UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

Valorizzazione di aggregati e polveri derivanti da matrici ad attivazione alcalina per lo sviluppo di nuove formulazioni sostenibili

Valorization of aggregates and powders deriving from alkaline-activated matrices for the development of new sustainable formulations

Relatore:

Prof. **Jacopo Donnini**

Tesi di Laurea di:

Nicola Cecchini

Correlatrice:

Ing. **Alessandra Mobili**

A.A. 2025/2026

INDICE

1. INTRODUZIONE…….……..…....7

1.1 Premessa…….....7

1.2 Il progetto RECONSTRUCT…….....8

1.3 Obiettivo della tesi.....10

2. STATO DELL'ARTE……...……..11

2.1 Generalità sui materiali ad attivazione alcalina.....11

2.2 Il precursore alcalino.....11

2.3 Loppa d'altoforno granulata (GGBFS).....12

2.4 Il meccanismo della latenza.....14

2.5 L'attivatore alcalino..... 15

2.6 Il processo di attivazione alcalina.....16

2.7 Cenni storici.....18

3. MATERIALI.....19

3.1 Materiali impiegati.....20

4. METODI DI PROVA.....23

4.1 Prova di spandimento.....23

4.2 Prova di flessione.....25

4.3 Prova di compressione.....27

4.4 Pundit 28

5. RISULTATI SPERIMENTALI.....31

5.0.1 Caratterizzazione fisica dei materiali.....31

5.1 Malte: fase 1.....41

5.1.1 Mix design dei getti.....41

5.1.2 Confezionamento..... 43

5.1.3 Analisi dei risultati del Pundit.....50

5.1.4 Analisi dei risultati delle prove di flessione e di compressione...51
5.2 Malte: fase 2.....56
5.2.1 Confezionamento malte-fase 2.....57
5.2.2 Prove di compressione a 2, 7 e 28 giorni-fase 2.....61
5.3 Malte: fase 3.....66
5.3.1 Confezionamento malte-fase 3.....66
5.3.2 Prove di compressione a 2, 7 e 28 giorni-fase 3.....69
5.4 Fase 2 vs Fase 3: confronto dei risultati.....72
6.CONCLUSIONI.....74
7.BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....76

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Logo del progetto RECONSTRUCT

Figura 2. Coupon rinforzati con fibra di carbonio prodotti da VUB

Figura 3. Loppa d'altoforno granulata (GGBFS)

Figura 4. Processo di attivazione alcalina

Figura 5. Sabbia alcali-attivata

Figura 6. Frazione della sabbia alcali-attivata usata come precursore

Figura 7. Frazione della sabbia alcali-attivata usata come aggregato

Figura 8. Sabbia naturale calcarea (0/4 mm)

Figura 9. Sabbia naturale silicea (0/1 mm)

Figura 10. Tavola a scosse

Figura 11. Prova di flessione

Figura 12. Provino sottoposto a prova di flessione

Figura 13. Provino sottoposto a prova di compressione

Figura 14. Calibrazione Pundit

Figura 15. Misurazione del tempo di attraversamento degli impulsi ultrasonici

Figura 16. Setacciatrice meccanica

Figura 17. Curve granulometriche delle sabbie (generata con IA)

Figura 18. Condizione di aggregato bagnato

Figura 19. Aggregato in condizione saturo superficie asciutta

Figura 20. Pastine con KOH indurite

Figura 21. Pastine con NaOH indurite

Figura 22. Cassero in acciaio 4x4x16 cm^3

Figura 23. Trapano miscelatore

Figura 24. Prova di spandimento 100%SN KOH-misurazione 1

Figura 25. Prova di spandimento 100%SN KOH-misurazione 2

Figura 26. Prova di spandimento 50%SN/50%AAS KOH-misurazione 1

Figura 27. Prova di spandimento 50%SN/50%AAS KOH-misurazione 2

Figura 28. Prova di spandimento 100%SN NaOH-misurazione 1

Figura 29. Prova di spandimento 100%SN NaOH-misurazione 2

Figura 30. Prova di spandimento 50%SN/50%AAS NaOH-misurazione 1

Figura 31. Prova di spandimento 50%SN/50%AAS NaOH-misurazione 2

Figura 32. Valori medi di E_d [GPa]

Figura 33. Valori medi di resistenza a flessione malte fase 1
Figura 34. Valori medi di resistenza a compressione malte fase 1
Figura 35. Cilindretti usati per il confezionamento delle malte delle fasi 2 e 3
Figura 36. Spandimento 100%GGBFS-misurazione 1
Figura 37. Spandimento 100%GGBFS-misurazione 2
Figura 38. Spandimento 75%GGBFS-misurazione 1
Figura 39. Spandimento 75%GGBFS-misurazione 2
Figura 40. Spandimento 50%GGBFS-misurazione 1
Figura 41. Spandimento 50%GGBFS-misurazione 2
Figura 42. Spandimento 25%GGBFS-misurazione 1
Figura 43. Spandimento 25%GGBFS-misurazione 2
Figura 44. Provini malte fase 2
Figura 45. Rottura provino 100%GGBFS a 2 giorni
Figura 46. Rottura provino 75%GGBFS a 2 giorni
Figura 47. Rottura provino 50%GGBFS a 2 giorni
Figura 48. Valori medi di Rc malte fase 2
Figura 49. Provini in stagionatura
Figura 50. Spandimento 100%GGBFS-misurazione 1
Figura 51. Spandimento 100%GGBFS-misurazione 2
Figura 52. Spandimento 75%GGBFS-misurazione 1
Figura 53. Spandimento 75%GGBFS-misurazione 2
Figura 54. Spandimento 50%GGBFS-misurazione 1
Figura 55. Spandimento 50%GGBFS-misurazione 2
Figura 56. Spandimento 25%GGBFS-misurazione 1
Figura 57. Spandimento 25%GGBFS-misurazione 2
Figura 58. Classica forma a clessidra di provini rotti a compressione nel caso di carico eccentrico (sinistra) e nel caso di carico centrato (destra)
Figura 59. Valori medi di Rc malte fase 3
Figura 60. Confronto tra fase 2 e fase 3

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Classificazione delle malte secondo la UNI EN 1015-3:2007

Tabella 2. Risultati della vagliatura meccanica

Tabella 3. Passanti % delle sabbie

Tabella 4. Peso lordo e netto dei materiali in condizione ssa

Tabella 5. Peso lordo e netto dei materiali in condizione asciutta

Tabella 6. Mix design pastine KOH

Tabella 7. Mix design pastine NaOH

Tabella 8. Mix design malte fase 1 [g/l]

Tabella 9. Risultati prove di spandimento malte fase 1

Tabella 10. Risultati prove ultrasoniche

Tabella 11. Risultati della prova di flessione malte fase 1

Tabella 12. Risultati della prova di compressione malte fase 1

Tabella 13. Confronto tra malte 100%SN e 50%SN/50%AAS

Tabella 14. Mix design malte fase 2

Tabella 15. Risultati prove di spandimento malte fase 2

Tabella 16. R_c malte fase 2

Tabella 17. Mix design malte fase 3 [g/l]

Tabella 18. Risultati prove di spandimento fase 3

Tabella 19. R_c malte fase 3

1. INTRODUZIONE

1.1 Premessa

Il cemento Portland, scoperto nell' ottocento, è ad oggi il legante idraulico più diffuso e utilizzato ed è alla base del calcestruzzo, il principale materiale usato nel settore delle costruzioni. La sua grande diffusione è dovuta a eccellenti proprietà meccaniche del prodotto finito, alla facilità di formatura e al costo ridotto. Tuttavia, la sua produzione implica serie problematiche ambientali. Il cemento Portland si ottiene per macinazione del prodotto di cottura di una miscela di argilla, calcare e sabbia, che prende il nome di clinker. La cottura avviene a 1450 °C in forni rotanti, dopo di che il materiale viene bruscamente raffreddato, infine il clinker viene macinato assieme ad un 5% in peso di gesso in mulini rotanti. La produzione di cemento Portland è responsabile di circa l'8% delle emissioni globali di CO_2, per ogni tonnellata di clinker prodotta infatti, si libera circa 1 tonnellata di CO_2. Circa il 60% delle emissioni deriva dal processo chimico di decarbonatazione del calcare ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$), mentre il restante 40% dalla combustione fossile necessaria per raggiungere i 1450 ˚C nel forno [1]. Da qui nasce l'esigenza di trovare alternative più sostenibili per allinearsi agli obiettivi climatici internazionali e raggiungere la completa decarbonizzazione entro il 2050. Ed è qui che entra il gioco il progetto RECONSTRUCT.

1.2 Il progetto RECONSTRUCT



Figura 1.Logo del progetto RECONSTRUCT

Il progetto "RECONSTRUCT - A Territorial Construction System for a Circular Low-Carbon Built Environment" è un progetto europeo di innovazione industriale che mira a trasformare il settore delle costruzioni, riducendone radicalmente le emissioni di CO_2 e i rifiuti. È finanziato dall'Unione Europea nell'ambito del programma Horizon Europe con Grant Agreement n. 10108226. Il progetto RECONSTRUCT è consultabile al sito https://reconstruct-project.eu/. Oltre a prevedere lo sviluppo di materiali innovativi a ridotta emissione di anidride carbonica come alternativa ai materiali tradizionali ad alto impatto ambientale, l'iniziativa promuove il riutilizzo dei rifiuti provenienti dalle attività di costruzione e demolizione (Construction and demolition wastes, CDW) come materie prime secondarie. Molte università hanno aderito al progetto e partecipato alle attività di ricerca, ad esempio l'Università di Bruxelles (VUB), partner del progetto RECONSTRUCT, ha prodotto coupon

rinforzati con reti in fibra di carbonio e realizzati con loppa attivata con silicato di potassio e sabbia di fiume (figura 2).



Figura 2. Coupon rinforzati con fibra di carbonio prodotti da VUB

In questo contesto si inserisce l'Università politecnica delle Marche (UNIVPM), che ha anch'essa aderito al progetto e partecipato alle attività di ricerca. Presso il Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU) è stato svolto uno studio sull'impiego di materiali ad attivazione alcalina nella produzione di malte come alternativa ai tradizionali materiali da costruzione e la seguente tesi si propone di spiegare il seguente studio ed analizzarne i risultati ottenuti.

1.3 Obiettivo della tesi

L'obiettivo della seguente tesi è lo sviluppo e la caratterizzazione di malte ecosostenibili ad attivazione alcalina (Alkali-Activated Mortars, AAM) ottenute a partire dalla sostituzione del cemento Portland con un legante attivato alcalinamente e dall'impiego di aggregati riciclati. Lo studio si concentra sull'utilizzo di loppa d'altoforno granulata e macinata (ground granulated blast furnace slag, GGBFS) attivata con una soluzione di idrossido di potassio (KOH) oppure una soluzione di idrossido di sodio (NaOH) ,come sistema legante al fine di ottenere materiali sostenibili con proprietà meccaniche e ambientali paragonabili a quelle dei sistemi tradizionali a base di cemento Portland sfruttando il comportamento della loppa d'altoforno che, a contatto con una soluzione fortemente alcalina, innesca una reazione chimica chiamata attivazione alcalina, che porta alla formazione di una matrice solida e resistente.

Il programma sperimentale prevede la formulazione e successiva caratterizzazione fisico-meccanica di miscele alcali-attivate, che verranno sottoposte a prova di compressione e prova di flessione dopo differenti periodi di stagionatura.

Attraverso il seguente studio, si cerca di valutare la fattibilità tecnica di tali miscele offrendo un'alternativa ecosostenibile ai materiali da costruzione tradizionali e favorendo la decarbonizzazione del settore edile e la transizione ad un'economia circolare mediante la valorizzazione di materiale riciclato.

2. STATO DELL'ARTE

2.1 Generalità sui materiali ad attivazione alcalina

I materiali ad attivazione alcalina (noti in letteratura scientifica con l'acronimo inglese AAM, Alkali-Activated Materials) sono una classe di leganti inorganici alternativi al classico cemento Portland. Si ottengono miscelando una polvere ricca di silice e allumina (precursore) con una soluzione altamente alcalina (attivatore). Con questo approccio si evita la calcinazione ad alta temperatura delle rocce carbonatiche e l'elevato consumo di combustibile fossile. Poiché gli AAM impiegano scarti industriali non decarbonatati (come ad esempio la loppa d'altoforno o la cenere volante) e non richiedono cottura ad altissime temperature, evitano fino al 70–80% delle emissioni di CO_2 per tonnellata di legante [2].

