove meccaniche la resistenza risulta sempre maggiore.

5.5. Efflorescenze

Vengono mostrati i risultati del test delle efflorescenze, spiegato precedentemente (vedi paragrafo 4.4. "Test delle efflorescenze"). Dopo 7 giorni di esposizione all'aria, i provini 4M e 8M si presentano come mostrato in Figura 93.

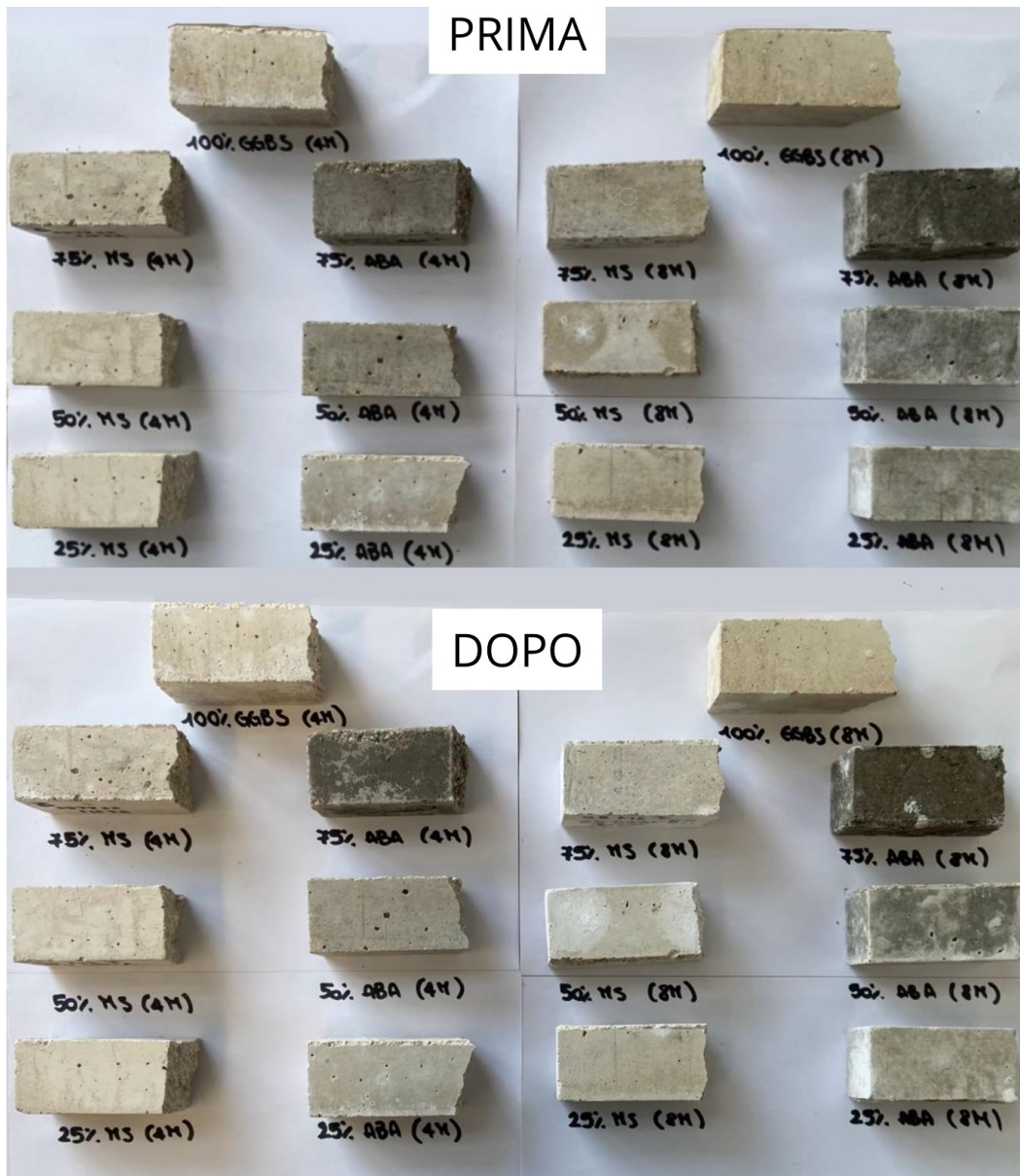


Figura 93: Prima e dopo la formazione delle efflorescenze per provini 4M e 8M.

I provini 4M non presentano efflorescenze, a differenza di alcuni provini 8M. Più precisamente il 75%ABA (8M) e il 50%MS (8M) esibiscono la maggior formazione di cristalli. La causa della formazione delle efflorescenze è da attribuirsi alla soluzione attivante. Si

ottiene conferma del fatto che maggiore è la concentrazione della soluzione attivante, più il fenomeno è evidente. Nonostante ciò, le efflorescenze sui provini 8M non si presentano in misura eccessiva.

