



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Civile e Ambientale

**Caratterizzazione di calcestruzzi con aggregati riciclati provenienti da
matrici ad attivazione alcalina**

**Characterization of concretes with recycled aggregates from
alkali-activated matrices**

Relatrice:

Ing. **Alessandra Mobili**

Tesi di Laurea di:

Gianluca Bruni

Correlatore

Prof. **Jacopo Donnini**

A.A. 2025/2026

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	5
2. STATO DELL'ARTE DEI MATERIALI AD ATTIVAZIONE ALCALINA	8
2.1 Generalità sui materiali ad attivazione alcalina.....	8
2.2 I precursori alcalini.....	10
2.2.1 Loppa d'altoforno.....	11
2.3 Attivatore alcalino.....	13
2.4 Formazione dei materiali ad attivazione alcalina.....	15
3. MATERIALI	18
3.1 Materiali impiegati.....	19
3.1.1 Caratterizzazione fisica degli aggregati.....	21
3.2 Mix Design.....	32
3.3 Preparazione dei Provini.....	36
3.3.1 Casseri	37
3.3.2 Confezionamento degli impasti.....	38
3.3.3 Prova di spandimento.....	39
3.3.4 Getto e scasseratura.....	44
3.3.5 Catalogazione dei provini.....	45
4. PROVE SULLE MALTE INDURITE.....	47
4.1 Determinazione della massa volumica.....	47
4.2 Prove di caratterizzazione meccanica.....	48
4.2.1 Prova di flessione.....	49
4.2.2 Prova di compressione.....	51
4.3 Risultati e osservazioni.....	54
4.4 Porosimetria.....	63
4.4.1 Significato della prova.....	64
4.4.2 Strumentazione utilizzata.....	66

4.4.3 Procedura operativa.....	67
4.4.4 Risultati e osservazioni.....	69
4.5 Analisi microscopica elettronica a scansione SEM.....	73
5. CONCLUSIONI	94
6. RINGRAZIAMENTI.....	97
7. INDICE DELLE TABELLE.....	99
8. BIBLIOGRAFIA.....	100

1.INTRODUZIONE

Nello scenario contemporaneo dell'Ingegneria e dell'Architettura, la ricerca di soluzioni edilizie sostenibili e a basso impatto ambientale è divenuta un obiettivo primario. Il settore delle costruzioni riveste una rilevanza strategica per lo sviluppo economico e tecnologico globale. Tuttavia, esso rappresenta al contempo una delle principali fonti di pressione ecologica, trovandosi oggi nella complessa condizione di dover conciliare la propria crescita con gli stringenti obiettivi di neutralità carbonica (emissioni zero) definiti dalle politiche internazionali. Secondo il *Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025*, il settore delle costruzioni è responsabile del 34% delle emissioni totali globali di CO₂ legate all'energia. In particolare, le emissioni hanno raggiunto la cifra record di 9,8 gigatonnellate di CO₂ (GtCO₂), mentre le emissioni di carbonio "incorporato" ovvero quelle strettamente legate alla produzione dei materiali e al processo di costruzione, si attestano a circa 2,9 GtCO₂. Per allinearsi agli obiettivi climatici internazionali e raggiungere la piena decarbonizzazione entro il 2050 (con un target intermedio di 4,4 GtCO₂/anno al 2030), il settore è chiamato a una drastica e immediata riduzione delle proprie emissioni. Questo richiede un calo medio annuo stimato del 10,8% (pari a 0,77 GtCO₂), rendendo improrogabile l'adozione di pratiche di costruzione circolari e la transizione verso materiali a basso contenuto di carbonio [1]. In questo scenario di urgente transizione ecologica, la ricerca di alternative sostenibili ai leganti tradizionali, come il cemento Portland, è diventata una priorità assoluta. I materiali ad attivazione alcalina (AAM - *Alkali-Activated Materials*) rappresentano una delle soluzioni tecnologicamente più promettenti per abbattere il carbonio incorporato negli edifici. Sfruttando sottoprodotti industriali e materiali di scarto, gli AAM permettono di ottenere prestazioni

meccaniche e durabilità paragonabili a quelle dei calcestruzzi tradizionali, riducendo drasticamente l'impronta carbonica associata alla produzione del legante e promuovendo concretamente un'economia di tipo circolare.

La presente tesi si inserisce in questo filone di ricerca e contribuisce alle attività del progetto europeo "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 (www.reconstruct-project.eu), un progetto che vuole promuovere la diffusione e l'adozione di materiali sostenibili nel settore edilizio (Figura 1).



Figura 1. Logo del progetto RECONSTRUCT

Il progetto è orientato alle sfide attuali ponendo una maggiore attenzione sulla riduzione dei rifiuti da costruzione e demolizione (C&DW – *Construction and Demolition Wastes*), l'estensione della vita utile degli edifici e 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 sono una valida alternativa al cemento Portland avendo generalmente una maggiore resistenza alla corrosione e una migliore durabilità in ambienti aggressivi, inoltre abbiamo la possibilità di riutilizzare i materiali di scarto contribuendo ad una gestione sostenibile

delle risorse utilizzate. Lo studio sperimentale di questo elaborato, condotto presso il Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica (SIMAU) dell'Università Politecnica delle Marche (UNIVPM), ha come obiettivo la caratterizzazione di calcestruzzi realizzati impiegando aggregati riciclati provenienti da matrici ad attivazione alcalina. Nello specifico, l'attività di ricerca si concentra sull'analisi comparativa di diverse formulazioni. Verranno valutate le prestazioni di getti di riferimento confezionati utilizzando loppa d'altoforno (GGBFS), cemento Portland (CEM I) e sabbia esincalce, confrontandoli con miscele contenenti aggregati derivati da materiali ad attivazione alcalina (Sand AAM) e aggregati di calcestruzzo riciclato (Sand RCA). Tutti i campioni saranno sottoposti a prove di caratterizzazione fisico-meccanica, al fine di indagarne la resistenza, la composizione e le proprietà strutturali complessive. Attraverso lo studio di queste soluzioni di recupero, si mira a dimostrare la fattibilità tecnica di tali miscele, offrendo una valida e concreta alternativa ai materiali tradizionali per favorire la piena transizione verso un'economia circolare e la decarbonizzazione del settore edile.

2.STATO DELL'ARTE DEI MATERIALI AD ATTIVAZIONE ALCALINA

2.1 Generalità sui materiali ad attivazione alcalina

All'interno delle strategie di decarbonizzazione del settore delle costruzioni, la sfida principale per l'abbattimento del carbonio incorporato risiede nella sostituzione del legante idraulico tradizionale, ovvero il cemento Portland tradizionale (OPC – *Ordinary Portland Cement*) [2]. La manifattura del clinker è infatti un processo ad altissimo impatto energetico e chimico: richiede la cottura di materie prime, prevalentemente calcare e argilla, all'interno di forni rotativi a temperature che raggiungono i 1450 °C [3, 4]. Questo trattamento non solo comporta un gravoso consumo di combustibili fossili, ma innesca la decomposizione termica del carbonato di calcio, nota come calcinazione o decarbossilazione, secondo la reazione chimica [4]:



Questo fenomeno libera direttamente in atmosfera circa 0,6 - 0,9 tonnellate di anidride carbonica per ogni tonnellata di clinker di cemento prodotta, rendendo l'industria clinkerizzante responsabile di una quota superiore al 7% delle emissioni globali di gas serra [3, 4].

In questo specifico contesto si inserisce lo sviluppo dei materiali ad attivazione alcalina (*Alkali-Activated Materials*, AAM). Gli AAM rappresentano una soluzione tecnologica radicalmente differente: non si basano sulla formazione di silicati e alluminati di calcio idrati tramite la reazione con l'acqua, ma sfrutta la reattività di

polveri allumino-silicatiche (i precursori) combinate con soluzioni fortemente basiche (gli attivatori) [5, 6]. Questo approccio consente di escludere completamente la fase di calcinazione ad alta temperatura, poiché possono essere usati scarti e sottoprodotti industriali o argille calcinate a temperature più basse del clinker di cemento Portland, permettendo al legante di consolidarsi e indurire anche a temperatura ambiente, abbattendo l'impronta carbonica incorporata nel materiale e favorendo il riciclo di sottoprodotti industriali o inerti di recupero.

Storicamente, le prime evidenze sperimentali risalgono agli albori del XX secolo. Nel 1908, Hans Kühl depositò un brevetto focalizzato sulla sintesi di un legante ottenuto miscelando loppe vetrose d'altoforno con carbonati alcalini, dimostrando l'ottenimento di prestazioni meccaniche paragonabili a quelle dei cementi coevi [7]. Successivamente, nel 1940, Purdon pubblicò indagini sistematiche sull'attivazione di scorie siderurgiche mediante idrossido di sodio, evidenziando uno sviluppo termico estremamente contenuto durante le fasi di idratazione [8]. Il quadro teorico moderno si è consolidato prima grazie agli studi condotti da Glukhovsky negli anni Cinquanta sui cosiddetti "silicati terrosi" (*soil silicates*) [9], e in seguito grazie alle ricerche sviluppate sul finire degli anni Settanta dal chimico francese Joseph Davidovits, che coniò il termine "geopolimeri" per identificare questi polimeri inorganici tridimensionali [10].

L'inquadramento di questi leganti è tuttora oggetto di dibattito all'interno della comunità scientifica. La modellazione classica proposta da Van Deventer e Provis identifica i materiali ad attivazione alcalina come un macro-insieme comprensivo di differenti formulazioni, diviso in relazione al tenore di calcio e alluminio presenti [5]. All'interno di questa classificazione, i geopolimeri vengono interpretati come un sotto-

insieme specifico, contraddistinto da un ridotto contenuto di calcio e da un'elevata concentrazione di allumina e silice [5, 6]. Al contrario, Davidovits contesta tale sovrapposizione terminologica, asserendo che i geopolimeri debbano essere considerati esclusivamente polimeri inorganici stabili generati da un processo di geopolimerizzazione molecolare ben definito, distinguendoli dagli alcali-attivati generici che sviluppano invece gel idrati amorfi o semicristallini privi di strutture reticolari covalentemente chiuse [11].

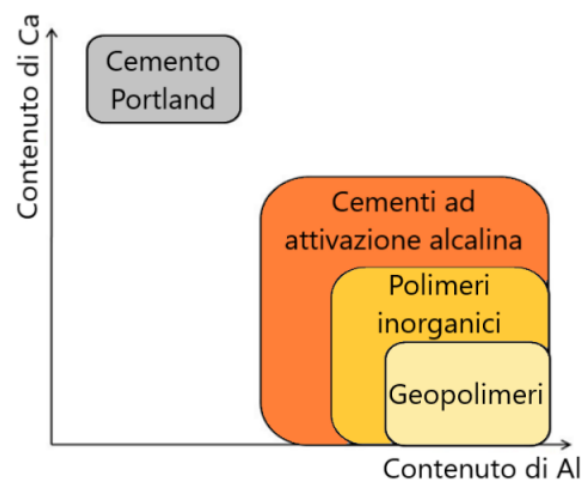


Figura 2: Proposta di classificazione di “materiali attivati con alcali” confrontati con il cemento Portland

2.2 I precursori alcalini

I precursori costituiscono la frazione solida reattiva dei sistemi ad attivazione alcalina, fungendo da sorgente primaria di alluminio, silicio e calcio per la genesi delle fasi leganti stabili [6]. Affinché l'attacco alcalino possa esplicarsi in modo efficace, tali polveri devono possedere un'elevata porzione amorfa o vetrosa, poiché i reticoli cristallini stabili mostrano una cinetica di dissoluzione estremamente lenta anche in

ambientanti a pH fortemente basico [6, 12]. Sotto il profilo chimico, la reattività del precursore è strettamente vincolata ai rapporti atomici interni tra i principali ossidi costituenti, con particolare riferimento al biossido di silicio (SiO_2), al triossido di alluminio (Al_2O_3) e all'ossido di calcio (CaO) [6]. Inoltre, le proprietà fisiche e morfologiche, quali l'area superficiale specifica e la distribuzione granulometrica, governano direttamente l'estensione dell'interfaccia solido-liquido, influenzando la velocità di idrolisi iniziale delle specie ioniche [12].

La frontiera più avanzata della sostenibilità nel campo degli alcali-attivati prevede non solo l'impiego di precursori da sottoprodotti industriali, ma anche la totale chiusura del ciclo di vita dei materiali tramite il riciclo degli aggregati [13, 14]. La frantumazione di vecchie matrici ad attivazione alcalina consente infatti di ricavare inerti riciclati che mostrano una straordinaria affinità chimica con le nuove paste leganti, azzerando le discontinuità strutturali tipiche dei calcestruzzi tradizionali e riducendo l'impatto legato all'estrazione di materie prime di cava [14].

2.2.1 Loppa d'altoforno

La loppa granulata d'altoforno (GGBFS) rappresenta un sottoprodotto non metallico generato durante le operazioni di fusione e riduzione nei forni siderurgici per la produzione della ghisa. La scoria liquida galleggiante sul metallo fuso viene prelevata e sottoposta a un processo di raffreddamento estremamente rapido tramite getti d'acqua ad alta pressione, comunemente definito granulazione. Questo repentino shock termico inibisce la nucleazione e l'accrescimento cristallino dei minerali, congelando la struttura atomica in uno stato disordinato e prettamente vetroso, configurando un

materiale contraddistinto da un'elevata instabilità termodinamica e da spiccate proprietà di idraulicità latente [12].

La costituzione chimica della loppa granulata d'altoforno si attesta stabilmente in un sistema dominato dall'ossido di calcio (CaO), dal biossido di silicio (SiO_2) e dal triossido di alluminio (Al_2O_3), a cui si associano aliquote minori di ossido di magnesio (MgO) e tracce di ossidi di ferro e zolfo. Nel settore dei materiali ad attivazione alcalina, i sistemi basati sull'utilizzo prevalente della loppa d'altoforno identificano un ambito tecnologico consolidato noto come Alkali-Activated Slag (AAS) [6]. Grazie all'elevato apporto di calcio fornito dalla loppa, queste miscele esibiscono un'eccellente cinetica di indurimento anche a temperature ordinarie, consentendo uno sviluppo molto rapido delle proprietà meccaniche a breve termine e strutturando matrici contraddistinte da una microstruttura densa, compatta e a bassa porosità aperta [6, 12]. Nelle applicazioni strutturali moderne, la loppa può essere combinata in sistemi ibridi con piccole percentuali di cemento Portland (CEM I) per calibrare i tempi di presa e ottimizzare lo sviluppo dei prodotti idrati nel medio e lungo termine.



Figura 3: Loppa granulata d'altoforno (GBBFS)

2.3 Attivatore alcalino

L'attivatore alcalino ricopre un ruolo funzionale primario nei sistemi leganti ad attivazione alcalina, agendo come l'agente chimico deputato a innescare e sostenere la dissoluzione del precursore solido [6]. La soluzione alcalina fornisce gli ioni ossidrile (OH^-) necessari per spezzare i legami covalenti altamente stabili di silicio e alluminio (Si-O-Si e Al-O-Al) presenti nella frazione vetrosa del precursore, immettendo contemporaneamente nel sistema i cationi metallici dei metalli alcalini preposti a bilanciare le cariche elettriche negative dei tetraedri alluminosilicatici [6, 15]. I reagenti chimici commerciali comunemente impiegati nella pratica scientifica comprendono gli idrossidi di sodio o potassio (NaOH , KOH) e i rispettivi silicati solubili [15].