2.2 Il precursore alcalino

I precursori alcalini costituiscono la componente solida e reattiva nei materiali ad attivazione alcalina. Si tratta di polveri inorganiche fini, prevalentemente alluminosilicatiche o calcio-alluminosilicatiche, ricche di silice (SiO_2), allumina (Al_2O_3) e talvolta ossido di calcio (CaO) in fase prevalentemente amorfa. Per essere idoneo all'attivazione alcalina, un materiale solido deve soddisfare tre criteri fondamentali:

1)Struttura Amorfa: L’organizzazione atomica disordinata (vetrosa) rende i legami Si−O e Al−O instabili e facilmente attaccabili dall’ambiente basico [3].

2)Elevata finezza superficiale: Il materiale deve essere finemente macinato (superficie specifica elevata) per garantire un’ampia superficie di contatto con la soluzione attivante, una finezza elevata accelera drasticamente l’attacco della soluzione alcalina [4].

3)Rapporto Si/Al ottimale: Il rapporto molare ideale tra silicio e alluminio nel precursore per la sintesi dei geopolimeri varia generalmente tra 1,5 e 3,5 [5].

2.3 Loppa d’altoforno granulata (GGBFS)

La loppa d'altoforno granulata e macinata (nota con l'acronimo inglese GGBFS, Ground Granulated Blast-Furnace Slag, o semplicemente BFS) è uno dei precursori ad alto contenuto di calcio più utilizzati nei materiali ad attivazione alcalina. Si tratta di un sottoprodotto dell'industria siderurgica ottenuto durante la fusione dei minerali di ferro in altoforno. Quando il silicato di calcio fuso galleggia sopra la ghisa liquida a circa 1500 °C, viene estratto e raffreddato bruscamente con getti d'acqua ad alta pressione (processo di granulazione). Questo rapido raffreddamento impedisce la cristallizzazione dei minerali, bloccando il materiale in uno stato vetroso/amorfo che viene poi essiccato e macinato in una polvere finissima [3].



Figura 3. Loppa d’altoforno granulata (GGBFS)

La loppa d’altoforno granulata è largamente impiegata per la sua idraulicità latente, cioè la proprietà chimico-fisica di un materiale in polvere che possiede una composizione chimica idonea a reagire con l'acqua per formare prodotti di reazione (gel C-A-S-H, simile al gel C-S-H che si forma per l’idratazione del cemento Portland) sviluppando capacità leganti, ma che non è in grado di avviare autonomamente questa reazione a velocità apprezzabili senza la presenza di un attivatore. Il termine "latente" indica che la capacità di far presa e indurire è presente all'interno del materiale, ma rimane dormiente a meno che non intervenga un fattore esterno (come un ambiente ad alto pH) che favorisca la dissoluzione della struttura vetrosa della loppa, rendendo disponibili le specie reattive necessarie alla formazione del gel C-A-S-H [3].

2.4 Il meccanismo della latenza

Quando la loppa viene immersa in sola acqua, la reazione di idratazione parte, ma viene immediatamente limitata dalla formazione di uno strato superficiale protettivo di prodotti di reazione, che limita il successivo contatto dell'acqua con la superficie del grano di loppa. Per sbloccare la reazione e mostrare l'idraulicità "latente", occorre un ambiente alcalino (ad esempio un attivatore come NaOH o KOH). L'elevata concentrazione di ioni idrossido (OH^-) favorisce la dissoluzione dello strato superficiale protettivo e della struttura vetrosa della loppa, permettendo la formazione continua del gel di alluminosilicato di calcio idrato (C-A-S-H) [6].

La formazione del gel C-A-S-H rappresenta quindi il principale meccanismo attraverso il quale la loppa sviluppa le sue proprietà leganti; la progressiva formazione e crescita del gel determina la cementazione delle particelle, contribuendo alla densificazione della microstruttura e alla riduzione della porosità.

Di conseguenza, con l'avanzare della reazione, si osserva generalmente un incremento delle proprietà meccaniche e della rigidezza del materiale.

2.5 L’attivatore alcalino

Gli attivatori alcalini sono composti chimici solubili ad elevata basicità ($pH > 13$) necessari per innescare le reazioni di dissoluzione e policondensazione nei precursori alluminosilicatici (o alluminosilico-calcici). L'attivatore alcalino svolge due funzioni chimico-fisiche fondamentali:

1) Attacco nucleofilo: Fornisce un'elevata concentrazione di ioni idrossido (OH^-) che attaccano e idrolizzano i legami covalenti $Si - O - Si$ e $Si - O - Al$ della fase amorfa del precursore, liberando in soluzione specie ioniche monomeriche solubili [3].

2) Bilanciamento di carica: Fornisce cationi metallici alcalini (come Na^+ o K^+) che si inseriscono nella matrice in formazione per neutralizzare la carica elettrica negativa dei tetraedri di alluminio (AlO_4^-) [5].

Tra gli attivatori più impiegati nella pratica scientifica troviamo idrossido di sodio (NaOH) e idrossido di potassio (KOH) [7], dato il loro basso costo.

L’idrossido di sodio (NaOH), economico e facilmente reperibile in commercio, è l’attivatore più diffuso ed essendo una base forte ci permette di raggiungere livelli di pH molto elevati quando disciolto in acqua. Questo permette di accelerare le fasi iniziali di attacco chimico e idrolisi dei precursori.

La resa del materiale dipende anche dalla molarità della soluzione acqua-attivatore. In chimica, la molarità (M) è la concentrazione di una soluzione espressa dal numero di moli di soluto contenute in un litro di soluzione [8].

Nello specifico, le malte a base di loppa richiedono molarità contenute, solitamente 4-6 M, per via dell’elevata reattività della loppa dovuta alla presenza di ossido di calcio (CaO).

All’aumentare della molarità aumenta la concentrazione di ioni OH^-, la quale controlla direttamente la velocità di dissoluzione della silice e dell’allumina del precursore, influenzando le proprietà del materiale sia allo stato fresco che allo stato indurito.

Alla luce di ciò, un’eccessiva concentrazione di NaOH in termini di molarità causerebbe la presa istantanea dell’impasto, rendendo impossibile la messa in opera [5].

2.6 Il processo di attivazione alcalina

L’attivazione alcalina è il processo che si sviluppa tra una polvere ricca di silice reattiva, allumina e calcio (precursore) e una soluzione attivante alcalina, dando vita ad una matrice solida resistente.

Secondo la letteratura scientifica il processo può essere riassunto in 4 fasi:

1) Dissoluzione di Al, Si e Ca (o idrolisi alcalina): quando il precursore viene a contatto con la soluzione alcalina (attivatore), caratterizzata da un’elevata concentrazione di ioni idrossido OH^-, questi interagiscono con la superficie delle particelle solide del precursore e rompono i legami covalenti della sua struttura amorfa. Questo processo porta alla liberazione nella fase liquida di specie ioniche monomeriche solubili di silicio e alluminio ($[SiO(OH)_3]^-$ e $[Al(OH)_4]^-$), e nel caso di precursori contenenti calcio come la loppa, anche cationi di calcio (Ca^{2+}).

2) Diffusione delle specie dissolte nella soluzione alcalina: durante questa fase, le specie ioniche appena liberate dalla matrice solida vengono trasportate e redistribuite all’interno della fase liquida, spinte da gradienti di concentrazione. Durante la diffusione, le specie ioniche libere iniziano a interagire fortemente a corto raggio con i cationi alcalini presenti nella

soluzione attivante. Poiché le forme tetraedriche possiedono carica negativa, la presenza di tali cationi è indispensabile per bilanciare elettrostaticamente il sistema. L'attrazione elettrica e le collisioni molecolari portano i singoli monomeri a combinarsi tra loro, organizzandosi in complessi oligomerici intermedi che svolgono la funzione di centri di nucleazione su cui si innescherà la successiva reazione di policondensazione.

3) Policondensazione e formazione del gel C-A-S-H: quando la concentrazione delle specie oligomeriche raggiunge il livello di saturazione, si innesca la terza fase, cioè la reazione di policondensazione. In questa fase cruciale, le specie silico-alluminatiche e gli ioni calcio presenti nella soluzione reagiscono chimicamente legandosi tra loro in catene e reticoli complessi. La reazione comporta l'eliminazione di molecole d'acqua e la formazione di gel alluminosilicato di calcio (C-A-S-H), che rappresenta l'ossatura legante del sistema (è molto importante non confondere l'anione tetraidrossialluminato $[Al(OH)_4]^-$ e l'anione ortosilicato idrosilato $[SiO(OH)_3]^-$, che sono le specie ioniche disciolte nella fase liquida, con il tetraedro di alluminio $[AlO_4]^-$ e il tetraedro di silicio $[SiO_4]$, che sono invece unità strutturali della rete del gel amorfo; la trasformazione chimica dalla prima forma alla seconda avviene durante la reazione di policondensazione).

4) Formazione del materiale attivato alcalinamente: infine, il processo si conclude con la fase di indurimento, con il proseguire della reazione di policondensazione la rete del gel amorfo continua a svilupparsi e compattarsi, espellendo gradualmente l'acqua libera e consolidando la microstruttura. Questo progressivo irrigidimento tridimensionale trasforma la pasta fluida iniziale nel materiale attivato alcalinamente finale, garantendogli resistenza meccanica [9,10].



Figura 4. Processo di attivazione alcalina

2.7 Cenni storici

Nel 1978 il chimico francese Joseph Davidovits coniò il termine "geopolimeri" per indicare polimeri inorganici prodotti artificialmente a partire da alluminosilicati attraverso un processo chiamato "geopolimerizzazione" [11].

Nel 1979 lo stesso Davidovits fondò il "Geopolymer institute", un'associazione scientifica no-profit che dal 2009 organizza il "Geopolymer Camp", un incontro aperto a tutti gli interessati all'argomento che si tiene ogni anno in una località a nord di Parigi [12].

Riavvolgendo il nastro ancora più indietro, nel 1930 H. Kunt analizzò il comportamento di scorie industriali in presenza di una soluzione di idrossido di potassio [4].

Mentre nel 1940 furono fatte le prime ricerche su materiali clinker-free da parte del belga Purdon [13,14]. Infine, negli anni 90', J. Wastiels scoprì la possibilità di ottenere geopolimeri dall'attivazione di ceneri provenienti da centrali a carbone, aprendo la strada per un maggiore impiego di questi materiali [15].

3.MATERIALI

In questo capitolo si descriveranno i materiali impiegati, la caratterizzazione di questi ultimi, la strumentazione utilizzata durante la sperimentazione e le procedure di preparazione delle miscele ad attivazione alcalina.

Nello specifico, si studieranno un totale di 12 miscele differenti, analizzando come varia il comportamento fisico-meccanico dei materiali al variare dell'attivatore alcalino e poi del sistema legante.

Infatti, nei primi 4 getti si prepareranno provini prodotti con 2 diversi attivatori alcalini, ovvero l'idrossido di potassio (KOH) e l'idrossido di sodio (NaOH) che successivamente saranno caratterizzati meccanicamente a diversi periodi di stagionatura, nello specifico a 7 e 28 giorni.

Una volta stabilito quale attivatore consente di raggiungere prestazioni migliori, nei getti successivi, fissata la tipologia di attivatore, si modificherà il sistema legante e analizzerà come varia il comportamento fisico-meccanico al variare della percentuale di loppa d'altoforno, infatti si ridurrà gradualmente la percentuale di GGBFS in miscela e si andrà ad introdurre al suo posto il suo complemento a cento (in peso) di sabbia alcali-attivata (AAS).

3.1 Materiali Impiegati

Per la sperimentazione illustrata in questa tesi, i principali materiali impiegati sono:

● Precursori:

I precursori alcalini impiegati sono loppa d'altoforno granulata (GGBFS) e la sabbia attivata alcalinamente (AAS), ovvero una sabbia che ha già subito il processo di attivazione alcalina, ma che potrebbe comunque avere ancora un po' di reattività latente.

Sarà quindi interessante vedere come risponderà il materiale andando gradualmente ad introdurre sabbia attivata alcalinamente (o alcali-attivata) in miscela, in sostituzione alla loppa d'altoforno granulata.