Come accennato in precedenza, le efflorescenze possono essere ridotte aggiungendo all'impasto additivi ricchi di allumina e con polimerizzazione idrotermale a $T \geq 65 \text{ °C}$ [65]. In alternativa, per far indurire i campioni a temperatura ambiente e ridurre la formazione di efflorescenze è bene sostituire l'attivatore NaOH con KOH (idrossido di potassio), in quanto i cristalli di carbonato dello ione K^+ sono meno evidenti [66].

6. CONCLUSIONI

La presente tesi si sviluppa intorno al tema dei materiali attivati alcalinamente, argomento in continua evoluzione. Il focus della sperimentazione pone gli alcali attivati come possibili sostituti al cemento tradizionale.

Le analisi di caratterizzazione svolte mirano alla comprensione delle potenzialità della loppa d'altoforno (GGBFS), della sabbia di scarto di miniera (MS), della cenere di gusci di mandorle (ABA) e della cenere di rifiuti solidi urbani (MSWI) come precursori alcalini. Sulla base dei risultati che lo stato dell'arte riporta, tutti i materiali investigati potrebbero essere idonei a svolgere questa funzione in quanto contenenti composti potenzialmente reattivi.

Successivamente sulla base di mix design preliminari sono state realizzate delle paste di prova conoscere a priori il parziale comportamento dei precursori. I progetti preliminari delle miscele prevedono che la GGBFS venga presa come riferimento, realizzando un mix design che abbia il 100% di GGBFS come legante. Si procede sostituendo progressivamente il 25%, il 50%, il 75% ed infine il 100% in peso della GGBFS con gli altri precursori (MS, ABA e MSWI). Tutte le miscele vengono attivate con soluzione alcalina sia 4M che 8M.

Durante la preparazione delle paste di prova MSWI ha manifestato una reazione espansiva a ridosso dell'attivazione. Per questo motivo è stato scartato dalla sperimentazione poiché non adatto allo scopo.

Grazie alle informazioni ricavate dal confezionamento delle paste di prova, sono stati calcolati i mix design definitivi per la preparazione degli impasti a pari lavorabilità (verificata con la prova di spandimento troncoconico) per la realizzazione dei provini alcali-attivati.

Gli impasti con lavorabilità plastica sono stati ottenuti utilizzando $w/s = 0,5$ per quelli con molarità pari a 4 e $w/s = 0,45$ per quelli con molarità pari ad 8. Per ottenere impasti con consistenza rigida, i mix design con molarità pari a 4 sono stati calcolati con un $w/s = 0,40$ mentre quelli con molarità pari ad 8 con $w/s = 0,35$.

Infine, sono state eseguite delle prove sui provini di malta indurita.

A fronte dei risultati ottenuti dalle prove meccaniche eseguite a 2,7 e 28 giorni si può affermare che all' aumentare della sostituzione (in peso) della GGBFS con MS, le resistenze

meccaniche diminuiscono. Quando invece la sostituzione avviene per il 25% in peso con ABA, si riscontra generalmente un aumento della resistenza.

Le resistenze a flessione risultano complessivamente basse, infatti i provini che raggiungono le resistenze più alte sono il 25% ABA (4M), il 25% ABA* (4M) e il 100% GGBFS* (8M) i cui valori si attestano intorno ai 4-5 N/mm².

Le resistenze a compressione permettono di avanzare conclusioni interessanti perché i provini con il 25% di ABA attivati con soluzione 4M, raggiungono resistenze maggiori o paragonabili ai provini con il 100% di GGBFS per qualunque w/s e molarità.

La cenere di gusci di mandorle (ABA) si rivela il sottoprodotto industriale più promettente. Il provino 25% ABA (4M) si dimostra il migliore tra quelli con lavorabilità plastica, raggiungendo resistenza a compressione pari a 13,50 N/mm². Tra i provini con lavorabilità rigida, il 25% ABA* (4M) risulta essere tra i migliori e ottiene resistenza a compressione che si attesta intorno 18,00 N/mm². Anche il provino 50% ABA attivato con 4M per entrambi i w/s raggiunge resistenze simili al suo riferimento con il 100% di GGBFS.

Nel caso specifico si è complessivamente riscontrato che, in generale, l'aumento di molarità della soluzione attivante a parità di percentuale di precursori non ha portato un incremento delle resistenze meccaniche, bensì una diminuzione. Sapendo che l'attivatore è il punto debole della sostenibilità degli alcali-attivati, i provini con ABA 4M non sono solo i più resistenti, ma anche i più ecosostenibili.

Inoltre, il test delle efflorescenze ha permesso di dimostrare che nei provini 4M le efflorescenze non si formano, mentre nei provini attivati con concentrazioni di NaOH più alte (8M), si presentano in forma lieve.

Le caratteristiche fisico-meccaniche delle malte attivate alcalinamente, ottenute senza utilizzare cemento Portland e sostituendo il 25%-50% della GGBFS con un sottoprodotto di scarto, non hanno nulla da invidiare alle malte tradizionali ed hanno dimostrato di possedere le qualità per poter essere utilizzate in varie applicazioni.