L'idrossido di sodio (NaOH), commercialmente noto come soda caustica, rappresenta l'attivatore più diffuso e impiegato nei protocolli sperimentali, in virtù della sua capillare reperibilità commerciale e di un costo economico contenuto. Essendo una base forte, la dissoluzione di NaOH in acqua permette di raggiungere livelli di pH estremamente elevati, accelerando drasticamente le fasi iniziali di attacco chimico e idrolisi dei precursori [15]. L'intensità di tale processo è regolata dalla concentrazione della soluzione, espressa in termini di molarità [16].

Tuttavia, la scelta della concentrazione richiede un perfetto bilanciamento. Se da un lato un incremento della molarità può stimolare la dissoluzione iniziale, dall'altro un eccesso di alcali non integrato chimicamente può indurre un aumento della porosità capillare del materiale a lungo termine, provocando una flessione delle prestazioni meccaniche della matrice [17]. Questa sovrabbondanza ionica innesca inoltre il

fenomeno delle efflorescenze saline: i cationi di sodio liberi migrano attraverso la soluzione dei pori verso la superficie esterna del materiale, dove reagiscono chimicamente con l'anidride carbonica atmosferica determinando la precipitazione di carbonati idrati di sodio ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) sotto forma di depositi cristallini biancastri [18]. Per limitare la comparsa di queste efflorescenze e contenere l'impatto ambientale legato alla produzione dell'idrossido di sodio tramite il processo cloro-soda [19], la letteratura tecnica recente dimostra l'efficacia dell'adozione di concentrazioni moderate, identificando nella molarità 4M la soglia ottimale per attivare efficacemente i precursori riducendo al minimo la migrazione degli alcali liberi superficiali [20, 21].



Figura 4: Soda Caustica in scaglie (NaOH)

2.4 Formazione dei materiali ad attivazione alcalina

Il consolidamento e lo sviluppo delle proprietà meccaniche dei materiali ad attivazione alcalina discendono da una successione di reazioni chimico-fisiche complesse che convertono la miscela fresca eterogenea in una matrice solida e coesiva [6]. Il processo di attivazione alcalina si sviluppa mediante una sequenza di idrolisi, precipitazione e indurimento di gel idrati simili, dal punto di vista strutturale, ai prodotti di idratazione del cemento tradizionale [11, 6]. La letteratura scientifica suddivide schematicamente questa transizione chimico-fisica in quattro macro-fasi sequenziali:

1. Dissoluzione: l'esposizione del precursore solido all'ambiente fortemente basico della soluzione attivatrice determina l'attacco chimico delle pareti vetrose [6]. Gli ioni ossidrile (OH^-) aggrediscono i legami fessurando le giunzioni silossaniche e alluminiche della polvere amorfa, provocando l'idrolisi e il conseguente rilascio nella fase liquida di specie ioniche monomeriche solubili, rappresentate preminentemente da tetraedri di silicio e alluminio ($[\text{SiO}_4]^{4-}$ e $[\text{AlO}_4]^{5-}$), unitamente a cationi di calcio (Ca^{2+}) liberati dal precursore [6, 22].
2. Diffusione e trasporto ionico: i monomeri allumino-silicatici e i cationi metallici disciolti abbandonano l'interfaccia solida diffondendo all'interno della fase liquida dell'impasto. In questa fase di trasporto cinetico, le specie ioniche libere iniziano a interagire a corto raggio con i cationi alcalini (Na^+) immessi dall'attivatore, strutturando complessi oligomerici intermedi che fungono da nuclei per la successiva fase di crescita macroscopica [23].

3. Formazione del gel: con il progressivo avanzamento della dissoluzione, la concentrazione delle specie oligomeriche nella fase liquida supera la soglia di saturazione termodinamica, innescando reazioni di condensazione intermolecolare [6, 17]. Nei sistemi ricchi in calcio, come quelli basati sulla loppa d'altoforno, il prodotto principale è costituito da un gel di calcio-allumino-silicato idrato (C-A-S-H), caratterizzato da una microstruttura lamellare (foil-like) che garantiscono lo sviluppo delle resistenze [6]. Quando a questo sistema viene aggiunto del cemento Portland (sistemi ibridi), le fasi di idratazione del clinker (che generano gel C-S-H tradizionale) coesistono con la poli-condensazione alcalina della loppa; l'interazione tra queste due differenti cinetiche chimiche può influenzare la porosità finale [12]. Tali gel inorganici non integrano i cationi alcalini (Na^+) in stabili legami covalenti primari, confinandoli debolmente nei canali porosi [18].
4. Indurimento e sviluppo della resistenza: L'accrescimento continuo e l'aggregazione delle fasi gelificate occupano progressivamente lo spazio originariamente occupato dalla fase liquida, andando a interconnettere i granuli residui non dissolti del precursore e lo scheletro solido composto dagli aggregati naturali o riciclati [13, 14]. Questo progressivo consolidamento microstrutturale determina l'indurimento macroscopico del conglomerato, riducendo la porosità capillare e conferendo al materiale le sue definitive proprietà di rigidezza e resistenza meccanica alle sollecitazioni esterne [6, 12].



Figura 5: Schema di formazione dei materiali ad attivazione alcalina

3. MATERIALI

In questo capitolo verranno descritte le materie prime impiegate, la loro caratterizzazione e la metodologia seguita per la preparazione delle miscele ad attivazione alcalina con aggregati di recupero, oggetto della presente ricerca. Nello specifico, saranno analizzate otto diverse formulazioni complessive riconducibili a due macro-tipologie di legante: cinque di queste prevedono l'impiego esclusivo di loppa d'altoforno (GGBFS) come precursore, mentre le restanti tre sono costituite da un sistema ibrido a base di loppa d'altoforno e cemento Portland (CEM I). All'interno di queste formulazioni varierà anche la natura dell'inerte. Per i getti di riferimento verrà impiegata la sabbia Esincalce, mentre per le miscele ecosostenibili si ricorre ad aggregati derivati da materiali ad attivazione alcalina (denominati Sand AAM), ad aggregati di calcestruzzo riciclato (denominati Sand RCA) e a una combinazione di questi ultimi. Infine, come ulteriore termine di paragone per isolare l'effetto della granulometria e della mineralogia dell'inerte sulle proprietà meccaniche, sono state confezionate due miscele di controllo studiando un aggregato dolomitico naturale e un filler carbonatico (CA 400) in sostituzione del riciclato AAM. L'obiettivo è quello di valutare l'efficacia degli aggregati riciclati e di indagarne il comportamento, l'integrazione e le prestazioni all'interno delle diverse composizioni leganti.

3.1 Materiali impiegati

I principali Materiali utilizzati per il confezionamento dei provini oggetto di sperimentazione risultano essere:

- Precursori:

I Precursori utilizzati nelle miscele sono rappresentati dalla loppa d'altoforno (GGBFS) e cemento portland (CEM I)

- Soluzione alcalina:

La soluzione alcalina attivatrice è composta da una soluzione acquosa di NaOH con molarità pari a 4M. La scelta della molarità è stata effettuata in base a studi preliminari condotti presso il dipartimento SIMAU dell'Università Politecnica delle Marche [23] che hanno dimostrato che una concentrazione moderata (4M) sia sufficiente ad attivare i precursori selezionati, limitando i problemi legati alla formazione di efflorescenze.

- Inerti:

Per quanto riguarda gli inerti, lo studio mette a confronto un aggregato naturale e due tipologie di aggregati riciclati. Nelle miscele di riferimento è stata impiegata la sabbia Esincalce 0/8 (figura 5.2), una sabbia calcarea con diametro massimo pari a 8 mm. Per le miscele alternative, è stato impiegato l'inerte derivato dalla frantumazione di matrici ad attivazione alcalina (Sand AAM) realizzate in precedenti sperimentazioni, l'aggregato derivato da calcestruzzo ordinario riciclato (Sand RCA) fornito dal laboratorio e-Lab di Colli del Metauro (PU). Ulteriori miscele sono state preparate con un inerte dolomitico,

ossia una sabbia naturale di natura carbonatica con alta percentuale di magnesio introdotto nella sperimentazione come secondo termine di confronto naturale, una sabbia silicea, un filler calcareo CA 400 prodotto dall'azienda Gola della Rossa Mineraria S.p.A. che ha un contenuto di $\text{CaCO}_3 > 98\%$ e un diametro massimo di $400\ \mu\text{m}$ e infine un ghiaio calcareo. Questi due materiali sono stati utilizzati per effettuare un confronto diretto sulle resistenze a compressione e a flessione rispetto ai getti contenenti l'aggregato riciclato AAM, permettendo di valutare quanto la resistenza del granulo, la sua mineralogia e in particolare l'ottimizzazione della granulometria influenzino le prestazioni finali del materiale.



Figura 6.1 Aggregato Riciclato RCA



Figura 6.2 Aggregato Esincalce



Figura 7.1 Aggregato AAM



Figura 7.2 Aggregato Dolomitico

- Superfluidificante:

Al fine di garantire un'adeguata lavorabilità agli impasti, specialmente in presenza di aggregati riciclati, è stato impiegato un additivo superfluidificante innovativo al 2% in peso del legante prodotto dall'azienda Master Builders Solutions e adatto alle miscele ad attivazione alcalina attivate con NaOH.

3.1.1 Caratterizzazione fisica degli aggregati.

Con lo scopo di determinare le proprietà fisiche degli aggregati, i materiali sono stati sottoposti a una campagna di caratterizzazione in laboratorio. Le prove hanno riguardato la determinazione della curva granulometrica dell'aggregato riciclato proveniente da matrici ad attivazione alcalina, della massa volumica dei granuli e della massa volumica apparente (prova del castelletto) al fine di determinare le condizioni

di superficie satura asciutta (SSA) necessaria affinché l'acqua non vada ad aumentare o ridurre il rapporto acqua/legante.

L'analisi granulometrica per setacciatura viene eseguita in conformità della normativa UNI EN 933-1 con una serie di setacci sovrapposti, con apertura via via decrescente (e pari alla metà di quella sovrastante) dall'alto verso il basso. A questi vanno aggiunti il coperchio e il fondo, necessario per raccogliere la frazione di materiale passante all'ultimo setaccio. Il campione da testare si inserisce all'interno del setaccio di sommità che viene poi chiuso con il coperchio e sigillato con del nastro adesivo per evitare che la parte fina fuoriesca durante la prova. La pila di setacci viene fatta oscillare in modo che i granuli vengano separati e trattenuti nei setacci corrispondenti alle dimensioni degli aggregati. La scelta dell'apertura del primo setaccio viene effettuata con una stima visiva del diametro massimo del campione da analizzare, con l'obiettivo di non trattenere materiale. I setacci seguenti vengono scelti dimezzando l'apertura fino ad arrivare al setaccio di dimensioni 0,063 mm come visibile in figura 8. La procedura prevede che ogni setaccio vuoto venga pesato (tara) prima di essere impilato sopra gli altri.



Figura 8: Macchina setacciatrice



Figura 9: Pila di setacci

Una volta completata la pila di setacci (Figura 9), immesso il campione nel primo setaccio e chiuso con il coperchio, questa viene posizionata all'interno della setacciatrice (Figura 8). Si aziona la macchina e la durata di ogni ciclo di setacciatura è di dieci minuti per ogni campione. Decorso il tempo della prova, i setacci con all'interno il materiale trattenuto vengono pesati nuovamente (peso lordo, Pl). La determinazione della curva granulometrica del campione analizzato si ottiene detraendo da ogni peso lordo dei setacci la tara corrispondente, ricavando il peso del materiale trattenuto (peso netto, Pn) per ogni frazione. Al fine di agevolare il confronto tra le diverse tipologie di inerte impiegate, i risultati delle analisi granulometriche condotte sugli aggregati riciclati (Sand AAM e Sand RCA) e sull'aggregato naturale dolomitico sono stati unificati assieme alla frazione di filler calcareo (CA400) e ghiaino calcareo. Nella Tabella 1 sono riportate le percentuali di passante cumulativo

in funzione del diametro dei setacci per ciascun materiale testato. Grazie a questa prova possiamo costruire la curva granulometrica che è un requisito fondamentale, poiché la geometria dei granuli derivati da frantumazione influenza direttamente la richiesta d'acqua della miscela.

Tabella 1: Passanti cumulativi Prova Granulometrica

APERTURA SETACCIO [mm]	PASSANTI CUMULATIVI [%]					
	Sand AAM	Sabbia silicea	Aggregato Dolomitico	Sand Esincalce	Ghiaino calcareo	CA400
16	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
8	96,99	100,00	100,00	100,00	99,87	100,00
4	71,77	99,99	99,92	92,91	36,52	100,00
2	44,87	99,91	41,63	65,70	5,88	100,00
1	25,33	99,86	1,91	40,87	3,04	100,00
0,5	13,46	93,26	0,45	21,00	2,48	100,00
0,25	7,24	19,31	0,30	9,30	2,28	75,00
0,125	3,28	1,96	0,20	1,93	0,86	42,00
0,063	1,68	0,89	0,11	0,32	0,18	25,00
Fondo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

A partire dai dati numerici sopra esposti, è stato elaborato il grafico comparativo delle curve granulometriche riportato in figura 10 espresso in scala semi-logaritmica per evidenziare il comportamento sia delle frazioni fini che di quelle più grossolane.

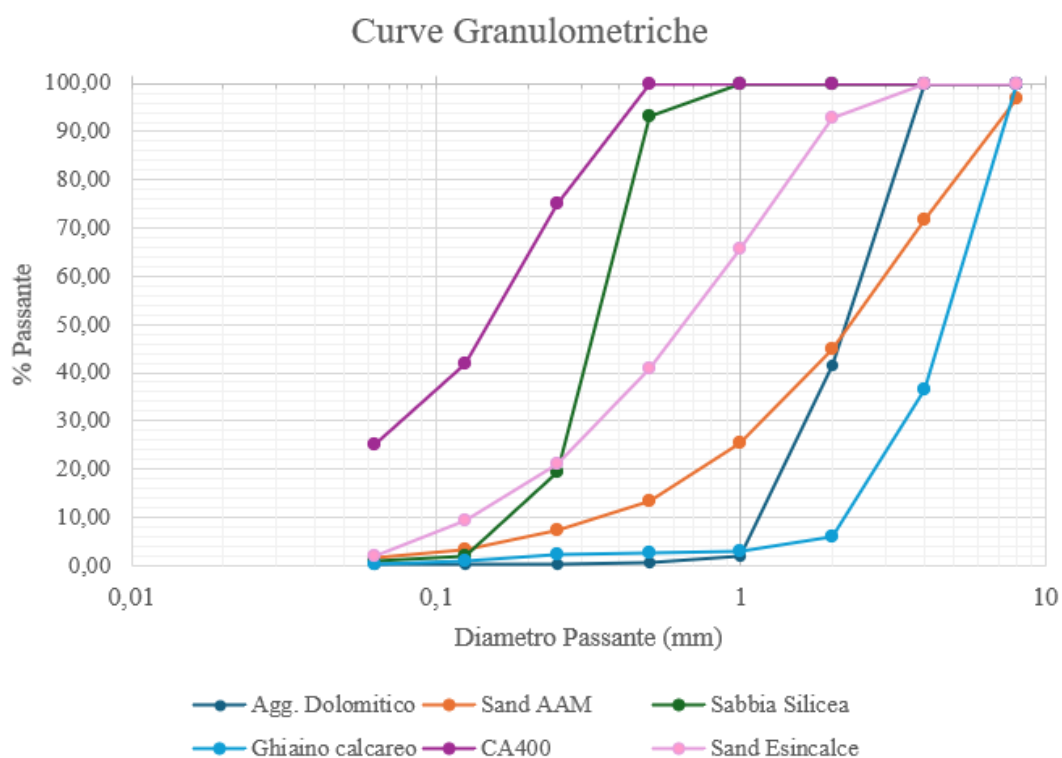


Figura 10: Andamento comparativo delle curve granulometriche dei materiali.