La sabbia alcali-attivata di partenza, essendo stata prodotta mediante macinazione con un frantoio a mascelle, aveva una granulometria non uniforme; quindi, è stata setacciata meccanicamente per separare la frazione fine ($D < 0,5$ mm), usata come precursore, da quella grossolana ($0,5$ mm $\leq D < 4$ mm), usata invece come aggregato.

● Densità AAS=2,49 g/cm^3

● Densità GGBFS=2,7 g/cm^3



Figura 5. Sabbia alcali-attivata

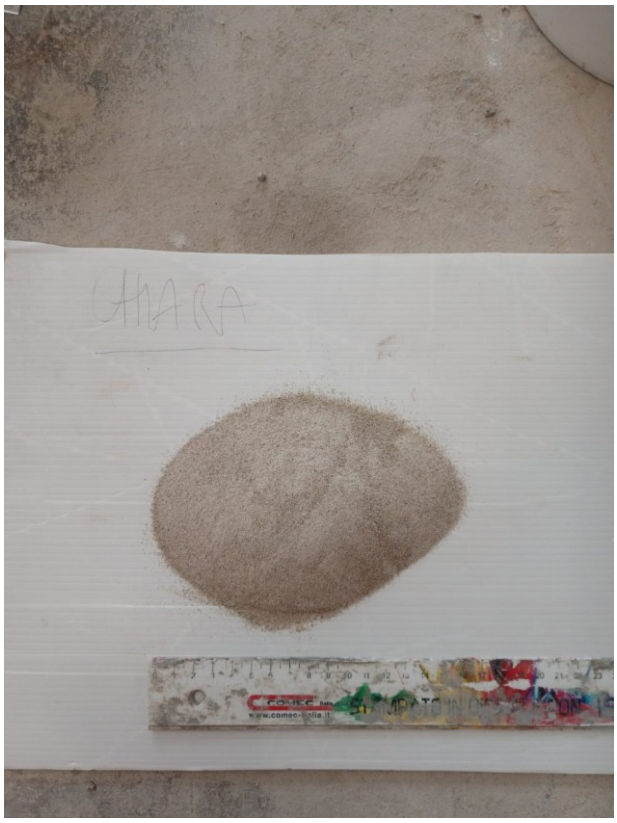


Figura 6. Frazione della sabbia alcali-attivata usata come precursore

● Attivatori:

Le soluzioni alcaline attivanti impiegate sono idrossido di potassio (KOH) e idrossido di sodio (NaOH), entrambe ad una concentrazione 4M.

La molarità contenuta evita problematiche di presa troppo rapida dell'impasto e di insorgenza di efflorescenze.

● Aggregati:

-Sabbia naturale (SN) calcarea fornita dal partner del progetto Soriguè (0/4 mm), Densità=2,65 g/cm^3

-Sabbia naturale (SN) silicea prodotta da Esincalce SpA, (0/1 mm), Densità=2,72 g/cm^3

-Sabbia alcali-attivata (0,5/4 mm) ottenuta dalla macinazione dei coupon rinforzati realizzati dal partner del progetto VUB, Densità = 2,49 g/cm^3



Figura 7. Frazione della sabbia alcali attivata usata come aggregato



Figura 8. Sabbia naturale calcarea (0/4 mm)

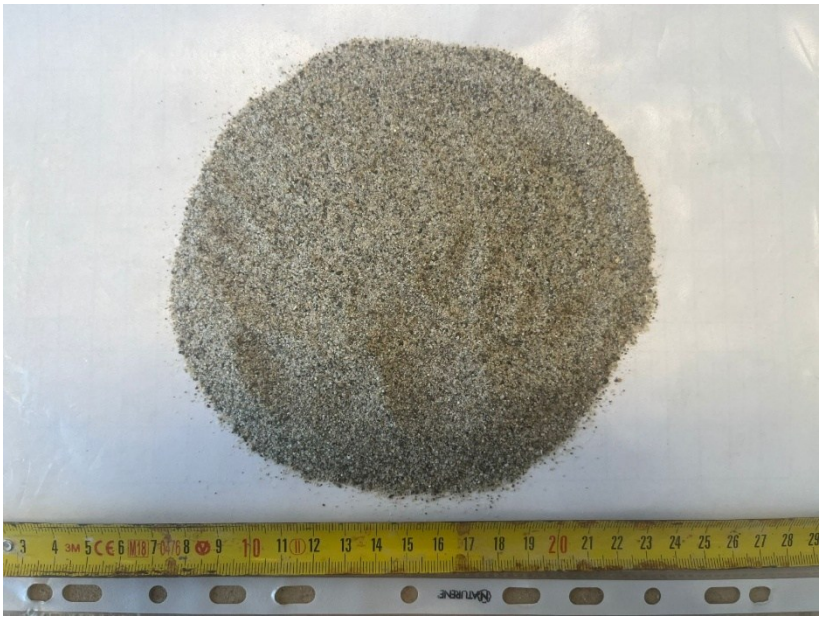


Figura 9. Sabbia naturale silicea (0/1 mm)

●Superfluidificante:

Per garantire una buona lavorabilità dell'impasto è stato impiegato un additivo superfluidificante ideato per essere utilizzato in impasti attivati con soluzioni di NaOH, prodotto dall'azienda Master Builders Solutions.

4.METODI DI PROVA

In questo capitolo verranno descritte le principali prove svolte sulle malte ed il loro funzionamento.

4.1 Prova di spandimento

La prova viene eseguita secondo la norma UNI EN 1015-3 "Metodi di prova per malte per opere murarie parte 3: determinazione della consistenza della malta fresca" ed è fondamentale per determinare la lavorabilità dell'impasto.

Essa consiste nel posizionare uno stampo tronco-conico di dimensioni standardizzate: h=60 mm, d_{max}=100 mm, d_{min}=70 mm sopra un macchinario chiamato tavola a scosse.

Una volta posizionato lo stampo, esso viene riempito con la malta, viene rimosso l'eccesso in sommità dello stampo tramite una spatola ed infine viene rimosso lo stampo e azionato il macchinario.

Dopo 15 colpi si ferma il macchinario, si misura il diametro della malta nelle due direzioni ortogonali e si fa la media delle due misurazioni.

Secondo la UNI EN 1015-3:2007, in base al diametro ottenuto, le malte si classificano in:

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

Tabella 1. Classificazione delle malte secondo la UNI EN 1015-3:2007



Figura 10. Tavola a scosse

4.2 Prova di flessione

La seguente prova viene svolta in conformità alla norma UNI EN 1015-11 "Metodi di prova per malte per opere murarie-parte 11: determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita".

Per effettuare tale prova è stata impiegata la macchina E183N per prove di compressione e flessione ad alte prestazioni con doppia camera di prova e due campi di misura indipendenti da 300 kN e 15 kN con celle di carico e unità di controllo di avanzamento Servo-plus.

Tale macchina viene prodotta dall'azienda Matest e permette di applicare il carico sul provino in maniera automatica e controllata, la camera adibita alla prova di flessione è dotata di due appoggi situati alle estremità inferiori ed uno superiore che ha la funzione di trasmettere il carico concentrato sulla mezzeria del provino.

Durante la prova il software integrato della macchina registra l'incremento di carico e, una volta raggiunta la rottura del provino, manda in output il valore di resistenza massima a flessione (R_f) raggiunta dal provino in MPa (N/mm^2), calcolato tramite la seguente formula:

$$R_f = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot b \cdot d^2}$$

Dove:

●F è il carico massimo espresso in [N]

●l è la distanza tra gli appoggi, pari a 100 mm

● b e d sono la larghezza e l'altezza della sezione trasversale del provino espresse in [mm]



Figura 11. Prova di flessione



Figura 12. Provino sottoposto a prova di flessione

4.3 Prova di compressione

La prova di compressione assiale viene eseguita su ambe due le porzioni di provino ottenute dalla rottura durante la prova di flessione.

Tale procedura è conforme alla UNI EN 1015-3:2007 e permette di ottimizzare l'uso dei materiali.

La macchina impiegata è la medesima della prova di flessione, questa volta i provini vengono alloggiati nella camera adibita alla compressione, dotata di piastre rigide di dimensioni 40x40 mm^2 (equivalente alla sezione dei provini).

La compressione viene applicata in maniera controllata fino a raggiungere la rottura del provino, il software monitora l'incremento di carico ed una volta arrivati a rottura restituisce in output il valore di resistenza massima a compressione (R_c) raggiunta dal provino in MPa (N/mm^2), calcolata mediante la seguente formula:

$$R_c = \frac{F}{A_c}$$

Dove:

- F è il carico massimo espresso in [N]
- A_c è l'area di contatto, ovvero l'area su cui viene trasmesso il carico, pari a 40x40 mm^2



Figura 13. Provino sottoposto a prova di compressione

4.4 Pundit

Il Pundit è una prova non distruttiva ad ultrasuoni che è stata eseguita sui provini prima di testarli a 28 giorni, tale prova permette di ottenere il modulo elastico dinamico dei provini e viene eseguita in conformità con la normativa UNI EN 12504-4:2005 ”Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici”.

La prova si basa sulla propagazione di onde elastiche all'interno del mezzo da studiare.

Nel seguente studio, dopo aver calcolato la densità dei provini rapportando il loro peso [g] ed il loro volume (4x4x16 cm^3), è stato impiegato il Pundit per misurare il tempo impiegato dagli impulsi ultrasonici ad attraversare il materiale, passando dalla sonda emittente alla sonda ricevente, espresso in [μs].

La velocità di attraversamento delle onde ultrasoniche, espressa in [m/s], si calcola con la seguente formula:

$$V = \frac{L}{t}$$

Dove:

●L=Spessore attraversato dalle onde

●t=Tempo di attraversamento delle onde

Una volta note densità e velocità, il modulo elastico dinamico (E_d), espresso in [GPa], si può calcolare con la seguente formula :

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{1-\nu}$$

Dove:

●V= Velocità dell'impulso ultrasonico

●ρ= Densità del provino

●ν= Coefficiente di Posson (pari a 0,2)

Le onde emesse dal Pundit hanno una frequenza di circa 50 kHz, tutte le onde con una frequenza compresa tra 20 e 1000 kHz non vengono percepite dall'uomo e sono perciò definite ultrasoniche [16].

La prova si esegue in 4 step:

1) Applicazione della vasellina sulle superfici delle sonde

2) Applicazione della vasellina sulle superfici laterali dei provini

3) Calibrazione dello strumento al valore di riferimento pari a 25,3 μs

4) Misura del tempo di attraversamento degli impulsi ultrasonici

È buona norma effettuare almeno due misurazioni per provino, in modo tale da avere un valore medio del tempo di attraversamento.



Figura 14. Calibrazione Pundit



Figura 15. Misurazione del tempo di attraversamento degli impulsi ultrasonici

5.RISULTATI SPERIMENTALI

5.0.1 Caratterizzazione fisica dei materiali

Prima di confezionare le malte, i materiali sono stati sottoposti ad una serie di prove con lo scopo di determinarne le proprietà fisiche.

Si è partiti con la vagliatura meccanica della sabbia alcali-attivata in conformità alla norma UNI EN 933-1, tramite setacci impilati aventi aperture decrescenti dall'alto verso il basso a cui si aggiungono il coperchio e il fondo, che è fondamentale per raccogliere la frazione fine passante all'ultimo setaccio (D = 0,063 mm), ovvero il filler.

Il primo step per eseguire la vagliatura meccanica è selezionare una serie di setacci e pesarli. La tara ci consentirà, tramite sottrazione, di ricavare il peso netto di ogni frazione del materiale alla fine del processo.

Fatto ciò, si procede ad impilare i setacci in ordine decrescente di apertura delle maglie dall'alto verso il basso.

Dopo di che si posiziona il fondo, si inserisce il materiale dall'alto e si chiude il tutto con il coperchio.

In seguito, si sigilla il sistema con del nastro adesivo, questo è necessario in quanto durante la prova il sistema viene sottoposto a forti oscillazioni, il nastro adesivo aiuta a far sì che i setacci rimangano solidali tra loro e ad evitare che la parte più fine fuoriesca durante il processo.

Successivamente si posiziona la pila di setacci sulla setacciatrice meccanica e si avvia la prova, che dura dieci minuti.

Una volta avviata la prova, la pila di setacci viene fatta oscillare ed il materiale inizia a separarsi, ogni setaccio tratterrà la frazione avente dimensioni pari o superiori a quella della propria maglia.