In conclusione, i risultati ottenuti dalla presente sperimentazione sono estremamente interessanti. La ricerca sui materiali attivati alcalinamente, in cui vengono utilizzati come

precursori sottoprodotti di scarto, rappresenta una direzione promettente nel campo dei materiali da costruzione, ma è solo agli inizi.

Una complicazione importante nella realizzazione degli alcali-attivati risiede nella loro sensibilità alla variazione del contenuto d'acqua, che impedisce il pieno controllo della lavorabilità degli impasti. In ogni caso la sfida più ostica per questi materiali innovativi riguarda il fatto che trovare degli standard comuni per regolarne la produzione è difficile, in quanto il comportamento di ogni sottoprodotto è singolare. La mancanza di normative che regolino la qualificazione e l'utilizzo di questi materiali rappresenta un ostacolo per la loro diffusione su larga scala.

La comunità scientifica è incoraggiata a perseguire ulteriori indagini e sperimentazioni al fine di contribuire al progresso di questa promettente area di studio per avanzare verso una produzione e diffusione di materiali ad attivazione alcalina più sostenibile, efficiente ed in linea con gli standard qualitativi richiesti dall'industria delle costruzioni.

7. Ringraziamenti

*Vorrei ringraziare il Prof. Jacopo Donnini, mio relatore,
l'Ing. Alessandra Mobili e la Prof.ssa Valeria Corinaldesi, mie correlatrici,
per il grande supporto alla stesura di questa tesi,
per la disponibilità e gentilezza dimostrate.*

*Ad Elisa e Daniele,
due dottorandi con tanta testa quanto cuore,
grazie per avermi accompagnato, insegnato e fatto divertire.*

*Un immenso grazie ai miei genitori,
per avermi lasciato libera di fare le mie scelte, fin da quando ero piccola.
Grazie per essere sempre stati orgogliosi di me.*

*Un ringraziamento speciale va ai miei nonni,
per avermi insegnato il valore dell'istruzione ed avermi incoraggiato senza eccezione.*

*Ai miei amici,
per avermi sempre ricordato che nessun ostacolo è insormontabile,
per tutti i nostri momenti di spensieratezza,
perché mi sento fortunata.
Grazie di cuore.*

*Infine voglio ringraziare me stessa,
per non aver mai smesso di credere di potercela fare.*

8. Indice delle figure

Figura 1: Schema semplificato delle emissioni di CO ₂ prodotte durante processo di produzione del cemento, confrontate con quelle di sottoprodotti industriali che potrebbero sostituirlo. Lo spessore delle frecce è proporzionale alla quantità di materiale.	3
Figura 2: Schema di formazione degli alcali-attivati.	5
Figura 3: Proposta di classificazione di “materiali attivati con alcali” confrontati con il cemento Portland, secondo J.S.J. Van Deventer e J.L. Provis [3].	5
Figura 4: Loppa d'altoforno (GGBFS).	8
Figura 5: Sabbia di scarto di miniera (MS).	9
Figura 6: Cenere di gusci di mandorle (ABA).	10
Figura 7: Cenere di rifiuti solidi urbani (MSWI).	11
Figura 8: Soda caustica in scaglie (NaOH).	12
Figura 9: Campioni di MS, ABA e MSWI tal quale.	17
Figura 10: Mulino a biglie (a); mulino caricato con biglie di diverse dimensioni (b).	18
Figura 11: Setacciatrice (a); pila di setacci con relative aperture (b).	19
Figura 12: Curva granulometrica di ABA tal quale, macinato a 15,30 e 60 minuti.	22
Figura 13: Curva granulometrica di MS tal quale, macinato a 15,30 e 60 minuti.	23
Figura 14: Formazione di agglomerati in MS e ABA al setaccio con apertura 500 µm.	24
Figura 15: Formazione di agglomerati in MS con l'aggiunta di glicole dietilenico.	25
Figura 16: Diffrattogramma GGBFS.	27
Figura 17: Diffrattogrammi di MS, MSWI e ABA.	28
Figura 18: Scansione SEM del campione GGBF-zona 1.	30
Figura 19: Scansione SEM del campione GGBF-zona 2.	30
Figura 20: Diffrattogramma campione GGBFS- zona 1 (sopra); risultati indagini SEM+EDX campione GGBFS- zona 1 (sotto).	31
Figura 22: Scansione SEM del campione MSWI-zona 2.	32
Figura 21: Scansione SEM del campione MSWI-zona 1.	32
Figura 23: Diffrattogramma campione MSWI-zona 1 (sopra); risultati indagini SEM+EDX campione MSWI- zona 1 (sotto).	33
Figura 24: Scansione SEM del campione ABA-zona 2.	34
Figura 25: Scansione SEM del campione ABA-zona 1.	34