Dall'analisi visiva e analitica delle curve è possibile tracciare le seguenti considerazioni sulle caratteristiche geometriche dei materiali:

- Sand AAM: mostra un andamento continuo e ben distribuito lungo tutto lo spettro dimensionale indagato, configurandosi come un aggregato ben graduato con un diametro massimo effettivo prossimo agli 8 mm.
- Sand Esincalce: evidenzia una granulometria fortemente concentrata nelle frazioni fini. Il passante a 0,5 mm è pari al 93,26%, per poi subire un drastico abbattimento al setaccio da 0,25 mm (19,31%), qualificandosi come una sabbia fine molto uniforme.
- Aggregato Dolomitico: presenta una curva spiccatamente retta e selettiva nella transizione tra i setacci di 4 mm (99,92% di passante) e 2 mm (41,63%), per

poi azzerarsi quasi completamente sotto il millimetro (1,91%). Si tratta di una frazione granulare concentrata nella fascia medio-grossolana delle sabbie.

- Ghiaino calcareo: costituisce l'elemento a dimensionalità maggiore dell'intera campagna sperimentale, con un trattenuto significativo già al setaccio di 4 mm (passante del 36,52%) e un quasi totale azzeramento al setaccio di 2 mm (5,88%), rappresentando la componente ideale per strutturare lo scheletro macroscopico degli impasti.
- Frazione CA400: si posiziona nella porzione più a sinistra del grafico, confermando la natura di materiali fillerizzati. Nello specifico, il CA400 conserva il 25 % di passante al setaccio limite di 0,063 mm.

La densità dei materiali impiegati è stata misurata con il metodo del picnometro, usando al posto del picnometro un cilindro graduato.

Di seguito viene riportato il procedimento eseguito per effettuare la prova.

1. È stata essiccata la porzione di prova in stufa a 110 ± 5 °C fino al raggiungimento della massa costante, dopodiché è stata lasciata raffreddare a temperatura ambiente.
2. Il cilindro è stato lavato, accuratamente asciugato e pesato (M_0).
3. Dopo aver aggiunto l'acqua all'interno del cilindro, è stato posato sulla bilancia e, tarata quest'ultima, è stata successivamente aggiunta la porzione di materiale testato e ne è stata registrata la massa (M_1).
4. La porzione di prova non dovrebbe occupare più di un terzo del volume del cilindro, per questo si è aggiunta acqua fino al limite del cilindro graduato e

con l'aiuto di una bacchetta sono state eliminate le bolle d'aria rimaste intrappolate.

5. Dopo aver eliminato il vuoto, il cilindro è stato immerso in un bagno d'acqua per un'ora per stabilizzare la temperatura dell'acqua.
6. Dopo aver asciugato esternamente il cilindro, con il suo contenuto, ne è stata misurata la massa (M_2).
7. Per determinare il volume del cilindro, è stato pulito, asciugato, riempito d'acqua fino al livello massimo e pesato (M_3).

Per calcolare la massa volumica dei granuli viene utilizzata la seguente equazione:

$$\rho = \frac{M_1}{\frac{M_3}{\rho_w} - \frac{(M_2 - M_1 - M_0)}{\rho_w}}$$

Dove:

ρ_w è la massa volumica dell'acqua (Mg/m^3);

M_0 è la massa del cilindro (g);

M_1 è la massa della porzione di prova (g);

M_2 è la massa del cilindro, campione di prova ed acqua (g);

M_3 è la massa dell'acqua che riempie il cilindro (g).

Di seguito vengono riportati i calcoli effettuati per arrivare alla misura della densità dei materiali esaminati.

Tabella 2: Massa Volumica Sand AAM

MASSA VOLUMICA Sand A.A.M.					
Volume (mL)	2000	1000	500	T° H2O (°C)19,5 Massa Volumica H2O (Mg/m³)0,99832	
	Peso (g)				
Cilindro	402,39	200,19	167,68		
Cilindro + H2O	2400,42	1174,81	672,18		
Peso netto aggregato	853,96	439,06	227,89		
Peso cilindro + Aggregato + H2O	2910,49	1436,65	809,38		
Volume Picnometro (mL)	2001,39	976,26	505,35		
Massa volumica aggregati (Mg/m³)	2,48	2,47	2,51	media	2,49

Tabella 3: Massa volumica Sabbia Silicea

MASSA VOLUMICA Sabbia Silicea					
Volume (mL)	1000	500	250	T° H2O (°C) 28,5 Massa Volumica H2O (Mg/m³) 0,99615	
	Peso (g)				
Cilindro	200,28	131,42	86,97		
Cilindro + H2O	1175,20	624,80	334,00		
Peso netto aggregato	502,29	283,44	129,19		
Peso cilindro + Aggregato + H2O	1493,12	804,42	415,94		
Volume Picnometro (mL)	978,69	495,29	247,98		
Massa volumica aggregati (Mg/m³)	2,71	2,72	2,72		

Tabella 4: Massa volumica Aggregato Dolomitico

MASSA VOLUMICA Aggregato Dolomitico								
Volume (mL)	2000	1000	500	250	250	T° H2O (°C) 26,5 Massa Volumica H2O (Mg/m³) 0,99665		
	Peso (g)							
Cilindro	402,20	200,08	167,52	85,34	86,92			
Cilindro + H2O	2400,91	1173,29	669,37	331,70	332,41			
Peso netto aggregato	931,05	389,40	222,59	98,70	104,43			
Peso cilindro + Aggregato + H2O	2965,51	1409,16	808,92	390,98	396,34			
Volume Picnometro (mL)	2005,43	976,48	503,54	247,19	246,32			
Massa volumica aggregati (Mg/m³)	2,53	2,53	2,67	2,50	2,57			
							media	2,53

L'aggregato può assorbire acqua all'interno dei suoi pori e sulla sua superficie ed è detto asciutto o insaturo quando i suoi pori aperti sono rispettivamente asciutti o non completamente riempiti d'acqua. È bagnato quando, oltre ad avere i pori

completamenti pieni d'acqua, ha anche la superficie bagnata. Una condizione molto importante è quella di saturo a superficie asciutta (ssa) che si ha quando i suoi pori aperti sono completamente pieni di acqua mentre la superficie è asciutta. Questa è la condizione necessaria per l'aggregato quando viene introdotto nell'impasto del calcestruzzo, evitando così che assorba acqua d'impasto se troppo asciutto o, viceversa, che ceda acqua all'impasto se completamente saturo. Il contenuto d'acqua in percentuale riferito alla massa secca dell'aggregato viene chiamata umidità e quella che individua la condizione di ssa è detto assorbimento. Esso dipende dalla porosità dell'aggregato. Sapere l'effettiva quantità di acqua presente nell'aggregato al momento del confezionamento del calcestruzzo è necessario per procedere al calcolo della quantità d'acqua da aggiungere all'impasto. Infatti, le ricette vengono formulate con riferimento alla condizione ssa degli aggregati.

Per calcolare la densità ssa è stato seguito il seguente procedimento: la porzione di prova è stata immersa nell'acqua contenuta nel cilindro a $22 \pm 3^\circ\text{C}$ ed è stata rimossa l'aria intrappolata. Il picnometro è stato posto nel bagno d'acqua e la porzione di prova è stata mantenuta alla temperatura di $22 \pm 3^\circ\text{C}$ per circa 24 ore. Al termine del periodo di immersione il picnometro è stato estratto dal bagno d'acqua e, eliminate le bolle d'aria rimaste intrappolate, il picnometro è stato riempito con acqua fino al livello massimo. Il picnometro a questo punto viene asciugato esternamente e pesato (M_2). L'aggregato è stato tolto dall'acqua e lasciato scolare per alcuni minuti. Il picnometro è stato riempito d'acqua e pesato (M_3). La porzione di aggregato viene trasferita su un panno asciutto. L'aggregato viene lasciato ad asciugare steso su un panno asciutto in uno strato di spessore pari ad un granulo di aggregato, esposto all'aria e lontano dai raggi solari diretti o da altre fonti di calore fino a che ogni visibile film d'acqua fosse

scomparso pur conservando un aspetto umido dell'aggregato. A questo punto l'aggregato viene pesato (M_1). In seguito, viene posto ad essiccare all'interno di un forno a 110 ± 5 °C fino al raggiungimento della massa costante, è stato poi lasciato raffreddare a temperatura ambiente e ripeso (M_4).

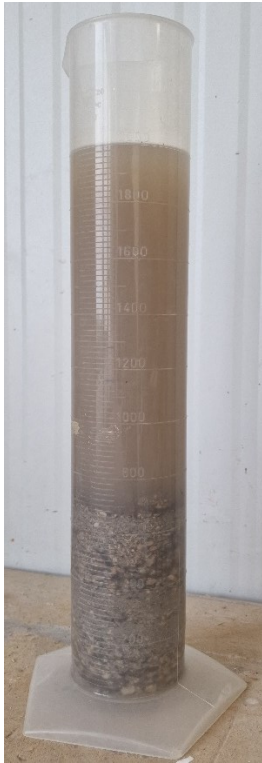


Figura 11.1 Cilindro graduato



Figura 11.2 Determinazione SSA dell'aggregato AAM



Figura 12: Determinazione SSA dell'aggregato Dolomitico

Per quanto riguarda la condizione di satura a superficie asciutta della sabbia invece è stata utilizzata la prova del castelletto come da normativa UNI EN 1097-6. È stato riempito uno stampino con un campione di materiale che successivamente viene sfilato. Se il cono di aggregato non crolla la sabbia non ha ancora raggiunto la situazione ssa. In campione viene essiccato e la procedura viene ripetuta finché, togliendo lo stampino, si mostra come una piramide.

Tabella 5: Prova del castelletto della sabbia silicea

PROVA DEL CASTELLETTO sabbia silicea 0-8 mm								
	Pesi (g)							
Prove	A 1	B 2	C 3			A 1	B 2	C 3
Vasca	12,71	12,7	12,7					
Vasca + Cono	14,91	14,94	14,94					
Vasca + Cono + Cucchiaino	58,81	58,8	58,8					
Vasca + Cono + Cucchiaino + <u>Aggregato Secco</u>	408,47	367,32	371,13		aggregato secco	349,66	308,52	312,33
Vasca + Cono + Cucchiaino + <u>Aggregato + H2O</u>	412,3	369,98	373,94		aggregato saturo	353,49	311,18	315,14
					% H2O assorbita	1,10	0,86	0,90
					media	0,95		



Figura 13: Prova del castelletto sabbia silicea

3.2 Mix design

Il progetto della miscela chiamato mix design si riferisce al processo di definizione ed ottimizzazione delle proporzioni dei componenti della miscela per un determinato materiale da costruzione.

Nella presente sperimentazione, i mix design adottati sono risultati di un processo di ottimizzazione sperimentale derivato da un'attività precedente di ricerca del Dipartimento SIMAU dell'Università Politecnica delle Marche. Sono state utilizzate prove di caratterizzazione fisica e meccanica su diversi precursori e attivatori al fine di valutare le combinazioni più efficaci in termini di lavorabilità e resistenza.

Sono state sviluppate inizialmente sei formulazioni che possono essere strutturate in due macro-tipologie di miscele, una utilizzando il 100% di GGBFS come precursore, l'altra utilizzando invece un mix formato dal 90% di GGBFS e il restante 10% da CEM I. In ogni tipologia saranno studiate tre diverse miscele di aggregati, una come riferimento formata da 100% di aggregato Esincalce (Sand Esincalce), un'altra sarà effettuata utilizzando il solo aggregato riciclato proveniente da matrici ad attivazione alcalina (Sand A.A.M.) sostituito a pari volume alla Sand Esincalce ed infine una miscela composta dal 50% di Sand A.A.M. e il restante 50% in peso da aggregato riciclato da calcestruzzi (Sand R.C.A.), sempre tenendo conto della sostituzione al 100% in volume dell'aggregato Sand Esincalce.

A seguito di queste sei formulazioni, sono state studiate, al fine di confrontare le resistenze meccaniche dei provini, altre due miscele a base di GGBFS attivata alcalinamente sostituendo la Sand Esincalce con aggregato dolomitico, filler calcareo CA400, ghiaino calcareo e sabbia silicea.

Per stabilire le quantità di aggregati da utilizzare per le ultime due miscele (Getto A e Getto B) sono state sviluppate delle curve granulometriche seguendo quella ideale di Bolomey utilizzando il metodo grafico che consiste nel trovare le percentuali di combinazione con cui miscelare gli inerti affinché la curva risultante si avvicini il più possibile a quella ideale di Bolomey.

Tabella 6: Costruzione della curva ideale di Bolomey Getto A

	SabbiaSilicea	Aggr.Dolomitico	CA400	Fuller e Thompson	Bolomey
Setacci	Passante	Passante	Passante	Passante	Passante
μm	%	%	%	%	%
4000	100	100	100	100,00	100,00
2000	100	42	100	70,71	74,23
1000	100	2	100	50,00	56,00
500	93	0	100	35,36	43,11
250	19	0	75	25,00	34,00
125	2	0	42	17,68	27,56
63	1	0	25	12,55	23,04
Fondo	0	0	0	0,00	0,00

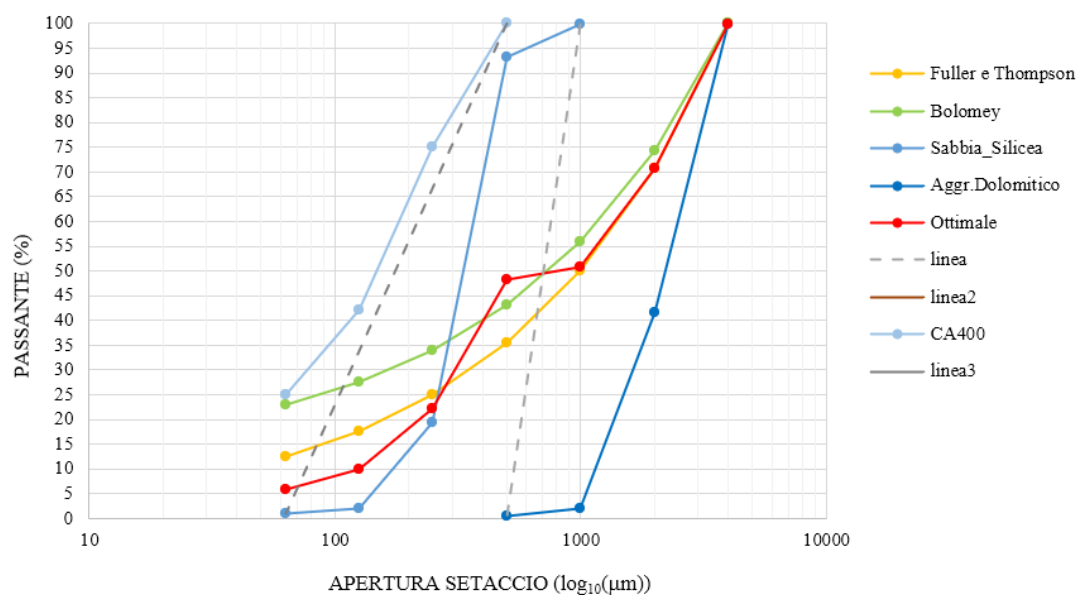


Figura 14: Curva ideale Bolomey Getto A

Tabella 7: Costruzione della curva ideale Bolomey Getto B

	SabbiaSilicea	Aggr.Dolomitico	Ghiaino calcareo	CA400	Fuller e Thompson	Bolomey
Setacci	Passante	Passante	Passante	Passante	Passante	Passante
μm	%	%	%	%	%	%
8000	100	100	100	100	100,00	100,00
4000	100	100	37	100	70,71	74,23
2000	100	42	6	100	50,00	56,00
1000	100	2	0	100	35,36	43,11
500	93	0	0	100	25,00	34,00
250	19	0	0	75	17,68	27,56
125	2	0	0	42	12,50	23,00
63	1	0	0	25	8,87	19,81
Fondo	0	0	0	0	0,00	0,00