Alla fine della prova, la pila di setacci si smonta e si pesa ogni setaccio con la sua frazione (peso lordo), sottraendo a quest'ultimo la tara si ricava il peso netto di ogni frazione di materiale.

Il primo setaccio da utilizzare viene scelto stimando visivamente il diametro massimo del materiale da vagliare, i successivi vengono scelti dimezzando la dimensione di quello precedente, fino ad arrivare a 0,063 mm (come in figura 16).

Nel nostro caso, è stato scelto un setaccio di partenza con diametro delle aperture pari a 4 mm, di conseguenza dall'alto verso il basso si avranno:

4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,25 mm, 0,125 mm, 0,063 mm, fondo.



Figura 16. Setacciatrice meccanica

Setaccio	Tara	P lordo	P netto
4 mm	476,33 g	476,33 g	0 g
2 mm	503,96 g	768,19 g	264,23 g
1 mm	397,10 g	518,55 g	121,45 g
0.500 mm	460,42 g	569,19 g	108,77 g
0.250 mm	422,88 g	634,89 g	212,01 g
0.125 mm	412,58 g	505,17 g	92,59 g
0.063 mm	395,18 g	428,11 g	32, 93 g
fondo	458,32 g	505,94 g	47,62 g

Tabella 2. Risultati della vagliatura meccanica

La stessa prova è stata eseguita anche sulla sabbia naturale silicea e calcarea, di seguito i passanti percentuali e le curve granulometriche delle due sabbie:

	Sabbia alcali-attivata	Sabbia silicea	Sabbia calcarea
Setacci	Passante	Passante	Passante
mm	%	%	%
4	100	100	100
2	70	100	83
1	56	100	70
0,5	44	93	45
0,25	20	19	13
0,125	9	2	3
0,063	5	1	2
Fondo	0	0	0

Tabella 3. Passanti % delle Sabbie

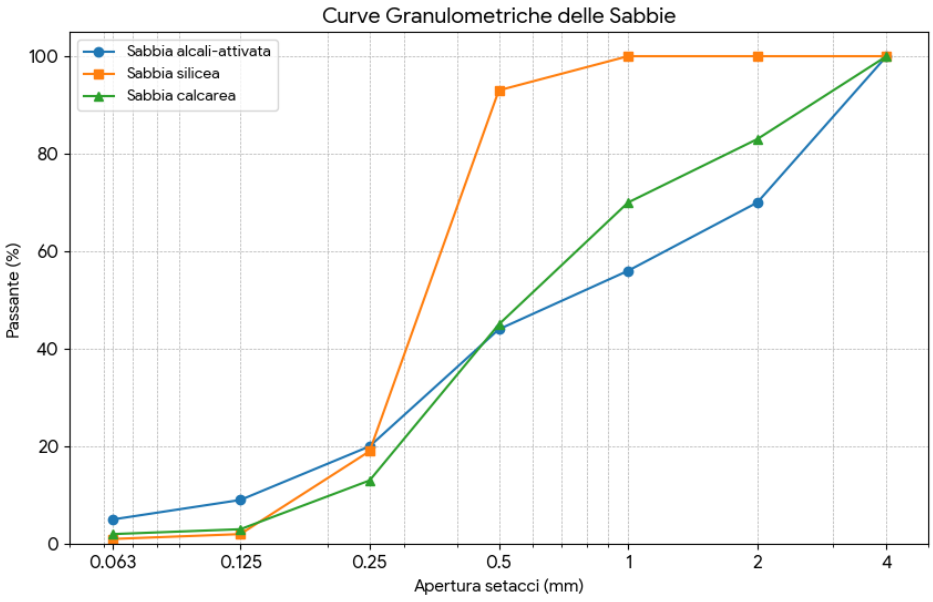


Figura 17.Curve granulometriche delle sabbie (generata con IA)

La prova successiva che è stata eseguita sui nostri materiali, in particolare sugli aggregati, è la prova di assorbimento dell'acqua.

Gli aggregati sono in grado di assorbire acqua all'interno dei propri pori e sulla superficie, essi possono trovarsi in tre differenti condizioni:

1)Asciutto: quando i pori aperti dell'aggregato risultano asciutti o non completamente pieni d'acqua.

2)Bagnato: quando la superficie risulta essere bagnata e i pori essere pieni d'acqua.

3)Saturo superficie asciutta (SSA): che è la nostra condizione di riferimento per calcolare l'assorbimento percentuale (a%), l'aggregato si trova in questa condizione quando i suoi pori sono completamente pieni d'acqua, mentre la superficie risulta asciutta.

La prova, come da normativa UNI EN 1097-6, consiste nell'aggiungere acqua agli aggregati mediante una pipetta, per poi inserire il materiale all'interno di uno stampo tronco-conico (castelletto).

Fatto ciò, si sfila lo stampo e si valuta la condizione del materiale, se il materiale rimane compatto significa che gli aggregati si trovano in condizione bagnata; in questo caso si lascia essiccare il materiale in stufa e si ripete la prova, mentre se il materiale crolla completamente una volta tolto lo stampo, ci troveremo in condizione asciutta, in questo caso dovremmo aggiungere più acqua e ripetere la prova.

La condizione che si ricerca è quella SSA, che una volta tolto lo stampo, si presenta come una situazione intermedia tra le due condizioni limite precedenti.



Figura 18. Condizione di aggregato bagnato



Figura 19. Aggregato in condizione saturo superficie asciutta

Una volta individuata la condizione saturo superficie asciutta si pesa il materiale (Peso lordo ssa), al quale sottraendo la tara, si ricava il peso netto del materiale in condizione ssa (Peso netto ssa).

Infine, si lasciano essiccare i materiali in stufa, una volta asciutti vengono nuovamente pesati, così da individuare il peso lordo e netto in condizione asciutta (P lordo s) e (P netto s)

Di seguito riportiamo i risultati della prova:

	Tara	Plordo ssa	Pnetto ssa
AAS	302,14 g	943,18 g	641,04 g
NS CTCON	176,39 g	862,74 g	686,35 g

Tabella 4. Peso lordo e netto dei materiali in condizione ssa

	Tara	Plordo s	Pnetto s
AAS	302,14 g	903,4 g	601,26 g
NS CTCON	176,39 g	853,52 g	677,13 g

Tabella 5. Peso lordo e netto dei materiali in condizione asciutta

Noti i pesi dei materiali, l'assorbimento percentuale si calcola con la seguente formula:

$$Assorbimento\ (\%) = \frac{M_{SSD} - M_{secco}}{M_{secco}} \times 100$$

Dove:

M_{SSD} = Massa del materiale in condizione ssa

M_{SECCO} =Massa del materiale in condizione asciutta

Di seguito i risultati ottenuti tramite la formula dell'assorbimento percentuale:

- AAS a%=6,6%
- SN calcarea a%=1,4%
- SN Silicea a%=1,0%

L'ultima prova effettuata prima di realizzare i getti è stato un test preliminare su pastine, eseguito per valutare quanto reattiva fosse la polvere alcali-attivata ricavata setacciando la sabbia (AAS) e per valutare come reagissero i materiali utilizzando KOH o NaOH come attivatore alcalino.

	AA-Sand	GGBFS	KOH solids	H2O	KOH soluzione 4M	w/s
	g	g	g	g	g	g
100% AA-Sand	23,5	0,0	1,5	6,3	7,8	0,25
75% AA-Sand+25% GGBFS	17,6	5,9	1,5	6,3	7,8	0,25
50% AA-Sand+50% GGBFS	11,7	11,7	1,5	6,3	7,8	0,25
25% AA-Sand+75% GGBFS	5,9	17,6	1,5	6,3	7,8	0,25
100% GGBFS	0,0	23,5	1,5	6,3	7,8	0,25

Tabella 6. Mix design pastine KOH



Figura 20. Pastine con KOH indurite

	GGBFS	AA-Sand	NaOH solids	H2O	NaOH soluzione 4M	w/s
	g	g	g	g	g	g
100% GGBFS	15,9	0,0	5,6	2,4	8	0,11
75% GGBFS+25% AA-Sand	11,9	4,0	5,6	2,4	8	0,11
50% GGBFS+50% AA-Sand	7,9	7,9	5,6	2,4	8	0,11
25% GGBFS+75% AA-Sand	4,0	11,9	5,6	2,4	8	0,11
100% AA-Sand	0,0	15,9	5,6	2,4	8	0,11

Tabella 7. Mix design pastine NaOH



Figura 21. Pastine con NaOH indurite

Dalle figure 20 e 21 si nota che le pastine con NaOH 4M si sono indurite mantenendo un'ottima integrità superficiale e geometrica a tutte le percentuali di sostituzione, senza macro-fessurazioni evidenti.

Mentre nel caso con KOH, la pastina con 100% AA-Sand è rimasta incoerente, mentre quella con 100% GGBFS si è completamente fessurata.

A questo punto sono stati preparati i primi getti e testati, in virtù dei risultati ottenuti sulle pastine e delle resistenze ottenute dalle prove di compressione e flessione, si sarà in grado di stabilire quale attivatore sia più efficace.

In questo studio sono state realizzate un totale di 12 miscele, suddivise in 3 diverse fasi dello studio, ovvero:

●Fase 1) le prime 4 malte sono state realizzate utilizzando 2 tipi differenti di attivatore alcalino, dove per ognuno dei due attivatori sono stati realizzati un getto con solo aggregato naturale ed uno con 50% aggregato naturale e 50% aggregato riciclato (in volume), i risultati ottenuti da questa prima fase permetteranno di stabilire quale attivatore sia il più performante e di osservare come venga influenzato il comportamento dei provini dalla presenza in miscela di aggregato riciclato in sostituzione a quello naturale.

●Fase 2) Nella seconda fase, è stato fissato l'attivatore e manipolato il sistema legante andando a sostituire gradualmente la loppa con la frazione fine (D<0,5 mm) della sabbia alcali-attivata.

In questo caso quindi la sabbia riciclata non viene introdotta in qualità di aggregato ma in qualità di precursore.

●Fase 3) In quest'ultima fase, è stata macinata la sabbia alcali-attivata (precursore) tramite mortaio per ridurne ulteriormente il D_{max}, per aumentarne la superficie specifica e quindi la reattività.

In virtù di ciò sarà quindi interessante analizzare come varierà la capacità di sviluppare resistenza meccanica dei provini prodotti in questa fase, rispetto a quelli prodotti nella fase 2.

Per evitare confusioni quindi, i capitoli che seguono saranno anch'essi suddivisi secondo queste tre fasi.

5.1 Malte: fase 1

5.1.1 Mix design dei getti

Con il termine mix design, si fa riferimento al processo di definizione delle proporzioni dei vari componenti della miscela da confezionare, cercando di ottimizzare lavorabilità e resistenza.

I principali scopi dei primi quattro getti sono stati quelli di stabilire quale attivatore tra KOH e NaOH permettesse di raggiungere resistenze meccaniche più elevate e quello di valutare come cambiasse il comportamento meccanico dei provini andando a sostituire il 50% di aggregato naturale (SN calcarea 0/4 mm) con un 50% di aggregato alcali-attivato (AAS) in volume.

Sono state realizzate le seguenti quattro tipologie di getti:

- GGBFS/KOH+100% SN
- GGBFS/KOH+50% SN/50% AAS
- GGBFS/NaOH+100% SN
- GGBFS/NaOH+50% SN/50% AAS

Di seguito i mix design:

MIX	GGBFS	KOH	NaOH	Nat SAND	AA SAND	SP	w/s ratio
BFS/KOH + Nat SAND	491	301	-	1474	-	10	0.45
BFS/KOH + Nat/AA SAND	491	301	-	737	693	2	0.45
BFS/NaOH + Nat SAND	519	-	289	1474	-	10	0.45
BFS/NaOH + Nat/AA SAND	519	-	289	737	693	4	0.45

Tabella 8. Mix malte fase 1 [g/l]

Un aspetto molto importante della fase di mix design è il rapporto acqua/solidi (w/s), in quanto impatta fortemente sulle caratteristiche reologiche della miscela, sullo sviluppo della microstruttura porosa e sulla resistenza meccanica che il materiale sarà in grado di raggiungere.

Un aumento del contenuto d'acqua, infatti, a parità delle altre componenti, si traduce in una riduzione della resistenza meccanica del materiale.