Figura 26: Diffratogramma campione ABA-zona 1 (sopra); risultati indagini SEM+EDX campione ABA- zona 1 (sotto).	35
Figura 27: Scansione SEM del campione MS-zona 2.....	36
Figura 28: Scansione SEM del campione MS-zona 1.....	36
Figura 29: Diffratogramma campione MS-zona 1 (sopra); risultati indagini SEM+EDX campione MS-zona 1 (sotto).	37
Figura 30: Peso della polvere (a); posizionamento dell'ancora magnetica (b); bicchiere di teflon caricato e posizionato sull'agitatore elettromagnetico (c).	39
Figura 31: Filtrazione della soluzione (a); lavaggio del bicchiere (b).	39
Figura 32: pH basico delle soluzioni verificato con la cartina tornasole.	40
Figura 33: Acidificazione della soluzione alcalina (a); pH acido delle soluzioni verificato con la cartina tornasole (b).....	40
Figura 34: Soluzioni portate a volume con matraccio (a); contenitori con controtappo per conservare tutti i campioni da analizzare (b).	41
Figura 35: Pesatura picnometro vuoto.	43
Figura 36: Inserimento polveri tramite imbuto (a); pesatura picnometro con polvere (b).....	43
Figura 37: Uso della pipetta per riempire il picnometro (a); picnometro con acqua e polvere in sospensione (b); pesatura picnometro con acqua e polvere(c).....	44
Figura 38: Pulizia del picnometro con bagno ad ultrasuoni.....	44
Figura 39: Pesatura picnometro riempito con acqua distillata.....	45
Figura 40: Grafico curva di calibrazione pH.	47
Figura 41: Pesatura polvere (a); pesatura acqua (b); posizionamento del campione sull'agitatore elettromagnetico (c).....	47
Figura 42: Rilevamento del pH con pH-metro da banco (a); verifica del pH con cartina tornasole (b).	48
Figura 43: Pastina di MSWI w/s=0,38 non lavorabile.	51
Figura 44: Pastina MSWI all'inizio della reazione espansiva (a); pastina MSWI al termine della fase espansiva (b), pastina MSWI indurita (c).	51
Figura 45: Pastine di prova 4M a 2 giorni con relativa durezza.	53
Figura 46: Pastine di prova 8M a 2 giorni con relativa durezza.	53
Figura 47: Casseri in plastica.	57
Figura 48: Cassero in acciaio (a); casseri in acciaio ricoperti con scotch (b).....	58

Figura 49: Schematizzazione degli step necessari alla realizzazione dei provini alcali-attivati.	58
Figura 50: Pesatura della soda (a), posizionamento della soda nel contenitore che ospiterà la soluzione alcalina (b); pesatura acqua (c).	59
Figura 51: Soluzioni alcaline.	60
Figura 52: Pesatura delle polveri.	60
Figura 53: Pesatura acqua (a), pesatura sabbia (b), sabbia resa s.s.a (c).	61
Figura 54: Unione delle polveri con la sabbia s.s.a. (a); omogeneizzazione della miscela (b).	61
Figura 55: Omogeneizzazione impasto con trapano miscelatore (a); impasto omogeneo pronto per il getto (b).	62
Figura 56: Tavola a scosse e stampo troncoconico (con misure).	63
Figura 57: Riempimento dello stampo troncoconico (a); costipamento della malta (b); rimozione dello stampo troncoconico (c).	64
Figura 58: Getto dell'impasto all'interno del cassero (a); provini pronti per la fase stagionatura (b).	65
Figura 59: Limatura provini (a); scasseratura tramite aria compressa (b).	66
Figura 60: Provini 4M stagionati a 2 giorni.	67
Figura 61: Provini 8M stagionati a 2 giorni.	67
Figura 62: Provini 4M* e 8M* stagionati 2 giorni.	68
Figura 63: Schema della prova di flessione come da normativa UNI EN 1015-11:2007.	70
Figura 64: Macchina di compressione Galbadini usata nella sperimentazione (a); setup di prova a flessione prima e dopo la rottura (b).	70
Figura 65: Setup di prova a compressione.	72
Figura 66: Posizionamento sottile strato di grasso sulle sonde (a); calibrazione dello strumento (b).	74
Figura 67: Posizionamento sottile strato di grasso sulle basi minori dei provini (a); misurazione del tempo di percorrenza delle onde ultrasoniche attraverso il provino (b).	74
Figura 68: Provini 4M e 8M appena rimossi dalla pellicola, prima della formazione delle efflorescenze.	76
Figura 69: Spandimenti (D_1 e D_2) per 100%GGBF (4M), 25%MS (4M) e 25% ABA (4M).	77
Figura 70: Spandimenti (D_1 e D_2) per 50%MS (4M), 75%MS (4M), 50%ABA (4M) e 75%ABA (4M).	78
Figura 71: Spandimenti (D_1 e D_2) per 100%GGBF(8M), 25%MS (8M) e 25% ABA (8M).	78