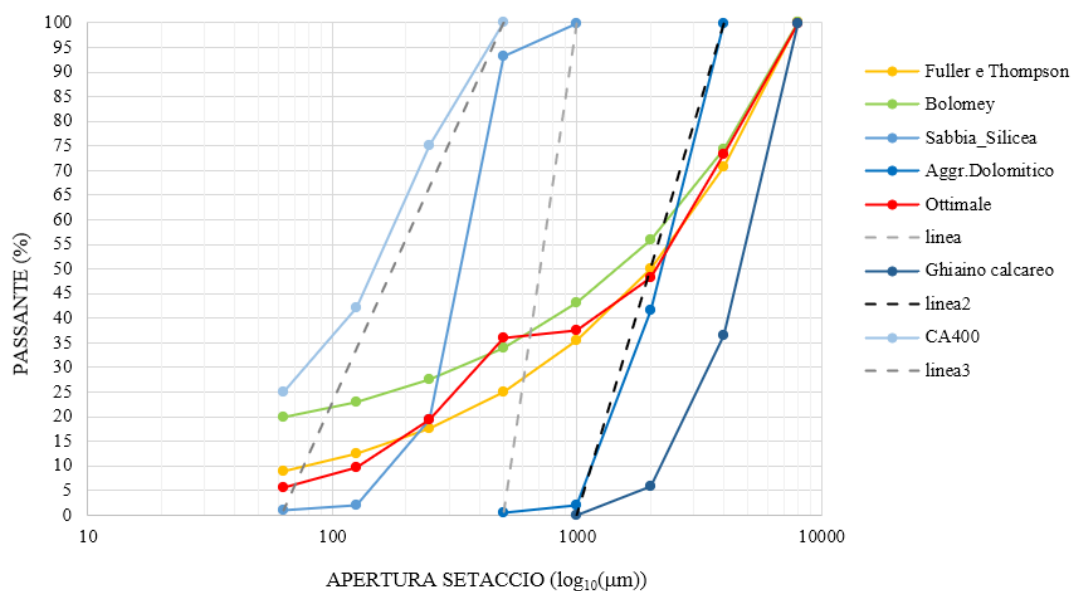


Figura 15: curva ideale Bolomey Getto B

Come attivatore alcalino sarà utilizzata una soluzione acquosa di idrossido di sodio (NaOH) con concentrazione 4 molare.

Infine, per migliorare le caratteristiche di lavorabilità del getto verrà utilizzato un superfluidificante (SP) al 2% in peso sul legante. Di seguito nella tabella 8, si riportano le miscele, riferite ad un litro di getto, utilizzate nello studio con la quantità d'acqua necessaria ad ogni inerte affinché venga raggiunta la condizione ssa.

Tabella 8: (sinistra) Mix Design Getto 0 - Getto 5; (destra) Mix Design Getto A e B

MIXTURES NaOH 4M w/s = 0.33													
Getto	Mixture	Mixture	GGBFS [g]	CEM I [g]	NaOH [g]	WATER [g]	DRY SAND [g]	WATER [g]	S.S.A. SAND Esincalee	DRY SAND [g]	WATER [g]	S.S.A. SAND AAM	SP [g]
0	100% Loppa - 20% acqua NaOH 4M + 2% SF	REF 100/0 - 100/0/0	579	0	32	199	1469	81	0	0	0	0	12
1	100% Loppa - 20% acqua NaOH 4M + 2% SF 100	100/0 - 0/100/0	579	0	32	199	0	0	1325	131	0	0	12
2	100% Loppa - 20% acqua NaOH 4M + 2% SF 50/50	100/0 - 0/50/50	579	0	32	199	0	0	662	66	668	77	12
3	90% Loppa - 20% acqua NaOH 4M + 2% SF	REF 90/10 - 100/0/0	525	58	32	200	1469	81	0	0	0	0	12
4	90% Loppa - 20% acqua NaOH 4M + 2% SF 100	90/10 - 0/100/0	525	58	32	200	0	0	1325	131	0	0	12
5	90% Loppa - 20% acqua NaOH 4M + 2% SF 100	90/10 - 0/50/50	525	58	32	200	0	0	662	66	668	77	12

MIXTURES NaOH 4M w/s = 0.33 1 LITER													
Mixture	GGBFS	NaOH SOLUTION	S.S.D. SILICEOUS SAND			S.S.D. DOLOMITIC			S.S.D. calcareous gravel			S.S.D. CA400	SP
		NaOH [g]	WATER [g]	DRY AGGR [g]	WATER [g]	DRY AGGR [g]	WATER [g]	DRY AGGR [g]	WATER [g]	DRY AGGR [g]	WATER [g]	DRY AGGR [g]	WATER [g]
A	579	32	199	236	441	301	10	632	19	331	10	331	10
B	579	32	199	236	441	717	23	0	0	331	10	331	10

Un aspetto fondamentale nella fase di progettazione della miscela è rappresentato dal rapporto in peso tra fase liquida e fase solida (w/s), in quanto incide in maniera determinante sulle caratteristiche reologiche della miscela, sullo sviluppo della microstruttura porosa e, sulle proprietà meccaniche finali del materiale. L'aumento del contenuto d'acqua a parità delle altre componenti nel mix design, porta a una diminuzione della resistenza, soprattutto a compressione. L'acqua non reagita, ovvero quella che non partecipa al processo di idratazione, una volta completato il processo di stagionatura evapora lasciando dei vuoti. Al contrario un w/s troppo basso può comportare perdite di resistenza meccanica poiché non c'è acqua sufficiente per ottenere una buona lavorabilità, compromettendo la fase di getto con conseguente intrappolamento d'aria nel composto indurito, o per far avvenire correttamente la reazione di polimerizzazione.

3.3 Preparazione dei provini

Il presente capitolo descrive le fasi operative necessarie a realizzare i provini attivati alcalinamente. Per prima cosa verrà illustrata la scelta dei casseri motivando i criteri adottati per la loro selezione. Successivamente verrà indicata la sequenza di operazioni effettuate per la preparazione degli impasti, tra cui la prova di spandimento finalizzata a valutare la lavorabilità delle miscele. Infine, verranno descritte le fasi di getto, disarmo e stagionatura, evidenziando il ruolo cruciale nella produzione di provini conformi e rappresentativi dal punto di vista qualitativo.

3.3.1 Casseri

Al fine di garantire la stabilità del getto durante la formatura e preservare i provini durante la fase di scasseratura erano disponibili due tipologie di casseri in plastica o in acciaio. Per la realizzazione dei provini si è preferito scegliere i casseri d'acciaio di dimensioni standard 40 mm x 40 mm x 160 mm, perché nella fase di scasseratura, se fossero stati utilizzati i provini in plastica, con l'espulsione forzata da un getto d'aria compressa si sarebbe rischiato di esercitare sollecitazioni meccaniche non trascurabili sui provini, i quali, dopo soli due giorni di stagionatura avrebbero potuto avere una resistenza meccanica non sufficiente a garantirne l'integrità. I casseri in acciaio utilizzati possono essere smontati completamente attorno al provino, evitando l'applicazione di forze dirette che potrebbero compromettere il materiale. Tuttavia, l'utilizzo dei casseri metallici è problematico in fase di estrazione dei provini ad attivazione alcalina, in quanto anche se viene utilizzato il disarmante, rimangono aderenti alle pareti del cassero.



Figura 16: Casseri in acciaio rivestiti con nastro adesivo

3.3.2 Confezionamento degli impasti

In questo sottocapitolo, saranno illustrate le fasi operative seguite per la produzione degli impasti finalizzati al confezionamento dei provini di materiale attivato alcalinamente.

Le miscele degli impasti, con le relative quantità dei componenti da utilizzare sono state specificate nelle Tabelle 8 del capitolo 3.2 precedentemente presentato. La prima fase del progetto di produzione degli impasti è la preparazione delle soluzioni alcaline. Seguendo accuratamente la quantità di idrossido di sodio (NaOH) prevista dal mix design, questa, viene riposta in un contenitore dotato di contro-tappo e tappo a vite. Successivamente, dopo aver pesato la quantità necessaria di acqua, viene versata direttamente nel contenitore contenente l'idrossido di sodio. La dissoluzione della soda caustica in acqua fa avvenire una reazione fortemente esotermica, per questo, per contenere l'aumento di temperatura, tutti i contenitori sono stati collocati all'interno di un recipiente con del ghiaccio per evitare che la soluzione raggiungesse eccessive temperature. Una volta che l'idrossido di sodio è completamente disciolto e la soluzione si è raffreddata, è possibile utilizzarla per la preparazione degli impasti. Il ritorno a temperatura ambiente richiede qualche ora, per questo, le soluzioni attivatrici vengono preparate il giorno precedente rispetto ai getti e lasciate riposare fino al completo raffreddamento. Dopo aver preparato le soluzioni attivatrici, si procede con la pesatura del precursore utilizzato la loppa d'altoforno (GGBFS), seguendo i dati del mix design. Successivamente vengono pesati i rispettivi inerti per ogni miscela, e mescolati con la dose di acqua necessaria a renderli saturi a superficie asciutta (ssa). La loppa e gli inerti vengono trasferiti all'interno di un recipiente e miscelati

accuratamente per eliminare eventuali grumi e rendere la miscela omogenea. All'impasto a questo punto viene aggiunta la soluzione attivatrice mescolando con il trapano miscelatore ed infine il superfluidificante continuando a miscelare abbondantemente fino ad avere un impasto avente una consistenza omogenea. L'impasto pronto per essere gettato nei casseri viene prima sottoposto alla prova di spandimento per verificare la lavorabilità ottenuta.

3.3.3 Prova di spandimento

Prima della realizzazione dei provini, le miscele sono state sottoposte alla prova di spandimento per determinarne la consistenza, seguendo le procedure della norma UNI EN 1015-3 *“Metodi di prova per malte per opere murarie – Parte 3: Determinazione della consistenza della malta fresca”*. La prova si sviluppa misurando il diametro di spandimento di ogni impasto, conferito all'interno di uno stampo troncoconico di dimensioni standard, dopo 15 colpi assestanti dati da un macchinario normato chiamato tavola a scosse (Figura 17).

Come descritto nell'appendice A della norma, la macchina è composta da: un supporto per la stabilizzazione, da un albero orizzontale e una camma di sollevamento, da un'asta mobile di sollevamento e da un piatto rigido poggiato su un disco girevole.



Figura 17: Macchina tavola a scosse per prova di spandimento

Lo stampo troncoconico in bronzo ha dimensioni standardizzate: altezza 60 mm, diametro alla base 100 mm e diametro in sommità pari a 70 mm. La superficie interna e i bordi sono completamente lisci. Lo spessore minimo della parete dello stampo è di 14 mm.

Segue la descrizione della procedura di esecuzione della prova.

1. Posizionare lo stampo al centro del disco della tavola a scosse;
2. Introdurre la malta in due strati, ciascuno dei quali assestati da dieci colpi di pestello,
3. Rimuovere l'eccesso della malta che fuoriesce dalla sommità dello stampo, grazie all'aiuto di una spatola,

4. Dopo circa 15 secondi sollevare lentamente lo stampo in direzione verticale,
5. Azionare la tavola a scosse e aspettare che effettui 15 colpi con frequenza costante,
6. Misurare il diametro della malta nelle due direzioni perpendicolari tra loro.

Il diametro che caratterizza la consistenza della malta è il valore medio delle due misure, riportate in millimetri (D_m). Attraverso la tabella seguente è possibile ricavare la classe di consistenza della malta secondo la norma UNI EN 1015-3:2007.

Tabella 9: Classi di consistenza delle malte secondo la norma UNI EN 1015-3:2007

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



Figura 18: Slump test Getto 0



Figura 19: Slump test Getto 3



Figura 20: Slump test Getto A



Figura 21: Slump test Getto B

Tabella 10: Risultati completi Slump test

tipo	Spandimento			Consistenza all'atto
	D ₁ [mm]	D ₂ [mm]	D _m [mm]	
Getto 0	186	187	186,5	Plastica
Getto 1	100	105	102,5	Rigida
Getto 2	166	170	168	Plastica
Getto 3	172	150	161	Plastica
Getto 4	106	106	106	Rigida
Getto 5	118	120	119	Rigida
Getto A	175	176	175,5	Plastica
Getto B	98	100	99	Rigida

3.3.4 Getto e scasseratura

Una volta determinata la classe di consistenza dell'impasto, si procede al getto nei casseri. La procedura di colatura viene eseguita in conformità a quanto indicato nel Prospetto 1 della norma UNI EN 1015-11:2007 "*Metodi di prova per malte per opere murarie*", in vista dell'esecuzione delle successive prove meccaniche. Una volta riempiti i casseri, questi vengono vibrati velocemente su un tavolo vibrante per garantire una corretta distribuzione omogenea del materiale ed evitare la formazione di bolle d'aria o vuoti all'interno dei provini. Al termine l'impasto in eccesso viene rimosso con l'aiuto di una spatola, livellando la superficie della malta a filo della parete superiore dello stampo, cosicché venga garantita l'uniformità geometrica del provino. Al termine del getto, i casseri riempiti vengono rivestiti con una pellicola plastica, nominati, e successivamente trasferiti in una camera climatica per la fase di manutenzione. All'interno della camera climatica i provini sono mantenuti a temperatura controllata di 20 °C e umidità relativa del 50%. L'impiego della pellicola associata alle condizioni della camera climatica, consentono di evitare l'evaporazione dell'acqua e di prevenire quindi la formazione di efflorescenze saline sulla superficie dei provini. Il mantenimento del livello di umidità e temperatura favorisce una corretta evoluzione delle reazioni di idratazione, con effetti positivi sullo sviluppo della resistenza meccanica ma anche sulla durabilità del materiale. Queste condizioni contribuiscono al raggiungimento delle migliori prestazioni fisico-meccaniche dei provini.

La rimozione dei provini dai casseri avviene dopo 48 ore dal getto. Avendo utilizzato casseri in acciaio, si procede con lo smontaggio dei vari componenti dello stesso e la limatura dei bordi del provino in modo da rendere ogni faccia del provino liscia.

Una volta estratti dai casseri, i provini vengono rivestiti con pellicola, etichettati e ricollocati nella camera climatica per far proseguire la maturazione fino al momento delle prove meccaniche. I primi sette giorni dal getto i provini saranno avvolti dalla pellicola, mentre i restanti giorni i provini saranno lasciati stagionare senza pellicola. La fase di rottura dei provini verrà condotta secondo le modalità descritte nel capitolo successivo del presente studio.

3.3.5 Catalogazione dei provini

Al fine di valutare le proprietà meccaniche delle matrici attivate alcalinamente, sono stati realizzati provini prismatici di dimensioni $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$, utilizzando le otto miscele sperimentali viste in precedenza.

Per le prime sei miscele (dal Getto 0 al Getto 5) sono stati prodotti otto provini per tipologie di miscele, destinati alla determinazione della resistenza a flessione e a compressione a 2, 7, 28 e 90 giorni dal getto, per avere un andamento delle resistenze a rottura nel tempo.

Nelle ultime due miscele (Getto A e Getto B), invece, sono stati prodotti quattro provini per ciascuna miscela al fine di determinare le resistenze a flessione e a compressione a 28 e 90 giorni dal getto.