L'acqua in eccesso rispetto a quella necessaria per le reazioni di attivazione, una volta completata la stagionatura evapora lasciando dei vuoti all'interno della struttura del materiale, rendendola porosa e quindi meno resistente (soprattutto a compressione).

Tuttavia, un contenuto troppo basso di acqua può portare a problemi di lavorabilità dell'impasto, rendendo complicata la fase di getto.

pertanto, può essere utilizzato un additivo superfluidificante, che permette di raggiungere una lavorabilità ottimale evitando di aumentare troppo in rapporto w/s.

5.1.2 Confezionamento

In questo capitolo si descrive ogni fase del processo di realizzazione delle malte ad attivazione alcalina.

1) Scelta della tipologia di cassero

Per queste prime 4 formulazioni sono stati impiegati casseri standard in acciaio di dimensioni 40 mm x 40 mm x 160 mm, i quali vengono rivestiti con del nastro adesivo per facilitare l'estrazione dei provini una volta induriti.



Figura 22. Cassero in acciaio 4x4x16 cm^3

2) Preparazione dell'impasto

Dopo aver accuratamente progettato il mix design, seguendo i dati di quest'ultimo (tabella 8), si pesa accuratamente ogni componente necessaria alla realizzazione di ogni impasto.

La loppa (precursore) e gli aggregati vengono miscelati insieme all'interno di un recipiente per rendere la miscela omogenea.

A questo punto si versa poco alla volta la soluzione attivatrice e si inizia a miscelare l'impasto tramite trapano miscelatore, poi si aggiunge il superfluidificante e si continua con la miscelazione fino ad ottenere una miscela omogenea.

È importante, durante il processo di miscelazione, cronometrare la durata di quest'ultimo per avere un riferimento temporale.

È buona norma impiegare non più di tre minuti per la miscelazione, altrimenti potrebbe diventare complicato gettare il materiale per via dell'inizio della fase di presa.

Finito il processo di miscelazione, si passa alla prova di spandimento (o slump test).



Figura 23. Trapano miscelatore

Di seguito i risultati delle prove di spandimento dei getti della fase 1:



Figura 24. Prova di spandimento 100%SN KOH-misurazione 1



Figura 25 Prova di spandimento 100%SN KOH-misurazione 2



Figura 26. Prova di spandimento 50%SN/50%AAS KOH-misurazione 1



Figura 27. Prova di spandimento 50%SN/50%AAS KOH-misurazione 2



Figura 28. Prova di spandimento 100%SN NaOH-misurazione 1



Figura 29. Prova di spandimento 100%SN NaOH-misurazione 2



Figura 30. Prova di spandimento 50%SN/50%AAS NaOH-misurazione 1



Figura 31. Prova di spandimento 50%SN/50%AAS NaOH-misurazione 2

Tipo di malta	spandimento			consistenza
	D1 [mm]	D2 [mm]	Dm [mm]	all'atto
100%SN KOH	169	163	166	Plastica
50%SN/50%AASKOH	154	158	156	Plastica
100%SN NaOH	180	175	178	Plastica
50%SN/50%AAS NaOH	179	175	177	Plastica

Tabella 9. Risultati prove di spandimento malte fase 1

3) Il getto e la scasseratura dei provini

Una volta eseguita la prova di spandimento, si procede a gettare il materiale, in conformità con la norma UNI EN 1015-11:2007 “Metodi di prova per malte per opere murarie”.

I casseri vengono riempiti di malta e vibrati per evitare la formazione di bolle d’aria all’interno dei provini, successivamente si rimuove il materiale in eccesso aiutandosi con una cazzuola in modo tale da rendere la superficie superiore del provino il più liscia ed omogenea possibile.

Infine, si riveste il cassero con della pellicola per evitare l’evaporazione precoce dell’acqua e lo si ripone all’interno della camera climatica a completare la stagionatura.

La camera climatica si trova ad una temperatura controllata di 20°C e ad un’umidità relativa pari al 50%, condizioni ideali per lo sviluppo della resistenza meccanica dei provini.

Queste condizioni sono inoltre fondamentali per evitare l’evaporazione dell’acqua e la formazione di efflorescenze saline sulla superficie dei provini.

A differenza delle miscele riportate in seguito (fase 2), che sono state testate a 2, 7 e 28 giorni di stagionatura, queste prime 4 miscele (fase 1) sono state testate a 7 e 28 giorni di stagionatura.

Questo significa che a 7 giorni dal rispettivo getto, i provini sono stati scasserati e testati a prova di compressione e prova di flessione.

È importante sottoporre a tali prove almeno 2 provini per tipologia in modo tale da poter ricavare un valore medio tra i due valori ottenuti; infatti, talvolta i valori possono discostarsi tra loro per via di imperfezioni geometriche o strutturali e proprio per questo il valore medio è più significativo.

I provini non testati invece, una volta scasserati, vengono nuovamente riposti all'interno della camera climatica per continuare la stagionatura fino a 28 g.

Il cassero viene smontato mediante l'uso di una brugola e un martello, una volta estratti, i provini vengono limati per rendere le superfici lisce, dopodiché vengono sottoposti alle prove di compressione e di flessione.

5.1.3 Analisi dei risultati del Pundit

Di seguito i risultati del Pundit :

Geometria provino	Provino	t [µs]	t_{medio} [µs]	m [g]	V [cm^3]	ρ [g/cm^3]	V [m/s]	Ed [GPa]
4 x 4 x 16 cm^3	50%/50% KOH	65,6/66,5	66,1	512,5	256	2,0	2422,4	11,7
4 x 4 x 16 cm^3	50%/50% KOH	60,5/59,5	60	521,5	256	2,0	2666,7	14,5
4 x 4 x 16 cm^3	50%/50% KOH	62,6/63	62,8	533,3	256	2,1	2547,8	13,5
4 x 4 x 16 cm^3	100% SN KOH	46/45,6	45,8	567,0	256	2,2	3493,5	26,9
4 x 4 x 16 cm^3	100% SN KOH	47,3/48,2	47,8	554,9	256	2,2	3350,8	24,4
4 x 4 x 16 cm^3	100% SN NaOH	42,1	42,1	581,5	256	2,3	3800,5	32,8
4 x 4 x 16 cm^3	50/50% NaOH	56,4/56,6	56,5	543,3	256	2,1	2831,9	17,0

Tabella 10. Risultati prove ultrasoniche

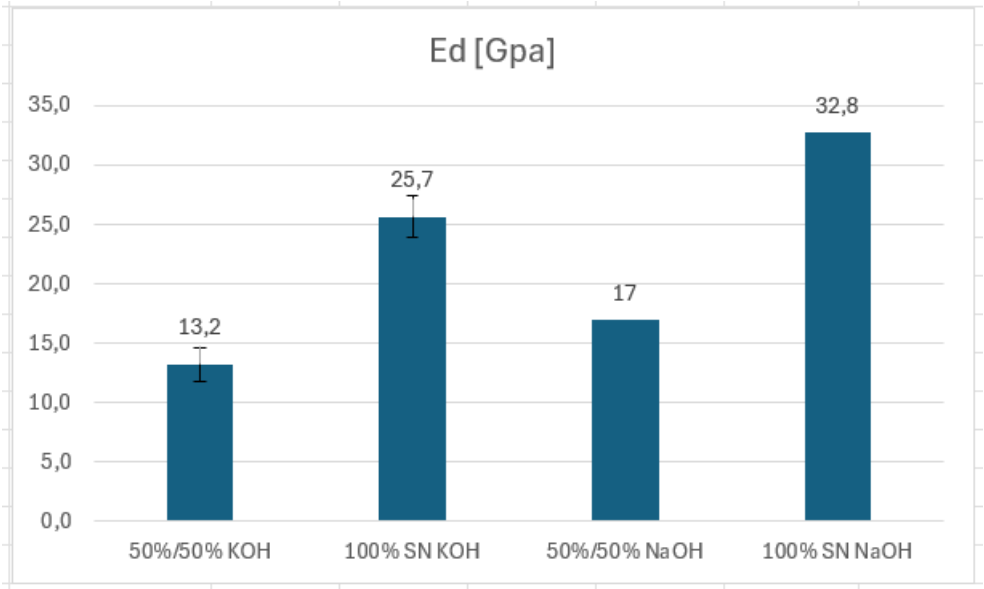


Figura 32. Valori medi di Ed [GPa]

Dai risultati ottenuti si può affermare che i provini attivati con NaOH sviluppano una matrice più resistente ed una struttura meno porosa rispetto a quelli attivati con KOH.

Infatti, un modulo elastico dinamico elevato indica un materiale più rigido, compatto e con minore presenza di vuoti, mentre un valore più basso di quest'ultimo indica un materiale meno rigido e più poroso.

Nello specifico la malta 50%SN/50%AAS NaOH risulta avere un E_d pari a 17,0 GPa, mentre il valore della malta 50%SN/50%AAS KOH ha un valore che oscilla tra 11,7 e 14,5 GPa, ovvero tra il 14,7% ed il 31% in meno.

Per quanto riguarda la malta 100%SN NaOH, il modulo elastico dinamico vale 32,8 GPa, mentre per la malta 100%SN KOH i valori oscillano tra 24,3 e 27,0 GPa, ovvero tra il 17,7% ed il 25,7% in meno.

Ora non resta che analizzare i risultati delle prove di flessione e di compressione, in modo tale da stabilire quale attivatore alcalino permetta alle malte di sviluppare maggiore resistenza meccanica.

5.1.4 Analisi dei risultati delle prove di flessione e di compressione

In questo paragrafo verranno mostrati e confrontati i risultati delle prove meccaniche effettuate a 7 e 28 giorni di stagionatura sui quattro diversi tipi di malte realizzate nella fase 1 e si determinerà quale tra KOH e NaOH sia l'attivatore che ci permette di raggiungere resistenze meccaniche più elevate.

	7g	Rf 100% SN KOH	Rf 50/50 SN/AAS KOH	Rf 100% SN NaOH	Rf 50/50 SN/AAS NaOH
provino 1		5,629 MPa	3,822 MPa	7,375 MPa	3,630 MPa
	28g	Rf 100% SN KOH	Rf 50/50 SN/AAS KOH	Rf 100% SN NaOH	Rf 50/50 SN/AAS NaOH
provino 1		7,280 MPa	3,510 MPa	7,690 MPa	6,058 MPa
provino 2		8,060 MPa	3,580 MPa		5,280 MPa
provino 3			4,620 MPa		5,490 MPa

Tabella 11. Risultati della prova di flessione malte fase 1

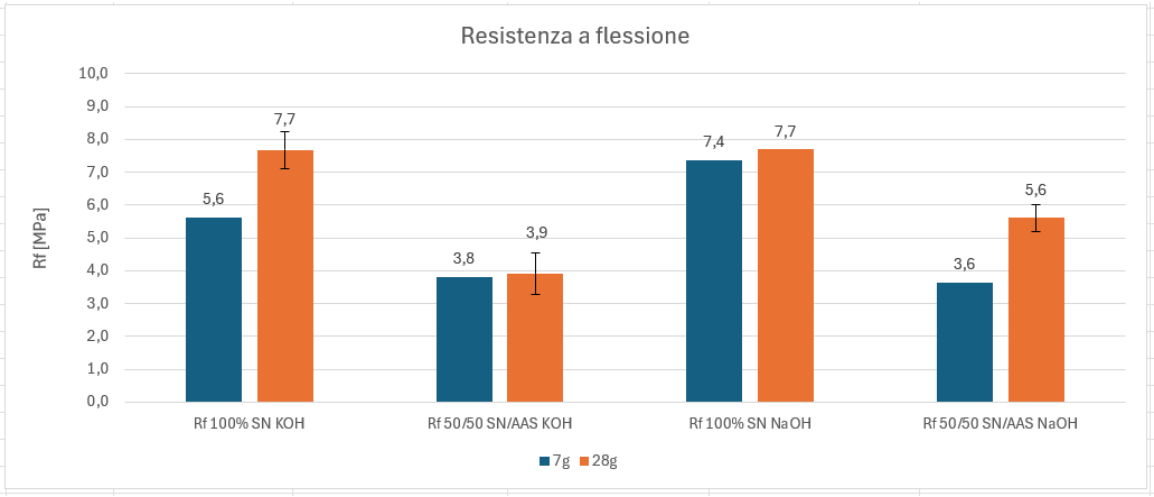


Figura 33. Valori medi di resistenza a flessione malte fase 1

	7g	Rc 100% SN KOH	Rc 50/50 SN/AAS KOH	Rc 100% SN NaOH	Rc 50/50 SN/AAS NaOH
provino 1	1°metà	19,184	13,236	39,672	15,26
	2°metà	25,235	10,267	38,621	11,82
	28g	Rc 100% SN KOH	Rc 50/50 SN/AAS KOH	Rc 100% SN NaOH	Rc 50/50 SN/AAS NaOH
provino 1	1°metà	44,33	21,78	59,46	32,21
	2°metà	37,24	21,36	61,03	25,8
provino 2	1°metà	33,36	28,62		26,67
	2°metà	41,21	31,57		20,83
provino 3	1°metà		25,98		33,94
	2°metà		21,88		32,42