Figura 72: Spandimenti (D1 e D2) per 50%MS (8M), 75%MS (8M), 50%ABA (8M) e 75%ABA (8M).	79
Figura 73: Spandimenti (D1 e D2) per 100%GGBFS* (4M), 25%ABA* (4M) e 50%ABA *(4M).	79
Figura 74: Spandimenti (D1 e D2) per 100%GGBFS* (8M), 25%ABA* (8M) e 50%ABA *(8M).	80
Figura 75: Provini 4M e 8M rotti a flessione.	87
Figura 76: Provini 4M* e 8M* rotti a flessione.	88
Figura 77: Tensioni massime a flessione ($\sigma_{m,max}$) raggiunte a 2, 7 e 28 giorni dai provini 4M.	88
Figura 78: Tensioni massime a flessione ($\sigma_{m,max}$) raggiunte a 2, 7 e 28 giorni dai provini 8M.	89
Figura 79: Tensioni massime a flessione ($\sigma_{m,max}$) raggiunte a 28 giorni dai provini 4M e 8M.	89
Figura 80: Tensioni massime a flessione ($\sigma_{m,max}$) raggiunte a 2, 7 e 28 giorni dai provini 4M* e 8M*.	90
Figura 81: Tensioni massime a flessione ($\sigma_{m,max}$) raggiunte a 28 giorni dai provini 4M* e 8M*.....	91
Figura 82: Tensioni massime a flessione ($\sigma_{m,max}$) raggiunte a 28 giorni dai provini 4M, 8M, 4M* e 8M*	92
Figura 83: Spezzone di provino testato a compressione con tipica rottura a clessidra.	98
Figura 84: Tensioni massime a compressione ($\sigma_{c,m,max}$) raggiunte a 2, 7 e 28 giorni dai provini 4M.	99
Figura 85: Tensioni massime a compressione ($\sigma_{c,m,max}$) raggiunte a 2, 7 e 28 giorni dai provini 8M.	99
Figura 86: Tensioni massime a compressione ($\sigma_{c,m,max}$) raggiunte a 28 giorni dai provini 4M e 8M.	100
Figura 87: Tensioni massime a compressione ($\sigma_{c,m,max}$) raggiunte a 2, 7 e 28 giorni dai provini 4M* e 8M*	101
Figura 88: Tensioni massime a compressione ($\sigma_{c,m,max}$) raggiunte a 28 giorni dai provini 4M* e 8M*.	101
Figura 89: Tensioni massime a compressione ($\sigma_{c,m,max}$) raggiunte a 28 giorni dai provini 4M, 8M, 4M* e 8M*	102
Figura 90: Istogramma con moduli elastici dinamici medi ($E_{d,m}$) per provini 4M e 8M.	104
Figura 91: Istogramma con moduli elastici dinamici medi ($E_{d,m}$) per provini 4M* e 8M*	106
Figura 92: Istogramma con moduli elastici dinamici medi ($E_{d,m}$) dei provini 4M, 8M, 4M* e 8M*	107
Figura 93: Prima e dopo la formazione delle efflorescenze per provini 4M e 8M.	108

9. Indice delle tabelle

Tabella 1: Dati raccolti per la realizzazione delle curve granulometriche di ABA tal quale, macinato a 15, 30 e 60 minuti.....	21
Tabella 2: Dati raccolti per la realizzazione delle curve granulometriche di ABA tal quale, macinato a 15, 30 e 60 minuti.....	22
Tabella 3: Determinazione ICP-OES delle specie solubili di Si, Al, Ca, K, Fe e Mg (espresse come mg/L) in NaOH 8M a 80 °C.....	42
Tabella 4: Dati raccolti durante la prova per il calcolo della densità.	46
Tabella 5: Risultati dei pH di tutti i materiali sottoposti all'analisi.	48
Tabella 6: Mix design di tutti gli impasti per cui si vuole ottenere consistenza plastica.	55
Tabella 7: Mix design di tutti gli impasti per cui si vuole ottenere consistenza rigida.	55
Tabella 8: Classi di consistenza delle malte secondo la UNI EN 1015-6:2007.	64
Tabella 9: Risultati spandimenti malte 4M.	81
Tabella 10: Risultati spandimenti malte 8M.	81
Tabella 11: Risultati spandimenti malte 4M* e 8M*	82
Tabella 12: Risultati delle prove a flessione a 2 giorni per provini 4M.	83
Tabella 13: Risultati delle prove a flessione a 7 giorni per provini 4M.	83
Tabella 14: Risultati delle prove a flessione a 28 giorni per provini 4M.	84
Tabella 15: Risultati delle prove a flessione a 2 giorni per provini 8M.	84
Tabella 16: Risultati delle prove a flessione a 7 giorni per provini 8M.	85
Tabella 17: Risultati delle prove a flessione a 28 giorni per provini 8M.	85
Tabella 18: Risultati delle prove a flessione a 2 giorni per provini 4M* e 8M*.....	86
Tabella 19: Risultati delle prove a flessione a 7 giorni per provini 4M* e 8M*.....	86
Tabella 20: Risultati delle prove a flessione a 28 giorni per provini 4M* e 8M*.....	87
Tabella 21: Risultati delle prove a compressione a 2 giorni per provini 4M.....	93
Tabella 22: Risultati delle prove a compressione a 7 giorni per provini 4M.....	93
Tabella 23: Risultati delle prove a compressione a 28 giorni per provini 4M.....	94
Tabella 24: Risultati delle prove a compressione a 2 giorni per provini 8M.....	95
Tabella 25: Risultati delle prove a compressione a 7 giorni per provini 8M.....	95
Tabella 26: Risultati delle prove a compressione a 28 giorni per provini 8M.....	96
Tabella 27: Risultati delle prove a compressione a 2 giorni per provini 4M* e 8M*.....	97
Tabella 28: Risultati delle prove a compressione a 7 giorni per provini 4M* e 8M*.....	97