I provini sono stati identificati mediante una nomenclatura alfanumerica secondo il seguente schema:

- Nome della miscela di appartenenza (0, 1, 2, 3, 4, 5, A, B)
- Lettera identificativa del provino (A e B)
- Sigla del tempo trascorso dal getto per le prove di compressione e flessione (2d, 7d, 28d, 90d).

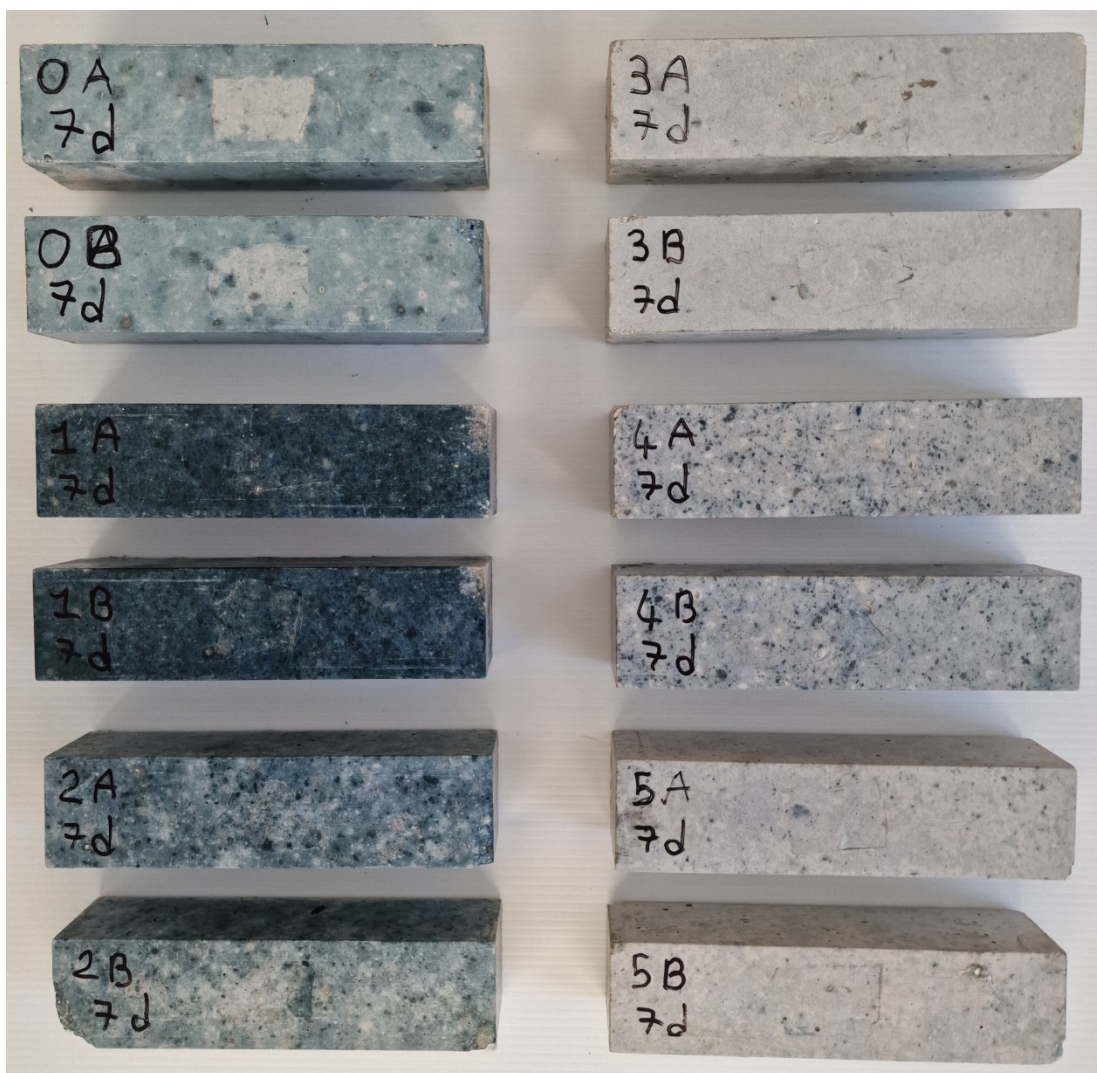


Figura 22: Provini prismatici catalogati per prove meccaniche a 7 giorni di stagionatura

4. PROVE SULLE MALTE INDURITE

Nel seguente capitolo verranno raccolte e descritte le prove sperimentali effettuate sulle malte indurite realizzate a partire dalle miscele ad attivazione alcalina introdotte nei capitoli precedenti. I provini testati sono stati sottoposti a prove finalizzate alla caratterizzazione del comportamento meccanico e a prove fisico-chimiche.

4.1 Determinazione della massa volumica

Al fine di valutare la variazione della compattezza dei materiali in funzione del tempo di maturazione, si è proceduto alla determinazione sistematica della massa volumica dei provini prismatici aventi geometria standard pari a $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$. Tale indagine di tipo non distruttivo è stata eseguita su tutti i campioni realizzati, prima che questi venissero sottoposti alle prove meccaniche distruttive di flessione e di compressione.

La procedura di misura ha previsto le seguenti fasi operative:

- Rilevazione della massa: il peso (m) di ciascun elemento è stato misurato posizionando direttamente il provino sul piatto di una bilancia elettronica di precisione modello “KERN PCD” (Sinergica Soluzioni), caratterizzata da una risoluzione centesimale pari a 0,01 g.
- Calcolo della massa volumica: i valori di massa così ottenuti sono stati successivamente rapportati al volume geometrico nominale del prisma, corrispondente a 256 cm^3 .

La massa volumica (ρ), espressa in g/cm³ è stata pertanto calcolata applicando la seguente formula:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Questo monitoraggio preliminare ha permesso di tracciare l'evoluzione della densità interna del materiale in esame, fornendo un parametro fondamentale per interpretare e correlare il grado di compattazione dei diversi impasti con le rispettive risposte resistenti alle sollecitazioni meccaniche di rottura.

4.2 Prove di caratterizzazione meccanica

La valutazione delle proprietà meccaniche dei provini confezionati è stata effettuata mediante prove di rottura a flessione e a compressione assiale eseguite a 2, 7, 28 e 90 giorni. La pianificazione di questa finestra temporale risponde alla necessità di mappare in modo accurato lo sviluppo delle prestazioni del materiale, consentendo di monitorare sia il comportamento alle brevissime stagionature (2 e 7 giorni), sia il consolidamento delle proprietà nel medio e lungo termine (28 e 90 giorni).

Nel panorama scientifico dei leganti strutturali sostenibili, l'esecuzione di test meccanici distruttivi a intervalli seriali rappresenta uno degli approcci metodologici più consolidati e affidabili. Tali prove costituiscono uno dei metodi più diffusi per stimare indirettamente il grado di attivazione delle matrici alcaline [24].

4.2.1 Prova di flessione

La determinazione della resistenza a flessione delle malte ad attivazione alcalina e dei sistemi ibridi è stata eseguita tramite la classica configurazione di prova su tre punti. L'indagine sperimentale è stata condotta in stretta osservanza delle prescrizioni metodologiche dettate dalla normativa UNI EN 1015-11, intitolata “*Metodi di prova per malte per opere murarie – Parte 11: Determinazione della resistenza a flessione e a compressione della malta indurita*”. Le prove di rottura hanno interessato i provini prismatici aventi dimensioni standard. Per tracciare in modo accurato lo sviluppo evolutivo delle prestazioni meccaniche nel tempo, i campioni sono stati testati sistematicamente al raggiungimento di quattro scadenze cronologiche di stagionatura: 2, 7, 28 e 90 giorni.

Dal punto di vista della strumentazione di laboratorio, i test sono stati eseguiti impiegando la macchina bi-camera automatica per prove di compressione e flessione Matest E183N (con capacità di carico pari a 300/15 kN), equipaggiata con il sistema di controllo computerizzato ad alta precisione Servo-plus progress. Questa attrezzatura consente l'applicazione della sollecitazione in modalità automatica e a carico controllato, sfruttando tre rulli di contatto disposti geometricamente sul provino: due supporti collocati alle estremità inferiori e uno superiore che trasmette il carico concentrato esattamente nella mezzeria del prisma.

Il software di gestione integrato ha registrato in tempo reale l'evoluzione della forza applicata fino all'istante di collasso del materiale. I dati di carico massimo ricavati al termine di ciascuna prova sono stati successivamente elaborati per calcolare la

tensione limite di rottura a flessione (R_f) espressa in MPa (N/mm^2) del singolo provino mediante l'applicazione della seguente formula analitica:

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

Dove:

- F è il carico massimo applicato registrato al momento della rottura [N];
- l rappresenta la distanza tra i rulli di supporto inferiori, pari a 100 [mm];
- b e d costituiscono, rispettivamente, la larghezza e l'altezza della sezione trasversale retta del provino geometrico [mm].



Figura 23: Prova a Flessione



Figura 24: Monconi di provini prismatici a seguito della prova di flessione

4.2.2 Prova di compressione

I due frammenti risultanti dalla precedente prova di flessione a tre punti sono stati recuperati e sottoposti a una prova di compressione assiale semplice. Questa metodologia consente di ottimizzare lo sfruttamento dei materiali in laboratorio, ottenendo due valori di resistenza meccanica integrativi a partire da ciascun prisma originario. L'indagine sperimentale è stata condotta in piena conformità alle linee guida della normativa UNI EN 1015-11:2007.

La campagna di rottura ha seguito la medesima pianificazione temporale stabilita per i test flessionali, eseguendo le misurazioni a scadenze cronologiche pari a 2, 7, 28 e 90

giorni dal confezionamento. Questa scansione seriale ha permesso di monitorare l'evoluzione della resistenza a compressione lungo l'intero arco della stagionatura, isolando la risposta del materiale sia alle brevi scadenze sia nel lungo termine.

Per l'esecuzione del test è stata impiegata la medesima apparecchiatura bi-camera automatica descritta in precedenza, la Matest E183N con capacità di 300/15 kN, controllata dal sistema computerizzato Servo-plus progress. Nello specifico, i frammenti di malta sono stati alloggiati nella camera di carico principale con capacità fino a 300 kN, utilizzando appositi dispositivi ausiliari di compressione provvisti di piastre rigide di contatto. Tali piastre delimitano geometricamente una superficie di carico standardizzata pari a 40 x 40 mm corrispondente all'area della sezione trasversale retta del moncone.

La sollecitazione è stata applicata in modo totalmente automatico e a tasso di carico costante fino al raggiungimento del collasso della struttura interna del provino. Il sistema di acquisizione dati ha registrato in tempo reale l'andamento delle forze esercitate; il valore di carico massimo impresso (F) è stato successivamente utilizzato per calcolare analiticamente la resistenza a compressione (R_c) del singolo elemento, espressa in MPa (N/mm^2), mediante la formula:

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

Dove:

- F è il carico massimo applicato al momento della rottura, espresso in Newton [N]
- A_c è la superficie d'impronta su cui viene trasmesso il carico, in questo caso pari a 40 mm x 40 mm [1600 mm²]



Figura 25: Macchina per prova di compressione



Figura 26: Provino rotto a compressione con tipica forma a clessidra

4.3 Risultati e osservazioni

In questo sottoparagrafo saranno inseriti i risultati delle prove della massa volumica, della resistenza a flessione e di quella a compressione effettuati a 2, 7, 28 e 90 giorni di stagionatura.

Tabella 11: Risultati Massa volumica, Resistenza a flessione e a compressione a 2 giorni di stagionatura

2 days								
	Mix	Mass [g]	Density [g/cm ³]	Average density [g/cm ³]	Rf [MPa]	Average Rf [MPa]	Rc [MPa]	Average Rc [MPa]
Getto 0	A	523,57	2045,20	2054,49	1,492	1,36	2,830	2,62
							2,451	
	B	528,33	2063,79		1,231		2,606	
							2,607	
Getto 1	A	546,17	2133,48	2126,41	4,175	4,29	21,683	21,47
							21,220	
	B	542,55	2119,34		4,408		21,089	
							21,903	
Getto 2	A	546,72	2135,63	2126,13	3,873	3,82	16,727	15,33
							15,202	
	B	541,86	2116,64		3,76		14,383	
							15,002	
Getto 3	A	549,97	2148,32	2133,69	2,019	2,13	3,663	3,80
							4,050	
	B	542,48	2119,06		2,233		3,665	
							3,816	
Getto 4	A	563,88	2202,66	2208,59	3,792	4,03	15,241	14,98
							15,411	
	B	566,92	2214,53		4,273		14,570	
							14,701	
Getto 5	A	551,26	2153,36	2148,01	3,353	3,32	8,877	9,02
							8,834	
	B	548,52	2142,66		3,277		9,164	
							9,203	

Tabella 12: Risultati Massa volumica, Resistenza a flessione e a compressione a 7 giorni di stagionatura

7 days								
	Mix	Mass [g]	Density [g/cm ³]	Average density [g/cm ³]	Rf [MPa]	Average Rf [MPa]	Rc [MPa]	Average Rc [MPa]
Getto 0	A	527,86	2061,95	2047,56	2,596	2,74	8,312	8,94
							9,272	
	B	520,49	2033,16		2,879		9,293	
							8,881	
Getto 1	A	560,96	2191,25	2198,13	5,326	4,84	35,921	35,81
							35,533	
	B	564,48	2205,00		4,351		35,888	
							35,902	
Getto 2	A	549,21	2145,35	2134,55	4,604	4,49	24,001	24,15
							23,723	
	B	543,68	2123,75		4,367		24,511	
							24,354	
Getto 3	A	548,59	2142,93	2139,18	0	3,68	11,453	11,11
							10,862	
	B	546,67	2135,43		3,681		10,975	
							11,139	
Getto 4	A	558,61	2182,07	2190,31	4,925	4,44	22,202	21,86
							22,224	
	B	562,83	2198,55		3,959		20,842	
							22,185	
Getto 5	A	539,17	2106,13	2104,14	3,779	3,78	14,639	14,58
							14,677	
	B	538,15	2102,15		0		14,629	
							14,357	

Tabella 13: Risultati Massa volumica, Resistenza a flessione e a compressione a 28 giorni di stagionatura

28 days								
	Mix	Mass [g]	Density [g/cm ³]	Average density [g/cm ³]	Rf [MPa]	Average Rf [MPa]	Rc [MPa]	Average Rc [MPa]
Getto 0	A	522,54	2041,17	2046,13	4,294	4,46	13,319	13,67
							13,087	
	B	525,08	2051,09		4,623		14,074	
							14,210	
Getto 1	A	548,15	2141,21	2121,70	6,062	4,85	43,085	43,97
							46,243	
	B	538,16	2102,19		3,641		42,559	
							43,986	
Getto 2	A	533,69	2084,73	2138,57	4,386	4,72	35,378	35,02
							34,867	
	B	561,26	2192,42		5,046		35,135	
							34,719	
Getto 3	A	546,46	2134,61	2146,35	4,911	4,43	19,956	17,16
							16,472	
	B	552,47	2158,09		3,958		16,970	
							15,248	
Getto 4	A	568,24	2219,69	2211,93	4,199	4,37	32,529	30,96
							31,289	
	B	564,27	2204,18		4,544		29,315	
							30,698	
Getto 5	A	545,36	2130,31	2136,09	3,624	4,18	18,667	19,98
							20,601	
	B	548,32	2141,88		4,728		21,318	
							19,353	
Getto A	A	596,58	2330,39	2332,38	4,778	5,41	28,823	29,78
							29,753	
	B	597,60	2334,38		6,037		30,57	
							29,983	
Getto B	A	591,53	2310,66	2331,29	7,293	6,55	29,851	29,10
							29,665	
	B	602,09	2351,91		5,806		29,252	
							27,645	