Tabella 12. Risultati della prova di compressione malte fase 1

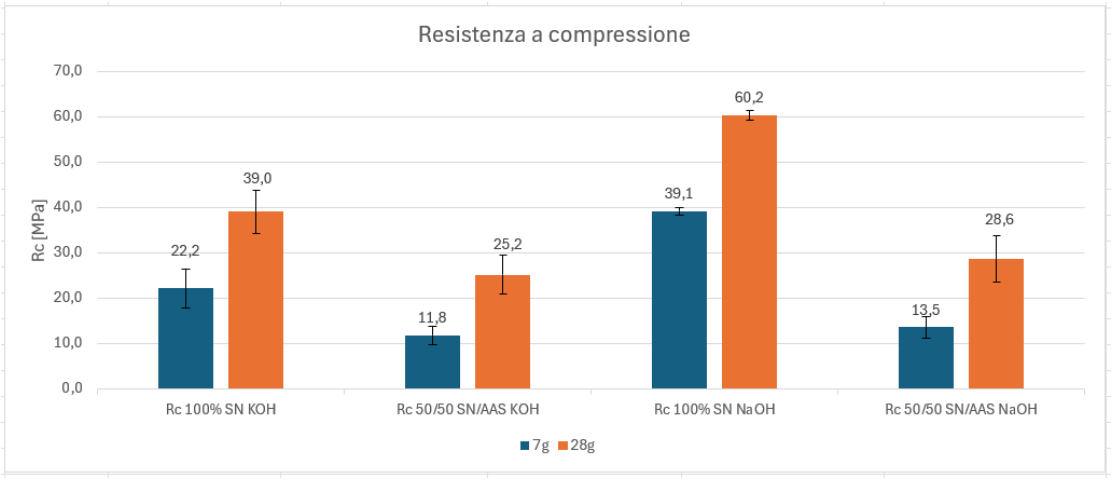


Figura 34. Valori medi di resistenza a compressione malte fase 1

Per prima cosa, si analizzano i valori di resistenza a flessione ottenuti.

Per quanto riguarda le malte 100% SN, impiegando NaOH come attivatore si ottiene un valore di 7,4 MPa a 7 giorni di stagionatura, ovvero un aumento percentuale pari al 32,1% rispetto ai 5,6 MPa ottenuti dai provini attivati con KOH.

Mentre a 28 giorni di stagionatura si ottiene lo stesso valore di R_f pari a 7,7 MPa per entrambe le malte 100% SN.

Invece, nei provini 50%SN/50%AAS, si è addirittura registrata una riduzione di R_f a 7 giorni di stagionatura pari al 5,3% passando da 3,8 MPa utilizzando KOH a 3,6 MPa utilizzando NaOH.

Mentre a 28 giorni di stagionatura si è registrato un marcato aumento pari al 43,6% passando da 3,9 MPa utilizzando KOH a 5,6 MPa utilizzando NaOH.

Analizzando i valori di resistenza a compressione ottenuti si possono trarre le seguenti considerazioni.

Nel caso della compressione l'aumento di R_c passando da KOH a NaOH è molto marcato nelle malte 100% SN, mentre è molto ridotto nelle malte 50%SN/50%AAS.

Nello specifico per le malte 100% SN si ha un aumento pari al 76,1% a 7 giorni di stagionatura, passando da 22,2 MPa con KOH a 39,1 MPa con NaOH, a 28 giorni invece si nota un aumento pari al 54,4% passando da 39 MPa utilizzando KOH a 60,2 MPa utilizzando NaOH.

Per quanto riguarda le malte 50%SN/50%AAS si registra invece un leggero aumento pari al 14,4% a 7 giorni di stagionatura, passando da 11,8 MPa con KOH a 13,5 MPa con NaOH.

Invece, a 28 giorni l'aumento è pari al 13,5% passando da 25,2 MPa con KOH a 28,6 MPa con NaOH.

Distogliendo per un momento l'attenzione dai due attivatori alcalini, un'altra cosa interessante da notare è come l'introduzione del 50% di aggregato riciclato (AAS) nelle miscele provochi un marcato calo delle resistenze meccaniche in tutti i sistemi.

Nello specifico:

Miscela	R_c a 28g [MPa]	Variazione R_c	R_f a 28g [MPa]	Variazione R_f
KOH (100%SN → 50%SN/50%AAS)	39,0→25,2	-35,40%	7,7→3,9	-49,40%
NaOH (100%SN → 50%SN/50%AAS)	60,2→28,6	-52,50%	7,7→5,6	-27,30%

Tabella 13. Confronto tra malte 100%SN e 50%SN/50%AAS

Le cause di tale comportamento sono da ricercarsi nella microstruttura degli aggregati, gli aggregati riciclati infatti presentano un'elevata porosità e un maggiore assorbimento d'acqua; dunque, riducono le prestazioni meccaniche della malta.

Questo abbassamento delle prestazioni è dovuto principalmente a 3 meccanismi chimico-fisici e microstrutturali:

1) Gli aggregati riciclati, essendo altamente porosi, assorbono per capillarità una quantità di liquido molto superiore rispetto alla sabbia calcarea naturale.

Negli impasti ad attivazione alcalina, l'aggregato non assorbe semplicemente l'acqua, ma la soluzione attivante (NaOH o KOH) e l'additivo superfluidificante, ciò causa la sottrazione dei reagenti alcalini alla pasta a base di loppa, riducendo il grado di dissoluzione dei silico-alluminati e causando la formazione di un ridotto volume di gel legante idrato (C-A-S-H), rendendo la matrice complessivamente più porosa e meno resistente [17].

2) I granuli di sabbia riciclata (AAS) non sono costituiti da sola roccia naturale, ma sono rivestiti da una quota del legante originario, questo strato presenta delle microfessurazioni da frantumazione che lo rendono intrinsecamente più debole [17].

3) Poiché l'aggregato riciclato assorbe rapidamente il fluido dell'impasto, viene assorbita anche una quota del 2% di superfluidificante impiegato.

Ciò causa la riduzione di concentrazione di additivo libero nella pasta di loppa, in questo modo viene meno la sua azione disperdente, favorendo la flocculazione delle particelle di precursore e l'intrappolamento di bolle d'aria [2].

Un altro aspetto interessante da analizzare è la cinetica di maturazione e sviluppo delle resistenze; infatti, nei provini 100% SN con NaOH, a soli 7 giorni di stagionatura si è già sviluppato il 65% della resistenza a compressione finale (39,1 MPa su 60,2 MPa) e il 96% della resistenza a flessione finale (7,4 MPa su 7,7 MPa).

Questo evidenzia la capacità dell'idrossido sodio, rispetto all'idrossido potassio, di accelerare le prime fasi di dissoluzione dei calcio-silico-alluminati della loppa [3].

Infine, mentre con l'aggregato 100% naturale l'uso di NaOH ha portato a un incremento notevole di R_c (+54,4% rispetto al KOH a 28 giorni), nella miscela 50%SN/50%AAS il guadagno dato dall'NaOH crolla al 13,5%.

Questo indica che in tali miscele l'aggregato riciclato diviene il fattore limitante, rendendo meno determinante la scelta dell'attivatore alcalino più performante [2].

5.2 Malte: fase 2

Analizzando i risultati ottenuti dai test sulle pastine, dal Pundit e dalle prove meccaniche sui provini della fase 1, è stato constatato che l'attivatore alcalino più performante tra i due testati è l'idrossido di sodio (NaOH).

In virtù di ciò, si può passare ora alla fase due dello studio, dove si andranno a realizzare 4 diverse miscele utilizzando in ognuna di esse la soluzione di NaOH 4M come attivatore alcalino.

Quello che varierà questa volta tra le miscele infatti, non sarà l'attivatore, bensì il sistema legante.

Andremo dunque a manipolare la matrice legante, riducendo gradualmente la % di loppa d'altoforno (GGBFS) e sostituendola con la frazione fine di sabbia alcali-attivata (D<0,5 mm), che verrà quindi introdotta in miscela non più in qualità di aggregato ma in qualità di precursore alcalino.

Inoltre, come aggregato, questa volta, verrà utilizzata una sabbia naturale silicea (0/1 mm) invece di quella calcarea utilizzata nella fase 1.

Sarà quindi interessante analizzare come cambierà il comportamento meccanico delle malte al variare della percentuale di loppa in miscela.

5.2.1 Confezionamento malte-fase 2

Per le malte della fase 2 e della fase 3, si è deciso non utilizzare i casseri standard 40 mm x 40mm x 160 mm in acciaio.

È stato invece fatto uso di cilindretti in plastica di altezza pari a 5 cm e diametro interno pari a 3 cm, in questo modo si è potuto ottimizzare

la quantità di materiale a disposizione e produrre un maggior numero di provini.



Figura 35. Cilindretti usati per il confezionamento delle malte delle fasi 2 e 3

Tali cilindretti verranno riempiti di materiale fino ad un'altezza di 3 cm, in modo tale da mantenere un rapporto 1:1 tra il diametro e l'altezza dei provini da testare.

I provini ottenuti da tali cilindretti saranno testati a sola compressione dopo 2, 7 e 28 giorni di stagionatura; infatti, per via delle loro ridotte dimensioni, essi non si prestano alla prova di flessione.

Di seguito i mix design delle malte realizzate e i risultati delle prove di spandimento:

FINAL mortar mixes (g/L)

Mortar	AA Sand	GGBFS	NaOH 4M	SAND 0-1 s.s.d.		SP	w/b
				Dry sand	water		
100% GGBFS	-	508	289	1510	15	10.2	0.45
75% GGBFS	127	381	289	1510	15	10.2	0.45
50% GGBFS	254	254	289	1510	15	10.2	0.45
25% GGBFS	381	127	289	1510	15	10.2	0.45

Tabella 14. Mix design malte fase 2



Figura 36. Spandimento 100%GGBFS-misurazione 1



Figura 37. Spandimento 100%GGBFS-misurazione 2



Figura 38. Spandimento 75%GGBFS-misurazione 1



Figura 39. Spandimento 75%GGBFS-misurazione 2



Figura 40. Spandimento 50%GGBFS-misurazione 1



Figura 41. Spandimento 50%GGBFS-misurazione 2



Figura 42. Spandimento 25%GGBFS-misurazione 1



Figura 43. Spandimento 25%GGBFS-misurazione 2

Tipo di malta	spandimento			consistenza
	D1 [mm]	D2 [mm]	Dm [mm]	all'atto
100%GGBFS	118	120	119	Rigida
75%GGBFS	107	106	107	Rigida
50%GGBFS	102	102	102	Rigida
25%GGBFS	105	105	105	Rigida

Tabella 15. Risultati prove di spandimento malte fase 2



Figura 44. Provini malte fase 2

5.2.2 Prove di compressione a 2, 7 e 28 giorni-fase 2

In questo paragrafo si andranno a mostrare e analizzare i risultati delle prove a compressione effettuate sui provini.

Verrà analizzato nel dettaglio come varierà il comportamento delle malte al diminuire della percentuale di loppa e all'aumentare della sabbia alcali-attivata nella matrice legante.



Figura 45. Rottura provino 100%GGBFS a 2 giorni



Figura 46. Rottura provino 75%GGBFS a 2 giorni



Figura 47. Rottura provino 50%GGBFS a 2 giorni

Come si nota in figura 47, il provino 50%GGBFS è rimasto incoerente dopo 2 giorni di stagionatura, di conseguenza per quanto riguarda i provini 25%GGBFS è stata presa la decisione di testarli direttamente dopo 7 giorni di stagionatura, in virtù del fatto che dopo soli due giorni non sarebbero stati in grado di sviluppare resistenza meccanica.