Tabella 29: Risultati delle prove a compressione a 28 giorni per provini 4M* e 8M*.	98
Tabella 30: Risultati della prova ultrasonica per il calcolo del modulo elastico medio ($E_{d,m}$) provini 4M.	103
Tabella 31: Risultati della prova ultrasonica per il calcolo del modulo elastico medio ($E_{d,m}$) dei provini 8M.	104
Tabella 32: Risultati della prova ultrasonica per il calcolo del modulo elastico medio ($E_{d,m}$) dei provini 4M* e 8M*.	105

10. Bibliografia

- [1] Caijun Shi, A. Fernández Jiménez, Angel Palomo, New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research* 41 (2011) 750–763.
- [2] Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., Bahadori, A., 2013. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry. *J. Clean. Prod.* 51, 142e161.
- [3] Rashad, A.M., Zeedan, S.R., 2011. The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load. *Construct. Build. Mater.* 25, 3098e3107.
- [4] RILEM (Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages. www.rilem.net.
- [5] Cristina Leonelli, Marcello Romagnoli. “Geopolimeri, polimeri inorganici chimicamente attivati”, seconda edizione, I.Cer.S., Lulu.com, ISBN: 978-1-291-63965-0, Bologna 2013..
- [6] Mohammed Haloob Al-Majidi, Andreas Lampropoulos, Andrew Cundy, Steve Meikle. “Development of geopolymers mortar under ambient temperature for in situ applications”. *Construction and Building materials* (2016). Vol. 120: pp. 198-211.
- [7] Davidovits, M. Izquierdo, X. Querol, et al.,. “The European Research Project GEOASH: Geopolymer Cement based on European Coal Fly Ashes”. Technical Paper #22, Geopolymer Institute Library, 2014.
- [8] John L. Provis, Angel Palomo, Caijun Shi (2015) Advances in understanding alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research* 78 (2015) 110–125.
- [9] F. Pacheco-Torgal, J.A. Labrincha, C. Leonelli, A. Palomo, P. Chindapasirt, Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes. WoofgeadmPublish, 2015., Woodhead Publishing, 2015. DOI:10.1016/C2013-0-16511-7.
- [10] A. Palomo, P. Krivenko, I. Garcia-Lodeiro, E. Kavalerova, O. Maltseva, A. Fernández-Jiménez, A review on alkaline activation: new analytical perspectives, *Materiales de Construcción*. 64 (315) (2014) e022, <https://doi.org/10.3989/mc.2014.00314>.
- [11] Bo Ren, Yunliang Zhao, Haoyu Bai, Shichang Kang, Tingting Zhang, Shaoxian Song, Eco-friendly geopolymer prepared from solid wastes: A critical review.
- [12] V.D. Glukhovskiy, G.S. Rostovskaja, G.V. Rumyna. “High strength slag alkaline cements”. *Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cement* (1980). Vol. 3: pp. 164-8.