Tabella 14: Risultati Massa volumica, Resistenza a flessione e a compressione a 90 giorni di stagionatura

90 days								
	Mix	Mass [g]	Density [g/cm ³]	Average density [g/cm ³]	Rf [MPa]	Average Rf [MPa]	Rc [MPa]	Average Rc [MPa]
Getto 0	A	512,68	2002,66	2033,24	4,079	4,23	18,238	17,76
							16,269	
	B	528,34	2063,83		4,377		19,046	
							17,472	
Getto 1	A	536,92	2097,34	2081,43	4,867	4,76	49,425	48,47
							49,812	
	B	528,77	2065,51		4,645		47,956	
							46,689	
Getto 2	A	536,99	2097,62	2122,27	5,104	5,05	41,161	40,40
							40,589	
	B	549,61	2146,91		4,989		40,161	
							39,688	
Getto 3	A	543,84	2124,38	2117,30	4,02	4,27	24,672	22,29
							23,080	
	B	540,22	2110,23		4,512		22,561	
							18,847	
Getto 4	A	548,62	2143,05	2158,16	4,239	4,63	37,476	36,67
							38,629	
	B	556,36	2173,28		3,274		34,717	
							35,853	
Getto 5	A	549,41	2146,13	2139,02	3,933	4,98	24,752	24,81
							26,634	
	B	545,77	2131,91		4,272		23,270	
							24,579	
Getto A	A	593,87	2319,805	2331,504	5,474	4,83	37,872	38,59
							38,896	
	B	599,86	2343,203		4,179		39,063	
							38,515	
Getto B	A	601,53	2349,727	2349,727	7,042	7,04	37,626	38,16
							38,684	
	B							

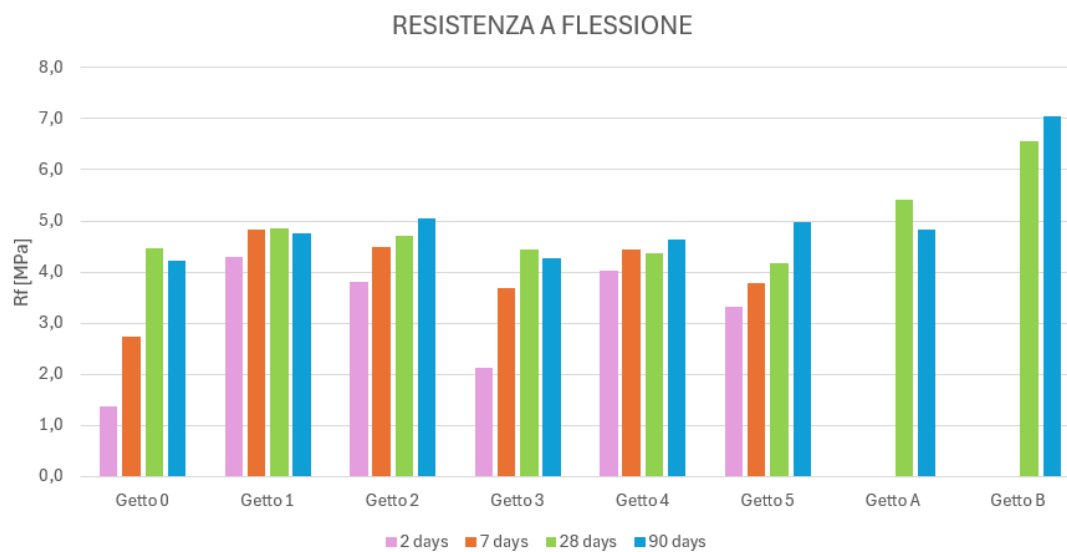


Figura 27: Grafico dell'andamento della resistenza a flessione nel tempo

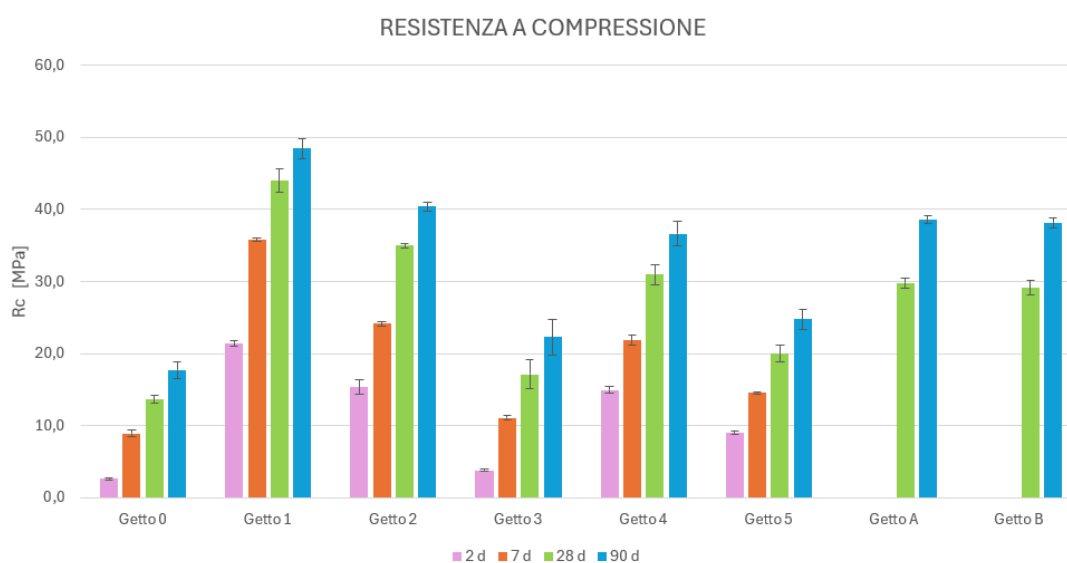


Figura 28: Grafico andamento della resistenza a compressione nel tempo

A partire dai dati numerici raccolti nelle tabelle e dall'analisi comparativa dei grafici di resistenza, è possibile tracciare un quadro chiaro ed esaustivo sul comportamento fisico-meccanico delle miscele indurite. Le evidenze sperimentali permettono di

isolare con precisione l'influenza esercitata sia dalla mineralogia e dalla geometria degli inerti, sia dalla composizione chimica del sistema legante, prendendo come capisaldi i getti di riferimento (Getto 0 e Getto 3).

Per quanto riguarda i dati sulla densità il monitoraggio della massa volumica evidenzia una sostanziale stabilità dei valori nel corso del tempo per ciascuna classe di getto, a testimonianza di un processo di maturazione che non comporta significative variazioni volumetriche o perdite di massa rilevanti.

Si riscontra tuttavia uno scarto sistematico tra le diverse miscele: i Getti A e B presentano i valori di densità media più elevati. Questo comportamento trova una diretta spiegazione fisica nei dati di caratterizzazione illustrati nel Capitolo 3.1.1: l'aggregato dolomitico naturale, il ghiaino calcareo e la sabbia silicea impiegati in queste due formulazioni possiedono una massa volumica intrinseca maggiore rispetto agli aggregati riciclati. Al contrario, i getti di riferimento (Getto 0 e Getto 3) e le miscele ecosostenibili contenenti Sand AAM e Sand RCA (Getti 1, 2, 4 e 5) mostrano densità medie inferiori, a causa della maggiore porosità interna tipica sia della sabbia Esincalce sia delle matrici riciclate.

Le prove di flessione a tre punti, invece, confermano l'eccellente comportamento tenace delle matrici attivate, evidenziando una caratteristica cinetica di indurimento molto rapida per le miscele con inerti riciclati.

Mentre il Getto di riferimento 0 mostra il classico incremento graduale nel tempo, tutte le formulazioni contenenti Sand AAM (Getti 1, 2, 4 e 5) sviluppano la quasi totalità della loro resistenza flessionale già a sole 48 ore dal getto. Questa rapida acquisizione della resistenza a trazione per flessione è legata alla rapidità di condensazione dei

gruppi silanologici e alluminologici e alla formazione precoce del network inorganico tridimensionale densamente reticolato.

Infine, spiccano i risultati del Getto B, il quale raggiunge i picchi massimi di resistenza a flessione pari a 6,55 MPa a 28 giorni e ben 7,04 MPa a 90 giorni. Questo eccellente comportamento flessionale è da attribuire al perfetto assortimento geometrico e dimensionale garantito dal mix-design ottimizzato secondo la curva ideale di Bolomey, che massimizza l'incastro meccanico tra le facce spigolose dei granuli dolomitici e silicei sotto l'azione di sollecitazioni tensionali di trazione.

L'andamento dello sviluppo della resistenza a compressione rappresenta l'indicatore più significativo del grado di attivazione alcalina delle matrici leganti. L'analisi dei grafici permette di strutturare le seguenti considerazioni chiave:

Effetto della qualità e della graduazione dell'aggregato: Il dato più rilevante emerge dal confronto macroscopico tra il Getto 0 (Miscela di riferimento con 100% Sand Esincalce) e il Getto 1 (100% Sand AAM). Il Getto 1 mostra un incremento straordinario delle prestazioni meccaniche a tutte le scadenze temporali. Di contro, il Getto di riferimento 0 si arresta a soli 13,67 MPa a 28 giorni. Questo gap prestazionale è riconducibile alla combinazione di tre fattori:

1. Ottimizzazione granulometrica: Come evidenziato dalle curve granulometriche del Capitolo 3.1.1, la sabbia Esincalce del getto di riferimento è un inerte estremamente fine e uniforme, che comporta un pessimo assortimento granulometrico, un'elevata richiesta d'acqua e una struttura indurita fortemente porosa. Il Sand AAM, al contrario, presenta una curva ben graduata e continua lungo tutto lo spettro

dimensionale, garantendo un ottimo compattamento e un effetto "fillerizzante" meccanico.

2. Affinità chimica: L'impiego di un aggregato derivato da matrici ad attivazione alcalina (Sand AAM) all'interno di una pasta legante della medesima natura chimica favorisce la creazione di un'interfaccia granulo-matrice estremamente coesa e priva di discontinuità, eliminando il punto debole tipico dei calcestruzzi ordinari.
3. Lavorabilità allo stato fresco e riduzione del rapporto acqua/legante effettivo: L'analisi del comportamento allo stato fresco (Tabella 10) mostra che il Getto 1 presenta una consistenza rigida e una lavorabilità inferiore rispetto al Getto 0, con un diametro medio di spandimento che scende da 186,5 mm a soli 102,5 mm. Questo calo della fluidità si manifesta nonostante l'utilizzo degli aggregati riciclati in condizioni di superficie satura asciutta (SSA). A parità di tutti gli altri componenti, tale fenomeno indica che una quota dell'acqua d'impasto è stata assorbita dalla porosità interna del Sand AAM durante la miscelazione, provocando un abbassamento del rapporto acqua/legante effettivo nella pasta. Sebbene questa idratazione sottratta penalizzi le proprietà reologiche allo stato fresco, la riduzione del rapporto acqua/legante ha agito come un potente fattore di compattazione della matrice indurita, contribuendo all'incredibile incremento delle resistenze meccaniche finali. In un'ottica di sviluppo futuro, risulterà pertanto di grande interesse scientifico valutare le prestazioni di questi sistemi strutturali a parità di lavorabilità.

Il Getto 2 (50% Sand AAM + 50% Sand RCA) fa registrare ottime risposte resistenti, raggiungendo 35,02 MPa a 28 giorni e 40,40 MPa a lungo termine (90 giorni). Sebbene le prestazioni siano inferiori rispetto al Getto 1 a causa della minore resistenza meccanica intrinseca della frazione di calcestruzzo riciclato ordinario (RCA), il Getto 2 supera ampiamente il rispettivo riferimento (Getto 0), confermando la piena fattibilità tecnica dell'impiego di miscele di inerti di recupero.

L'introduzione del 10% di CEM I in sostituzione parziale della loppa d'altoforno genera un comportamento divergente e di estremo interesse scientifico:

- Mettendo a confronto i due getti di riferimento (Getto 3 e Getto 0, entrambi con aggregato Esincalce), si nota che la presenza del cemento Portland accelera la cinetica di idratazione iniziale e migliora le resistenze finali, portando il Getto 3 (riferimento del sistema ibrido) a 17,16 MPa a 28 giorni rispetto ai 13,67 MPa del Getto 0.
- Al contrario, nelle miscele contenenti gli aggregati riciclati (Getto 4 vs Getto 1, e Getto 5 vs Getto 2), l'aggiunta di cemento Portland determina un netto decremento delle resistenze meccaniche. Il Getto 4 (ibrido con Sand AAM) si attesta infatti a 30,96 MPa a 28 giorni, segnando un calo del 30% rispetto ai 43,97 MPa dello speculare Getto 1 contenente la sola loppa. Ciò suggerisce che l'idratazione del clinker di Portland interferisce negativamente con la cinetica di poli-condensazione esotermica indotta dall'attivatore alcalino in presenza di aggregati riciclati, diminuendo l'efficacia della sinergia chimica matrice-granulo.

Infine, i Getti A e B, progettati ottimizzando lo scheletro granulometrico naturale secondo la curva ideale di Bolomey, mostrano resistenze a compressione a 28 giorni rispettivamente di 29,78 MPa e 29,10 MPa. È di fondamentale importanza evidenziare come il Getto 1 (con Sand AAM e sola loppa) superi nettamente le prestazioni di queste miscele realizzate con inerti naturali calcareo-dolomitici e silicei di alta qualità. Tale evidenza dimostra scientificamente che i materiali ad attivazione alcalina di recupero non rappresentano semplicemente dei sostituti ecologici a basso impatto, ma sono in grado di incrementare le prestazioni meccaniche strutturali rispetto agli standard estrattivi tradizionali.

4.4 Porosimetria

Al fine di approfondire la caratterizzazione microstrutturale delle miscele indagate, l'attività sperimentale ha previsto l'esecuzione di analisi porosimetriche condotte specificamente sulle sei formulazioni principali della ricerca (dal Getto 0 al Getto 5). Nell'ambito della scienza dei materiali da costruzione, la porosità si configura come una importante proprietà strutturale, esercitando un'influenza diretta sulle prestazioni meccanico-resistenziali, sui fenomeni di permeabilità e, di conseguenza, sulla durabilità a lungo termine dei manufatti. Nei sistemi ad attivazione alcalina, l'architettura dei vuoti è correlata alla cinetica di reazione e al successivo sviluppo del reticolo inorganico tridimensionale. Nel caso specifico di questa campagna sperimentale, l'indagine permette di valutare comparativamente come la porosità totale e la distribuzione dimensionale dei pori vengano influenzate sia dalla variazione della matrice legante (passaggio dal sistema al 100% di loppa d'altoforno al sistema ibrido

con il 10% di cemento Portland) sia dall'introduzione degli aggregati di recupero (Sand AAM e Sand RCA) in sostituzione della sabbia fine Esincafce usata nei getti di riferimento.

4.4.1 Significato della prova

La tecnica maggiormente impiegata nella letteratura scientifica per la determinazione della porosità nei materiali è la porosimetria a intrusione di mercurio (Mercury Intrusion Porosimetry, MIP). Questa tipologia di indagine di tipo distruttivo consente di quantificare accuratamente sia il volume totale dei pori (porosità totale), sia la distribuzione granulometrica dei pori. Il principio fisico alla base della tecnica MIP si fonda sul comportamento idrofobico del mercurio. Essendo un liquido non bagnante, esso possiede un angolo di contatto (θ) con le pareti solide superiore a 90° , condizione che gli impedisce di penetrare spontaneamente all'interno delle cavità per capillarità. Per forzare il mercurio a introdursi nei vuoti della matrice del campione è quindi necessario applicare una pressione esterna e progressivamente crescente.