Di seguito si riportano i risultati e l'analisi:

	100% GGBFS NaOH	75% GGBFS/25% AAS NaOH	50% GGBFS/50% AAS NaOH	25% GGBFS/75% AA NaOH
Rc 2g [MPa]	7,6	1,3	0,1	
	8,7	1,3		
Rc 7g [MPa]	20,7	10,3	4,9	0,9
	21,2	11,2	4,4	0,9
	15,4	11,6	5,1	0,9
Rc 28g [MPa]	42,1	31,9	24,4	4,2
	41,8	35,4	22,6	4,8
	50,3	37,8		6,3

Tabella 16. R_c malte fase 2

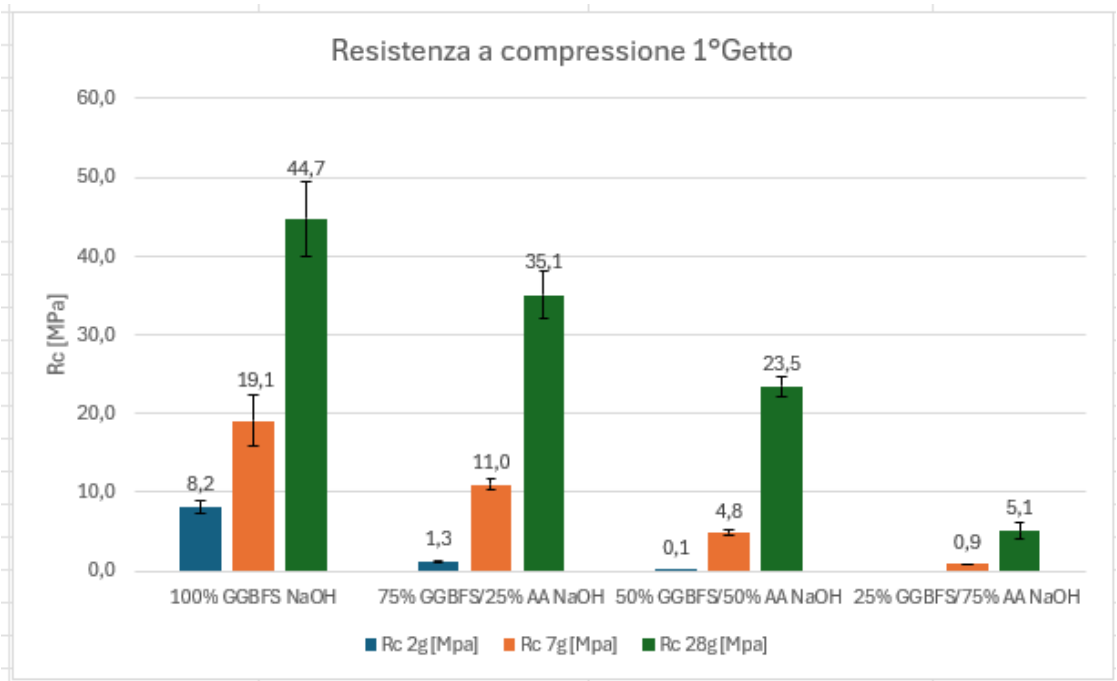


Figura 48. Valori medi di R_c malte fase 2

Come si evince in figura 48, in generale la resistenza massima a compressione diminuisce al diminuire della percentuale di loppa presente in miscela.

Nello specifico, la sostituzione della loppa con sabbia alcali-attivata penalizza drasticamente la resistenza a 2 giorni (8,2 MPa→1,3 MPa→0,1 MPa→0 MPa).

Il crollo drastico della resistenza a 2 giorni è legato alla diversa cinetica di dissoluzione tra loppa e sabbia riciclata (AAS).

La loppa d'altoforno possiede una struttura amorfo-vetrosa fortemente reattiva e instabile; non appena entra in contatto con l'idrossido di sodio (NaOH), gli ioni ossidrile attaccano la superficie dei granuli liberando rapidamente in soluzione grandi quantitativi di calcio, silicio e alluminio [3].

Questa rapida solubilizzazione innesca l'immediata precipitazione del gel di alluminosilicato di calcio idrati (C-A-S-H), grazie al quale la matrice assume rapidamente una struttura rigida; infatti, dopo 2 giorni di stagionatura il provino 100%GGBFS ha già una R_c pari a 8,2 MPa [3].

La sabbia alcali-attivata invece presenta un comportamento completamente diverso, le sue fasi reattive si sono già state consolidate ed espresse nel suo precedente ciclo di vita (a meno di una piccola parte di reattività che potrebbe essere rimasta latente), per cui nelle prime 48 ore essa dimostra una cinetica di dissoluzione estremamente più lenta [4].

Quindi, sostituendo frazioni via via crescenti di loppa con sabbia riciclata si va sostanzialmente a "diluire" la frazione di legante reattivo in miscela.

Nelle formulazioni aventi 50%GGBFS e 25%GGBFS, la quantità di gel C-A-S-H generata a 2 giorni non è sufficiente a raggiungere la soglia di percolazione, ossia la densità minima di prodotti di reazione indispensabile per creare uno scheletro solido continuo [18].

Questo fenomeno spiega perché a 2 giorni il materiale rimanga incoerente e con resistenze prossime allo zero (0,1 MPa).

Solo con il passare dei giorni il lento attacco superficiale al precursore riciclato e il proseguire della reazione della loppa consentono un graduale accumulo di gel, permettendo al materiale di superare questa fase critica e sviluppare le resistenze che sono state registrate a 7 e 28 giorni di stagionatura [18].

Mentre a 2 giorni il crollo di resistenza è drastico, a 7 e 28 giorni l'andamento decrescente diviene via via più lineare, questo conferma quanto già detto sul superamento della fase critica.

Passando ora alla fase 3, nella quale per rimediare a questo calo drastico di prestazioni nel breve periodo, è stato pensato di macinare più finemente la sabbia alcali-attivata, portandola da D_{max}<500 μm a D_{max}<150 μm, in questo modo si va ad aumentare considerevolmente la superficie specifica del precursore riciclato, aumentandone di conseguenza la reattività.

Procederemo quindi a confezionare quattro malte delle stesse tipologie delle quattro precedenti, variando il mix design e sfruttando la maggior reattività del precursore riciclato dovuta alla sua macinazione tramite mortaio.

5.3 Malte: fase 3

5.3.1 Confezionamento malte-fase 3

	GGBFS	AAS	Dry Sand (0/1)	H_2O	NaOH	SP	w/s
100% GGBFS	478	0	1420	14	340	5	0.55
75% GGBFS	358	120	1420	14	340	5	0,55
50% GGBFS	240	240	1420	14	340	5	0,55
25% GGBFS	120	358	1420	14	340	9,6	0,55

Tabella 17. Mix design malte fase 3 [g/l]



Figura 49. Provini in stagionatura

Di seguito i risultati delle prove di spandimento:



Figura 50. Spandimento 100%GGBFS-misurazione 1



Figura 51. Spandimento 100%GGBFS-misurazione 2



Figura 52. Spandimento 75%GGBFS-misurazione 1



Figura 53. Spandimento 75%GGBFS-misurazione 2



Figura 54. Spandimento 50%GGBFS-misurazione 1



Figura 55. Spandimento 50%GGBFS-misurazione 2



Figura 56. Spandimento 25%GGBFS-misurazione 1



Figura 57. Spandimento 25%GGBFS-misurazione 2

Tipo di malta	spandimento			consistenza
	D1 [mm]	D2 [mm]	Dm [mm]	all'atto
100%GGBFS	165	155	160	Plastica
75%GGBFS	142	149	146	Plastica
50%GGBFS	137	134	136	Rigida
25%GGBFS	115	117	116	Rigida

Tabella 18. Risultati prove di spandimento fase 3

5.3.2 Prove di compressione a 2, 7 e 28 giorni-fase 3

Durante le prove a compressione, è importante evitare l'applicazione di carichi eccentrici, che vanno a determinare delle resistenze a compressione non ottimali (Figura 58).



Figura 58. Classica forma a clessidra di provini rotti a compressione nel caso di carico eccentrico (sinistra) e nel caso di carico centrato (destra).

Di seguito riportiamo i risultati della prova di compressione:

	100% GGBFS NaOH	75% GGBFS/25% AAS NaOH	50% GGBFS/50% AAS NaOH	25% GGBFS/75% AAS NaOH
Rc 2g [MPa]	10,2	2,9	0,2	
	9,5	2,7	0,3	
	12,0	2,4		
Rc 7g [MPa]	25,8	16,2	11,1	2,7
	29,3	23,1	11,5	1,4
				1,7
Rc 28g [MPa]	31,1	17,5	22,6	15,0
	29,4	26,4	24,1	14,5
	36,2	31,9	26,6	12,9

Tabella 19. R_c malte fase 3

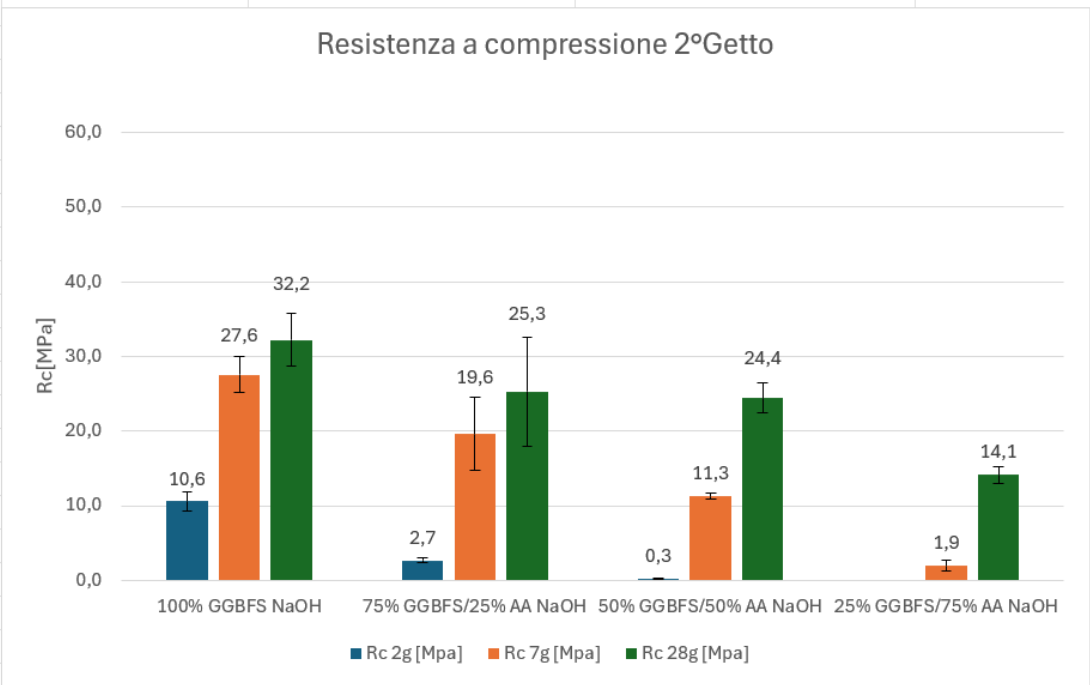


Figura 59. Valori medi di R_c malte fase 3

Analizzando i valori medi di R_c ottenuti nella fase 3, si nota come all'aumentare della percentuale di sostituzione della loppa con la sabbia alcali attivata si registri un progressivo calo della resistenza a compressione (R_c) a tutte le scadenze di stagionatura (2, 7 e 28 giorni).

La miscela 100% GGBFS raggiunge i valori più elevati in assoluto: 10,6 MPa a 2 giorni, 27,6 MPa a 7 giorni e 32,2 MPa a 28 giorni.

Con il 25% di AAS la resistenza a 28 giorni scende a 25,3 MPa, mentre con il 50% di AAS la resistenza a 28 giorni si attesta su 24,4 MPa.

Si nota che tra il 25% e il 50% di sostituzione la perdita di resistenza a lungo termine tende a stabilizzarsi, portando invece la sostituzione al 75% di AAS, si registra un calo drastico della resistenza a 28 giorni, che crolla a 14,1 MPa (una riduzione pari al 56,2% rispetto al campione 100% GGBFS).

Nel prossimo paragrafo si andranno a confrontare i risultati ottenuti dalle malte nella fase 2 e nella fase 3, sarà dunque interessante andare a valutare come sia variato il comportamento dei provini dopo la macinazione della sabbia alcali-attivata.