- [13] L. Dong, X. Tong, X. Li, J. Zhou, S. Wang, B. Liu, Some developments and new insights of environmental problems and deep mining strategy for cleaner production in mines, *J. Clean. Prod.* 210 (2019) 1562–1578.
- [14] M. Nurcholis, D.F. Yudiantoro, D. Haryanto, A. Mirzam, Heavy metals distribution in the artisanal gold mining area in Wonogiri, Indones. *J. Geogr.* 49 (2) (2017) 133–144.
- [15] W.-h Zhou, et al., Revegetation approach and plant identity unequally affect structure, ecological network and function of soil microbial community in a highly acidified mine tailings pond, *Sci. Total Environ.* 744 (2020), 140793.
- [16] A. Vasile, et al., An integrated value chain to iron-containing mine tailings capitalization by a combined process of magnetic separation, microwave digestion and microemulsion – assisted extraction, *Process Saf. Environ. Prot.* 154 (2021) 118–130.
- [17] N. Min, J. Yao, M. Amde, et al., Accelerated solvent extraction combined with GC–MS: a convenient technique for the determination and compound-specific stable isotope analysis of phthalates in mine tailings, *Microchem. J.* 153 (2020), 104366.
- [18] D. Komljenovic, L. Stojanovic, V. Malbasic, A. Lukic, A resilience-based approach in managing the closure and abandonment of large mine tailing ponds, *Int. J. Min. Sci. Technol.* 30 (5) (2020) 737–746.
- [19] G. Lazorenko, A. Kasprzhitskii, F. Shaikh, R. Krishna, J. Mishra, Utilization potential of mine tailings in geopolymers: part 1. Physicochemical and environmental aspects, *Process Saf. Environ. Prot.* (2021)..
- [20] Shaker M.A. Qaidi, Bassam A. Tayeh, Abdullah M. Zeyad, Afonso R. G. de Azevedo, Hemn Unis Ahmed, Wael Emad, Recycling of mine tailings for the geopolymers production: A systematic review.
- [21] E.M. Opiso, et al., Synthesis and characterization of coal fly ash and palm oil fuel ash modified artisanal and small-scale gold mine (ASGM) tailings based geopolymer using sugar mill lime sludge as Ca-based activator, *Heliyon* 7 (4) (2021), e06654.
- [22] E. Arioiz, O. Arioiz, O.M. Kockar, Leaching of F-type fly ash based geopolymers, *Procedia Eng.* 42 (2012) 1114–1120.
- [23] C. Anning, J. Wang, P. Chen, I. Batmunkh, X. Lyu, Determination and detoxification of cyanide in gold mine tailings: a review, *Waste Manag. Res.* 37 (11) (2019) 1117–1126.
- [24] I. Park, C.B. Tabelin, S. Jeon, X. Li, K. Seno, M. Ito, N. Hiroyoshi, A review of recent strategies for acid mine drainage prevention and mine tailings recycling, *Chemosphere* 219 (2019) 588–606.
- [25] <https://www.treccani.it/>.

- [26] <https://www.cnr.it/>.
- [27] Annalisa Natali Murri, Valentina Medri, Andreana Piancastelli, Angelo Vaccari, Elena Landi, Production and characterization of geopolymer blocks based on hydroxyapatite rich biomass ashes.
- [28] J.M. Mejía, R. Mejía de Gutiérrez, F. Puertas, Ceniza de cascarilla de arroz como fuente de sílice en sistemas cementicios de ceniza volante y escoria activados alcalinamente, *Materiales de Construcción*. 63 (2013) 361–375.
- [29] J.C.B. Moraes, A. Font, L. Soriano, J.L. Akasaki, et al., New use of sugar cane straw ash in alkali-activated materials: a silica source for the preparation of the alkaline activator, *Constr. Build. Mater.* 171 (2018) 611–621.
- [30] A. Mellado, C. Catalán, N. Bouzón, M.V. Borrachero, J.M. Monzó, J. Payá, Carbon footprint of geopolymeric mortar: study of the contribution of the alkaline activating solution and assessment of an alternative route, *RSC Adv.* 4 (2014) 23846–23852.
- [31] MEE, 2019. 2019 National Annual Report of Solid Waste Pollution Prevention and Control in Big and Medium-Sized Cities (in chinese).
- [32] Luca Bertolini, Maddalena Carsana, Davide Cassago, Alessandro Quadrio Curzio, Mario Collepardi, MSWI ashes as mineral additions in concrete.
- [33] Moghadam, M.J., Ajalloeian, R., Hajiannia, A., (2019) Preparation and application of alkali-activated materials based on waste glass and coal gangue: a review.
- [34] J. Pera, L. Coutaz, J. Ambroise, M. Chababbet, Use of incinerator bottom ash in concrete, *Cem. Concr. Res.* 27 (1) (1997) 1 – 5.
- [35] M.M.C. Alkemade, M.M.T. Eymael, How to prevent expansion of MSWI bottom ash in road construction?.
- [36] G. Pecqueur, C. Crignon, B. Quéne'e, Behaviour of cement-treated MSWI bottom ash, *Waste Manage.* 21 (2001) 229–233..
- [37] B. Laenen, R. Dreesen, D. Van Rossem, Aggregate cement reactions in MWI-bottom ash-based concrete—a petrographical assessment.
- [38] J.E. Halliday, R.K. Dhir, Full scale trials using incinerator bottom ash in cement based product.
- [39] Khale D., R. Chaudhary. "Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review." *J. Mater. Sci.* Vol. 42(9), 2007: 729-46.
- [40] Maxim Kovtun, Elsabe P. Kearsley, Julia Shekhovtsova (2015) Chemical acceleration of a neutral granulated blast-furnace slag activated by sodium carbonate. *Cement and Concrete Research* 72 (2015) 1–9.