La relazione matematica che governa questo fenomeno, legando la pressione meccanica applicata al raggio teorico del poro penetrato, è descritta dall'equazione di Washburn:

$$P_L - P_G = \frac{4\sigma \cos \theta}{D_p}$$

Nel contesto operativo della prova porosimetrica, l'equazione può essere semplificata. Poiché il liquido viene introdotto all'interno di una camera in cui è stato precedentemente applicato il vuoto, la pressione del gas intrappolato nei pori (P_G) può essere considerata nulla ($P_G = 0$ atm). Di conseguenza, esplicitando la formula in funzione del diametro dei pori (D_p), si ottiene l'espressione analitica finale utilizzata dal software dello strumento:

$$D_p = - \frac{4\sigma \cos \theta}{P_L}$$

Dove i singoli parametri sono così definiti:

- D_p : rappresenta il diametro del poro cilindrico equivalente penetrato dal fluido, espresso in micrometri (μm);
- P_L : è la pressione idraulica esterna esercitata sul mercurio e registrata dallo strumento, misurata in MPa (N/mm^2);
- σ : costituisce la tensione superficiale del mercurio, assunta pari a 480 mN/m in condizioni di vuoto;
- θ : è l'angolo di contatto tra il mercurio e la superficie interna della matrice solida, il cui valore medio di intrusione viene convenzionalmente posto pari a 140° .

Da un punto di vista dinamico, la prova si sviluppa secondo una cinetica inversamente proporzionale. Alle basse pressioni iniziali, il mercurio riesce a vincere la resistenza capillare esclusivamente nei pori di maggiore dimensione (macropori). Al crescere graduale e controllato della pressione idraulica, il liquido viene progressivamente

forzato a penetrare nelle cavità a dimensionalità via via decrescente, fino a invadere i canali più microscopici (mesopori e micropori).

Attraverso la registrazione continua del volume di mercurio intruso in funzione della pressione applicata, lo strumento è in grado di elaborare i dati e restituire la curva di distribuzione porosimetrica differenziale e cumulativa del materiale analizzato.

4.4.2 Strumentazione utilizzata

La determinazione sperimentale delle proprietà porosimetriche è stata condotta impiegando due apparecchiature della serie “Thermo Scientific Pascal”, ingegnerizzate da ThermoFisher Scientific: il modulo a bassa pressione “Pascal 140” e l'unità ad alta pressione “Pascal 240”. I due dispositivi operano in stretta sinergia combinata, consentendo di mappare in modo continuo un esteso spettro dimensionale dei vuoti. Nello specifico, la prima fase d'indagine viene eseguita tramite il Pascal 140, deputato all'analisi in regime di bassa pressione per la caratterizzazione dei macropori aventi un diametro equivalente compreso tra 116 μm e 3,8 μm . Successivamente, il completamento della curva viene affidato al Pascal 240; quest'ultimo, operando in regime di alta pressione fino a un valore massimo di 200 MPa, consente di forzare l'intrusione del mercurio all'interno dei mesopori e dei micropori, spingendo il limite di rilevamento fino a un diametro minimo di 0,0074 μm . Entrambe le unità sfruttano un sistema capacitivo ad alta precisione per la misurazione del volume di liquido intruso e sono interfacciate a un software dedicato, il quale sovrintende alle fasi di acquisizione dei segnali, elaborazione algoritmica e data export dei risultati.

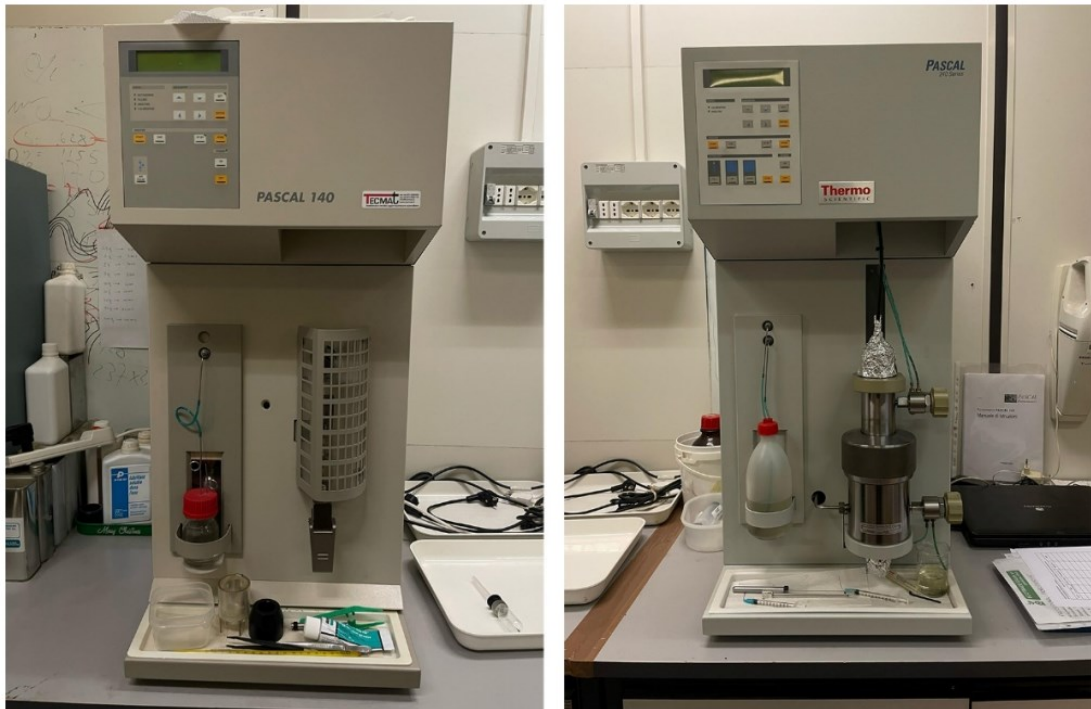


Figura 29: Macchina Pascal 140 e Pascal 240 per prova della porosimetria a inclusione di mercurio

4.4.3 Procedura operativa

Dai provini prismatici di dimensioni $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ relativi alle sei formulazioni principali (dal Getto 0 al Getto 5) dopo la rottura a compressione di 28 giorni, sono state prelevate le aliquote di materiale destinate all'indagine porosimetrica. Tali campioni sono stati preventivamente ridotti in frammenti volumetrici di circa 1 cm^3 . Una volta stabilizzata la massa, il campione è stato inserito all'interno di un apposito bulbo porta-campioni (dilatometro), solidale a un gambo dotato di un capillare in vetro forato e rivestito metallicamente (Figura 31).

L'analisi porosimetrica, effettuata a 36 giorni dal getto, si è articolata in due fasi sequenziali e complementari: una prima sessione a bassa pressione mediante l'unità

Pascal 140, finalizzata al riempimento dei macropori, e una successiva ad alta pressione tramite il modulo Pascal 240, necessaria per investigare la porosità ultrafine.

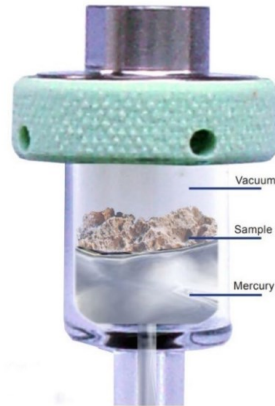


Figura 30: Bulbo porta campioni

Durante lo svolgimento del test, il porosimetro registra in tempo reale il volume di mercurio intruso all'interno della matrice solida in funzione della pressione idraulica progressivamente applicata. L'elaborazione di questi dati sperimentali consente di determinare i seguenti parametri microstrutturali:

- La porosità totale aperta, espressa in percentuale rispetto al volume totale del campione;
- La curva di distribuzione porosimetrica, sia in forma cumulativa sia differenziale, utile a mappare la cinematica dei vuoti;
- Il diametro modale, che identifica la dimensione dei pori statisticamente più rappresentativa e frequente all'interno della matrice.

Il volume complessivo di mercurio capace di penetrare nel solido fornisce una misura diretta ed esclusiva della porosità aperta dei campioni. Lo studio e la correlazione di questi dati operano come uno strumento diagnostico fondamentale per valutare il grado

di omogeneità della microstruttura, permettendo di istituire un confronto analitico speculare tra le diverse matrici di materiali ad attivazione alcalina investigate nel presente lavoro.

4.4.4 Risultati e osservazioni

I risultati sperimentali ottenuti mediante la porosimetria a intrusione di mercurio, sintetizzati nella Tabella 15, offrono una chiara chiave di lettura a scala microscopica del comportamento macroscopico delle miscele, delineando una precisa correlazione tra la struttura dei voti e le risposte resistenti analizzate nel Capitolo 4.2.3.

Tabella 15: Risultati prove porosimetriche

POROSIMETRIE					
Miscela	Porosità totale	Densità apparente	Area superficiale totale dei pori	Diametro medio dei pori	Diametro modale dei pori
	[%]	[g/cm ³]	[m ² /g]	[μm]	[μm]
Getto 0	26,44	1,909	9,668	0,0573	0,0413
Getto 1	18,25	2,018	12,701	0,0285	0,0073
Getto 2	20,94	1,992	15,790	0,0266	0,0212
Getto 3	22,1	2,017	8,467	0,0518	0,0420
Getto 4	19,81	2,003	11,951	0,0331	0,0412
Getto 5	25,69	1,871	13,185	0,0417	0,0500

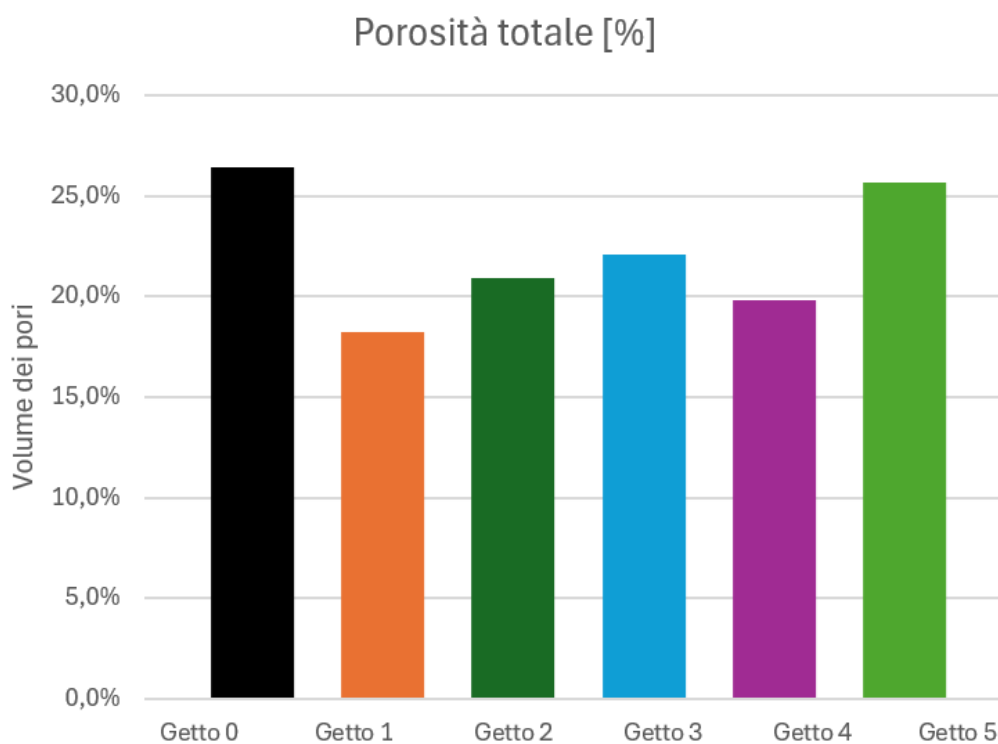


Figura 31: grafico di confronto delle porosità dei diversi campioni

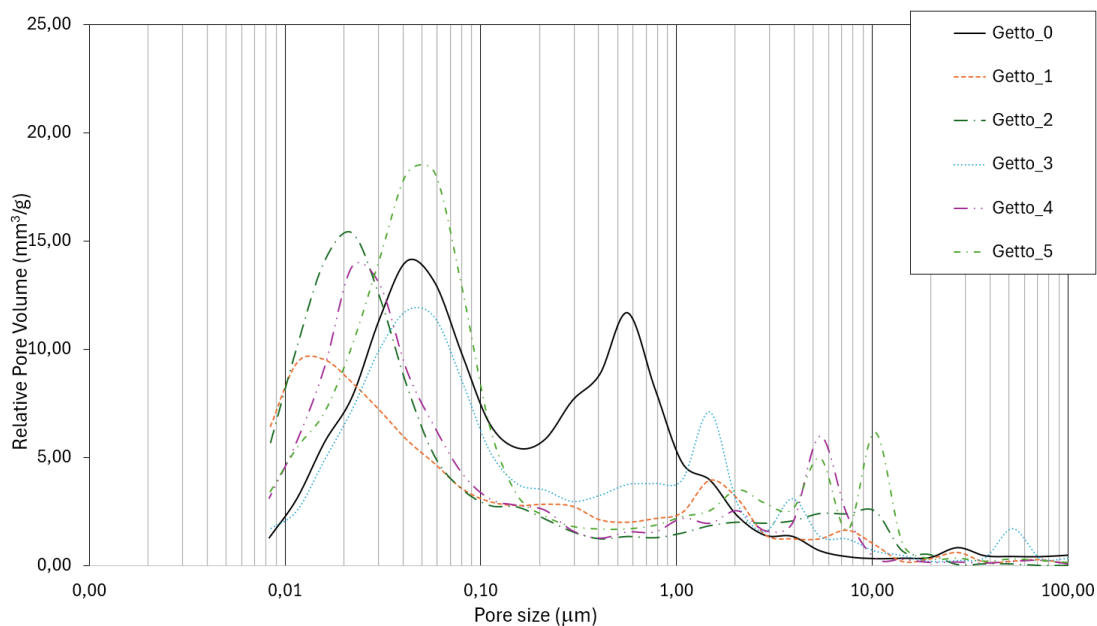


Figura 32: Confronto della distribuzione percentuale del volume dei pori in funzione della dimensione

L'esame delle prime tre formulazioni evidenzia l'impatto determinante della natura e della graduazione dell'aggregato sullo sviluppo della microstruttura porosa:

Getto 0 vs Getto 1: Il getto di riferimento 0 fa registrare il valore di porosità totale più elevato dell'intera campagna sperimentale, pari al 26,44%, a cui corrisponde la densità apparente più bassa (1,909 g/cm³). Questo andamento è guidato dalla scarsa ottimizzazione granulometrica della sabbia naturale, che genera ampi vuoti intergranulari. Al contrario, l'impiego del 100% di Sand AAM nel Getto 1 induce un drastico affinamento della struttura: la porosità totale si riduce al 18,25% e la densità apparente sale a 2,018 g/cm³.

Comportamento del sistema con aggregato ibrido (Getto 2): La miscela confezionata con il 50% di Sand AAM e il 50% di Sand RCA esibisce parametri geometrici intermedi, con una porosità totale del 20,94% e una densità apparente di 1,992 g/cm³. Di estremo interesse è il dato relativo all'area superficiale totale dei pori, che in questa

formulazione raggiunge il picco massimo di 15,790 m²/g. Questo incremento della superficie specifica, associato a un diametro medio molto basso (0,0266 µm), suggerisce che la frazione di calcestruzzo riciclato ordinario (RCA), pur introducendo una leggera porosità aggiuntiva rispetto al Sand AAM puro, favorisce la ramificazione e la tortuosità del network poroso, frammentando i vuoti in canali cinematicamente interconnessi ma estremamente miniaturizzati.