5.4 Fase 2 vs Fase 3: confronto dei risultati

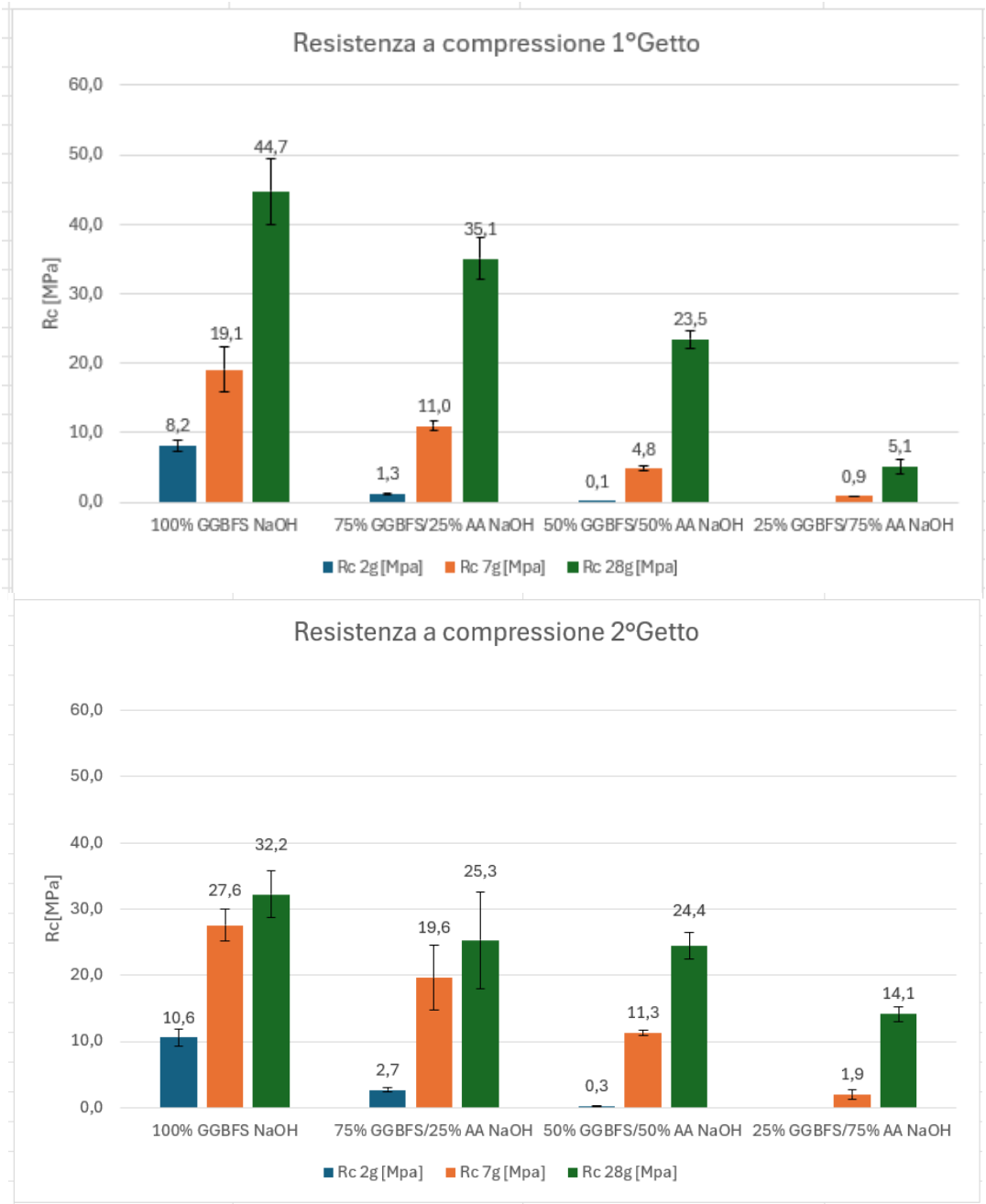


Figura 60. Confronto tra fase 2 e fase 3

Confrontando i risultati ottenuti si nota che la macinazione della sabbia alcali-attivata ne aumenta la reattività; questo ha accelerato la cinetica di dissoluzione delle fasi reattive residue presenti nella sabbia riciclata, favorendo una più rapida formazione dei prodotti di reazione.

Questo spiega perché a 2 e 7 giorni si osserva un aumento generalizzato delle resistenze meccaniche nelle malte della fase 3.

A 28 giorni, per le miscele con alte percentuali di precursore riciclato (50% e 75% di AAS), la macinazione a 150 μm ha portato a un incremento significativo della resistenza rispetto alle malte della fase 2.

Questo dimostra che, per tassi di sostituzione della loppa con sabbia alcali-attivata elevati, la macinazione diventa fondamentale per sbloccare la reattività latente del precursore riciclato a lungo termine.

Per quanto riguarda le malte 100% GGBFS e 75% GGBFS/25% AAS, invece, si registra un significativo calo delle prestazioni che rivela dinamiche complesse tipiche dei leganti ad attivazione alcalina.

Il fattore determinante di tale riduzione di R_c va ricercato nella cinetica di reazione iniziale e nei fenomeni di trasporto ionico all'interno della microstruttura in formazione.

Infatti, quando il sistema presenta una reattività molto elevata o una maggiore finezza complessiva, la dissoluzione iniziale dei precursori (in particolare della loppa) in ambiente fortemente alcalino avviene in modo estremamente rapido.

Questa precipitazione molto veloce dei primi gel C-A-S-H tende a depositarsi immediatamente attorno alle particelle di precursore non ancora disciolti, creando una sorta di guscio denso e poco permeabile, noto in letteratura scientifica come strato passivante [19].

Questo strato agisce come barriera fisica alla diffusione, ostacolando il passaggio delle specie ioniche della soluzione attivante verso le particelle di precursore non ancora disciolte [19].

Di conseguenza, mentre a 2 e 7 giorni la matrice beneficia dell'elevato sviluppo iniziale di resistenza, a 28 giorni la reazione subisce un netto rallentamento per difetto di diffusione, impedendo il conseguimento dei livelli prestazionali che si otterrebbero da una dissoluzione più graduale.

6.CONCLUSIONI

Relativamente alle applicazioni nel settore edilizio, i valori di R_c a 28 giorni consentono di tracciare una chiara demarcazione tra formulazioni idonee all'uso strutturale e quelle destinate ad impieghi non strutturali, in perfetto accordo con le soglie prescritte dalle normative vigenti.

Nella presente sperimentazione, l'uso di NaOH è da preferirsi al KOH a pari molarità (4M) per la produzione di malte ad attivazione alcalina, inoltre, l'uso di sabbia naturale permette di ottenere resistenze nettamente più alte rispetto a malte con il 50% in volume di aggregato riciclato alcali-attivato.

Le miscele ad alto contenuto di loppa (100% GGBFS e 75% GGBFS/25% AAS) registrano valori di resistenza media a compressione compresi tra 25,3 MPa e 44,7 MPa a 28 giorni; tali prestazioni superano ampiamente i requisiti minimi imposti dalla norma UNI EN 998-2 e dalle NTC 2018 per malte da muratura strutturale ad alte prestazioni (quali le classi M10 e M15, che richiedono resistenze caratteristiche minime di 10MPa e 15MPa).

Inoltre, facendo riferimento alla norma UNI EN 1504-3 per la riparazione e il ripristino delle strutture in calcestruzzo armato, questi valori collocano

le miscele a prevalenza di GGBFS nella classe strutturale R3 (requisito minimo $R_c \geq 25$ MPa).

Ciò rende tali formulazioni pienamente idonee alla realizzazione di elementi prefabbricati portanti, malte di allettamento per murature sismiche e malte da ripristino strutturale.

Invece, le formulazioni ad alto contenuto di precursore riciclato (50% GGBFS/50% AAS e 25% GGBFS/75% AAS) mostrano valori di R_c più contenuti ma comunque di grande interesse applicativo, posizionandosi pienamente nell'ambito degli impieghi non strutturali e della prefabbricazione leggera.

In particolare, la miscela 25% GGBFS/75% AAS della fase 3, raggiungendo una resistenza a compressione pari a 14,1 MPa a 28 giorni, dimostra come la macinazione del precursore riciclato permetta di superare ampiamente la soglia di 6 MPa prevista dalla norma UNI EN 998-1 per la classe CS IV (la classe prestazionale più elevata per intonaci e malte da rivestimento), oltre a soddisfare i requisiti della classe R1 ($R_c \geq 10$ MPa) e R2 ($R_c \geq 15$ MPa) della UNI EN 1504-3 per il ripristino non strutturale.

Tali livelli prestazionali collocano queste formulazioni ad elevata percentuale di precursore riciclato nella fabbricazione di blocchi per tamponature non portanti, intonaci tecnici e pannelli divisori, ambiti nei quali non sono richieste elevate R_c ma risulta prioritaria la riduzione dell'impronta carbonica.

In conclusione, in accordo con i quadri normativi del settore, le malte realizzate nel seguente studio risultano essere sostenibili, versatili e pienamente capaci di soddisfare le esigenze del cantiere moderno.

7.BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

[1] Mario Collepardi, *Il nuovo calcestruzzo*, Edizioni Tintoretto pp.12-28(5ª edizione).

[2] Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., Labrincha, J., & John, V. M. (Eds.) – *Eco efficient Masonry Bricks and Blocks: Design, Properties and Durability*, Woodhead Publishing / Elsevier pp.136-139 (2014).

[3] Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (Eds.) – *Alkali Activated Materials*, Springer pp.11-17/38-46/17-42/79-124 (2014).

[4] Shi, C., Krivenko, P. V., & Roy, D. – *Alkali-Activated Cements and Concretes*, Taylor & Francis pp.22-25/47-110 (2006).

[5] Davidovits, J. – *Geopolymer Chemistry and Applications*, Institut Géopolymère pp.31-42/415-428 (5ª ed., 2020).

[6] Taylor, H. F. W. – *Cement Chemistry*, Thomas Telford pp.270-282 (2ª ed., 1997).

[7] D. Khale, R. Chaudhary, "Mechasism of gepolymerization and factors influencing its development: a review", journal of materials science, vol.42, no.9, pp.1120-1135,2007.

[8] https://www.treccani.it/.

[9] F. Valorosi," Compositi lana-geopolimero: produzione e caratterizzazione, Tesi di Laurea Magistrale, Dipartimento di Chimica Industriale "Toso Montanari"Università degli studi di bologna,2014-2015.

[10] Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (Eds.). (2009). *Geopolymers: Structures, processing, properties and applications*. Woodhead Publishing, pp. 20–42.

[11] J. Davidovits. "Geopolimer: inorganic polymeric new materials". J. Thermal Analysis (1991). Vol. 37: pp. 1633-1656.

[12] www.geopolymer.org

[13] P.G. Malone, C.J. Randall, T. Kirkpatrick. "Potential applications of alkali-activated aluminosilicate binders in military operations". GL-85-15, Geotechnical Laboratory Department of the Army, Washington D.C. USA, (1985).

[14] P.V. Krivenko. "Alkali cements" Proceedings of the First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, Kiev, Ukraine, Curatore: P.V. Krivenko. (1994) pp. 11-129.

[15] J. Wastiels, X. Wu, S. Faignet, G. Patfoort, Mineral polymer based on fly ash, Proceed. 9th Intl. Conf. Solid Waste Management, Philadelphia, PA, USA, 1993, 8pp.

[16] N.Pierandrei ”valutazione sperimentale di resistenza meccanica, prestazioni termoigrometriche e resistenza all’erosione di intonaci a base di calce idraulica naturale additivati con nanoclay e nanolime” Tesi di laurea magistrale,Dipartimento di scienze e ingegneria della materia, dell’ambiente e dell’urbanistica,Università politecnica delle marche,2019-2020.

[17] De Brito, J.,Saikia,N. (2013)-Recycled Aggregate in Concrete:Use of Industrial, Construction and Demolition Waste,Springer. pp.58-67.

[18] Garboczi, E.J., & Bentz, D.P. (1991)-“Percolation of phases in a three-dimensional microstructure model of hydrating cement paste,Cement and Concrete research” pp.328-333.

[19] Alkali-Activated Materials: State-of-the-Art-Report (RILEM TC 224-AAM),pp.147-158.