- [41] Aliabdo, A.A., Abd Elmoaty, M., Salem, H.A., 2016. Effect of water addition, plasticizer and alkaline solution constitution on fly ash based geopolymer concrete performance. *Construct. Build. Mater.* 121, 694–703.
- [42] Duran Atis, C., Bilim, C., Çelik, Ö., Karahan, O., 2009. Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. *Construct. Build. Mater.* 23, 548–555..
- [43] Ryu, G.S., Lee, Y.B., Koh, K.T., Chung, Y.S., 2013. The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construct. Build. Mater.* 47, 409–418.
- [44] E. Ozcelikci, et al., A comprehensive study on the compressive strength, durability-related parameters and microstructure of geopolymer mortars based on mixed construction and demolition waste, *J. Clean. Prod.* 396 (2023) 136522.
- [45] M.A. Longhi, Z. Zhang, E.D. Rodríguez, A.P. Kirchheim, H. Wang, Efflorescence of alkali-activated cements (geopolymers) and the impacts on material structures: a critical analysis, *Front Mater.* 6 (2019).
- [46] H.A. Ali, K. Sun, D. Xuan, J.X. Lu, M. Cyr, C.S. Poon, Recycling of high-volume waste glass powder in alkali-activated materials: an efflorescence mitigation strategy, *J. Build. Eng.* 65 (2023) 105756.
- [47] Y. Wang, X. Liu, W. Zhang, Z. Li, Y. Zhang, Y. Li, Y. Ren, Effects of Si/Al ratio on the efflorescence and properties of fly ash based geopolymer, *J. Clean. Prod.* 244 (2020) 118852.
- [48] A. De Rossi, L. Simão, M.J. Ribeiro, D. Hotza, R.F.P.M. Moreira, Study of cure conditions effect on the properties of wood biomass fly ash geopolymers, *J. Mater. Res. Technol.* 9 (2020) 7518–7528.
- [49] A. Allahverdi, E. Najafi Kani, K.M.A. Hossain, M. Lachemi, Methods to control efflorescence in alkali-activated cement-based materials.
- [50] Raffaele Cioffi, Francesco Colangelo, Francesco Messina (2013) Life cycle analysis (lca) per la valutazione della sostenibilità ambientale dei geopolimeri.
- [51] Arne Peys, Hubert Rahier, Yiannis Pontikes, Potassium-rich biomass ashes as activators in metakaolin-based inorganic polymers.
- [52] Bouzon, N., Paya, J., Borrachero, M.V., Soriano, L., Tashima, M.M., Monzo, J., 2014. Refluxed rice husk ash/naoh suspension for preparing alkali activated binders. *Mater. Lett.* 115, 72–74.
- [53] 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.

- [54] J.L. Provis, J.S.J. van Deventer. "Geopolymers: structures, processing, properties and industrial application", Edit. Woodhead, Publishing Ltd. And CRC Press LLC, ISBN:978-1-84569-449-4 (2009).
- [55] V. Medri, L'industria dei Laterizi, 115 (2009) 48-53.
- [56] Chiara Leonardi, Sviluppo di nuovi materiali geopolimerici per l'applicazione nel settore dei beni culturali. Alma Mater Studiorum – Università di Bologna, corso di laurea magistrale in chimica industriale, 2010.
- [57] Cristina Leonelli, Elie Kamseu, Materie prime di origine naturale nel processo di geopolimerizzazione, Dipartimento di Ingegneria dei Materiali e dell'Ambiente, Università di Modena e Reggio Emilia, Modena.
- [58] Serkan CAYIRLI, Hasan Serkan GOKCEN, Nuri YUCE, Obaidullah ELCHI, Investigation of the usage of waste materials and By-Products as grinding aids in calcite grinding.
- [59] Lancellotti, I., Piccolo, F., Traven, K., Češnovar, M., Ducman, V., & Leonelli, C. (2021). Alkali activation of metallurgical slags: Reactivity, chemical behavior, and environmental assessment. *Materials*, 14(3), 639.
- [60] Ke, X.; Bernal, S.A.; Ye, N.; Provis, J.L.; Yang, J. One-Part Geopolymers Based on Thermally Treated Red Mud/NaOH Blends. *J. Am. Ceram. Soc.* 2014, 11, 5–11.
- [61] S. Samantasinghar, S.P. Singh, Effect of synthesis parameters on compressive strength of fly ash-slag blended geopolymer, *Constr. Build. Mater.* 170 (2018) 225–234.
- [62] A.A. Adam, B.R. Ramadhan, S. Maricar, The effects of water to solid ratio, activator to binder ratio, and lime proportion on the compressive strength of ambient-cured geopolymer concrete, *J. Civ. Eng. Forum* 5 (2019).
- [63] H. Castillo, H. Collado, T. Droguett, S. Sánchez, M. Vesely, P. Garrido, S. Palma, Factors affecting the compressive strength of geopolymers: a review, *Minerals* 11 (2021) 1317.
- [64] C. Komnitsas, D. Zaharaki; *Minerals Engineering* 20 (2007) 1261-1277.
- [65] E.N. Kani, A. Allahverdi, J.L. Provis, Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan, *Cem. Concr. Compos.* 34 (1) (2012) 25–33.
- [66] Alessandra Mobili, Alberto Belli, Chiara Giosuè, Tiziano Bellezze, Francesca Tittarelli, Metakaolin and fly ash alkali-activated mortars compared with cementitious mortars at the same strength class.