L'introduzione del 10% di cemento Portland in parziale sostituzione della loppa d'altoforno modifica radicalmente la cinematica di formazione dei vuoti, mostrando andamenti opposti a seconda dell'inerte combinato:

Ottimizzazione delle matrici fini naturali (Getto 3 vs Getto 0): Nei sistemi confezionati con sabbia Esincalce, l'aggiunta di clinker di Portland si rivela migliorativa per la microstruttura. Il Getto 3 mostra, infatti, una riduzione della porosità totale dal 26,44% al 22,10% e un incremento della densità apparente fino a 2,017 g/cm³ rispetto a quelle del Getto 0. In questo contesto, l'idratazione precoce del cemento agisce sinergicamente riempiendo parzialmente i macro-vuoti lasciati dal non ottimale assortimento della sabbia fine.

Al contrario, quando il sistema legante ibrido interagisce con gli aggregati di recupero, si assiste a un lieve peggioramento dei parametri porosimetrici rispetto al Getto 1. Nel Getto 4 (ibrido con Sand AAM), la porosità totale sale al 19,81% e l'area superficiale decresce a 11,951 m²/g. L'evidenza più critica è rappresentata dal diametro modale, che salta da 0,0073 µm a 0,0412 µm, manifestando un evidente fenomeno di grossolano ingrandimento dei pori. La medesima tendenza si riscontra nel Getto 5

(ibrido con 50% RCA), dove la porosità si espande fino al 25,69% e la densità apparente scende al minimo valore di 1,871 g/cm³ rispetto al Getto 2.

I dati MIP confermano quindi l'ipotesi chimico-fisica discussa in precedenza: la coesistenza dei prodotti di idratazione del cemento Portland e del network tridimensionale derivante dall'attivazione alcalina della loppa genera un'interferenza cinetica deleteria in presenza di aggregati riciclati. Questa incompatibilità provoca la formazione di una struttura porosa più aperta e grossolana, responsabile dei cali di prestazione meccanica riscontrati.

4.5 Analisi microscopica elettronica a scansione (SEM)

Il microscopio elettronico a scansione (SEM), integrato alla spettrometria a dispersione di energia (EDX), costituisce uno strumento microanalitico fondamentale per la caratterizzazione morfologica, strutturale ed elementare dei materiali solidi e delle matrici cementizie alternative. Il principio operativo si basa sull'interazione ravvicinata tra un fascio altamente focalizzato di elettroni e la superficie del campione investito, all'interno di una camera mantenuta in condizioni di vuoto. Questa interazione genera segnali elettronici e termici differenziati che consentono di ottenere informazioni ad altissima risoluzione riguardanti la topografia superficiale, la distribuzione della porosità microscopica e l'omogeneità composizionale delle fasi indurite.

L'analisi chimica elementare viene eseguita in tempo reale misurando l'energia e l'intensità dei raggi X caratteristici emessi dagli atomi del campione a seguito dell'eccitazione indotta dal fascio elettronico. Tale segnale viene captato da un

rivelatore a dispersione di energia EDX. La flessibilità della strumentazione consente di operare l'indagine secondo due modalità complementari: effettuando una scansione diffusa su un'intera area ad elevato ingrandimento, oppure focalizzando stabilmente il fascio su un singolo punto di interesse microscopico (microanalisi puntuale). Poiché la porzione di volume eccitata dal segnale X si estende in un intorno del punto nell'ordine di pochissimi micrometri, il sistema combinato SEM-EDX rappresenta un potente mezzo diagnostico per investigare solidi chimicamente disomogenei ed evoluti a scala microstrutturale.

La preparazione dei campioni per la presente ricerca è stata appositamente studiata per preservare l'integrità strutturale del materiale e consentire l'osservazione diretta della Zona di Transizione Interfacciale (ITZ) tra la matrice legante e i granuli. A seguito delle prove di rottura meccanica a compressione a 28 giorni, dai provini prismatici relativi alle sei formulazioni principali (dal Getto 0 al Getto 5) sono stati estratti campioni aventi una dimensione indicativa di circa 1 cm³. In seguito, i campioni sono stati vincolati a supporti metallici tramite nastro biadesivo al carbonio e sottoposti a un processo di metallizzazione mediante deposizione di un film ultrasottile di oro che è un materiale conduttore, preconditione fisica necessaria per conferire la conducibilità elettrica superficiale altrimenti assente nelle matrici cementizie.



Figura 33: Campioni per prova SEM

Nelle sezioni successive vengono presentati i risultati analitici relativi ai campioni dal Getto 0 al Getto 5. Per ciascuna miscela viene riportata la micrografia SEM della superficie di frattura e la relativa tabella composizionale EDX in cui sono dettagliati gli elementi chimici rilevati. L'indagine così strutturata riveste carattere sia qualitativo, per l'esame morfologico delle trame del gel, sia semi-quantitativo, esprimendo le concentrazioni dei singoli costituenti mineralogici in percentuale sul peso totale del campione.

Il Getto 0 rappresenta la miscela di riferimento a base di sola loppa d'altoforno attivata con la soluzione di idrossido di sodio 4M, in cui è stato utilizzato il 100% di sabbia Esincalce. Nell'analisi SEM-EDX condotta su questo campione sono state effettuate due diverse scansioni che mostrano i seguenti risultati:

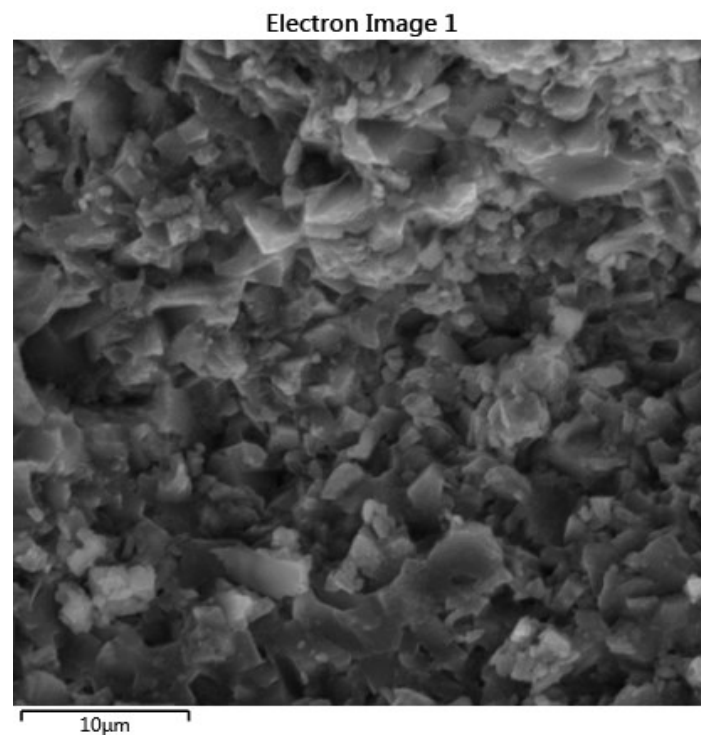


Figura 34: Scansione SEM del Getto 0 "spectrum 1"

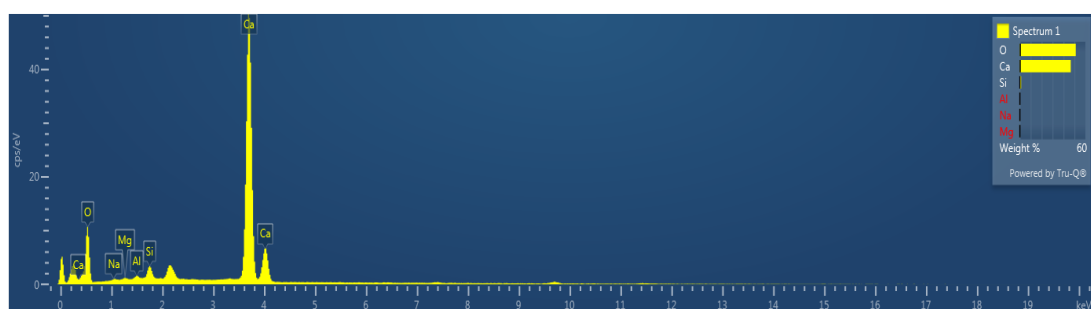


Figura 35: Diffrattogramma del Getto 0 "spectrum 1"

Tabella 16: Risultati indagini SEM+EDX del Getto 0 "Spectrum 1"

Spectrum 1	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
O	K series	39,6	0,13325	51,17	0,41	71,96
Na	K series	0,42	0,00178	0,31	0,08	0,3
Mg	K series	0,33	0,00218	0,25	0,06	0,23
Al	K series	0,55	0,00395	0,35	0,05	0,29
Si	K series	2,31	0,01828	1,3	0,05	1,04
Ca	K series	99,61	0,89001	46,63	0,4	26,18
Total				100		100

Il punto chiamato Spectrum 1 analizza direttamente l'interno di un granulo di sabbia Esincalce. I dati mostrano principalmente la presenza di Ossigeno (51,17%) e di Calcio (46,63% in peso). Il fatto che elementi come il Silicio (1,30%), l'Alluminio (0,35%) e il Sodio (0,31%) siano quasi del tutto assenti conferma che il granulo di aggregato non ha subito reazioni chimiche o contaminazioni da parte della pasta legante. Questa composizione rispecchia fedelmente la natura calcarea della sabbia naturale impiegata nell'impasto.

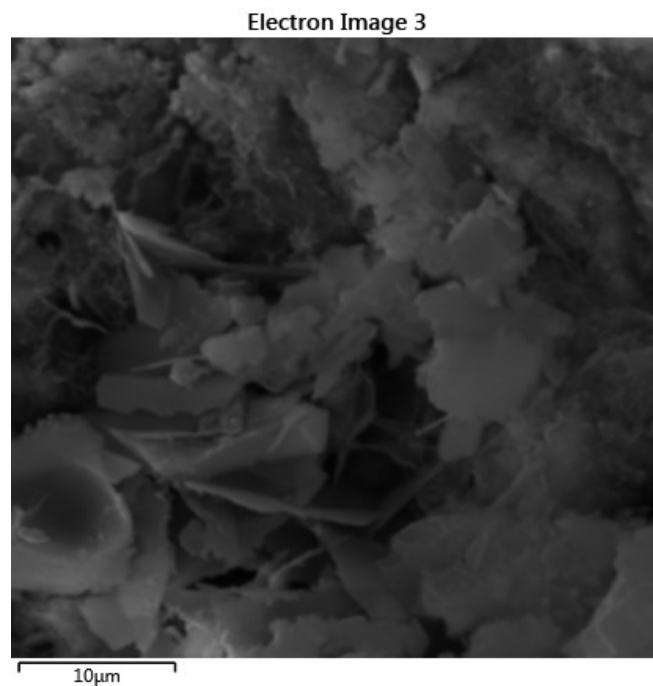


Figura 36: Scansione SEM del Getto 0 "Spectrum 2"

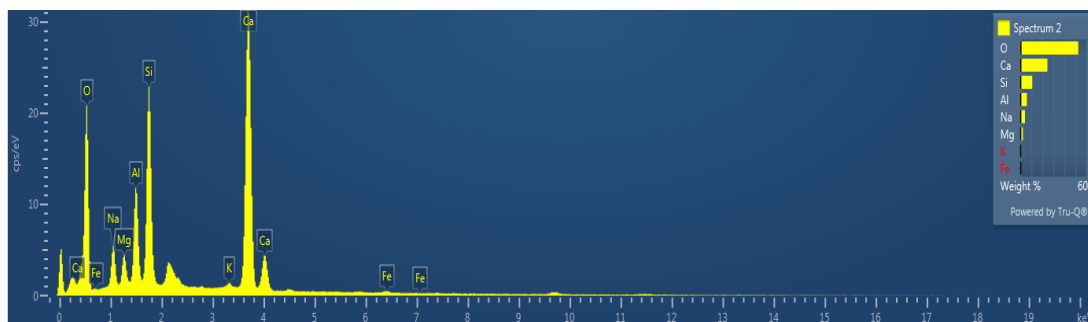


Figura 37: Diffrattogramma del Getto 0 "spectrum 2"

Tabella 17: Risultati indagini SEM+EDX del Getto 0 "Spectrum 2"

Spectrum 2	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
O	K series	76,78	0,25837	52,63	0,31	69,16
Na	K series	7,71	0,03253	3,93	0,1	3,59
Mg	K series	3,56	0,02363	2,06	0,07	1,78
Al	K series	11,12	0,07986	5,65	0,09	4,4
Si	K series	21,81	0,17281	10,58	0,11	7,92
K	K series	1,02	0,00864	0,38	0,04	0,21
Ca	K series	61,68	0,5511	24,42	0,19	12,81
Fe	K series	0,71	0,00706	0,34	0,07	0,13
Total				100		100

Il punto Spectrum 2 mostra la composizione chimica del gel indurito. In questa zona si nota un forte cambiamento nei risultati rispetto al punto precedente: il valore del Calcio si dimezza attestandosi al 24,42%, mentre compaiono in modo significativo il Silicio (10,58%) e l'Alluminio (5,65%). Questa combinazione di elementi è la prova che la loppa d'altoforno ha reagito correttamente con l'attivatore, portando alla formazione del gel idrato di silicato di calcio e alluminio, chiamato comunemente gel C-A-S-H. La quantità di Calcio ancora presente (24,42%) deriva direttamente dalla loppa di partenza. Inoltre, si evidenzia la presenza di Sodio (3,93%) e di Magnesio (2,06%). La presenza del Sodio conferma la corretta interazione con la soluzione attivatrice usata (NaOH). Dal punto di vista chimico, l'analisi mostra che nel Getto 0 la reazione della loppa è avvenuta con successo.

Il Getto 1 è la miscela confezionata con sola loppa d'altoforno e il 100% di aggregato riciclato proveniente da matrici attivate alcalinamente (Sand AAM). L'analisi SEM-EDX mostra una struttura molto compatta, all'interno della quale sono stati selezionati due spettri rappresentativi:

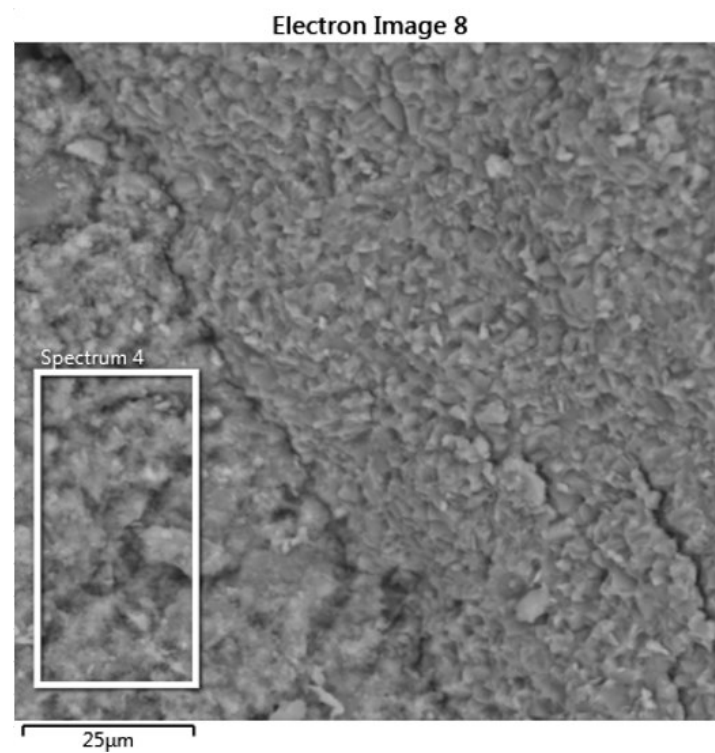


Figura 38: Scansione SEM del Getto 1 "Spectrum 4"

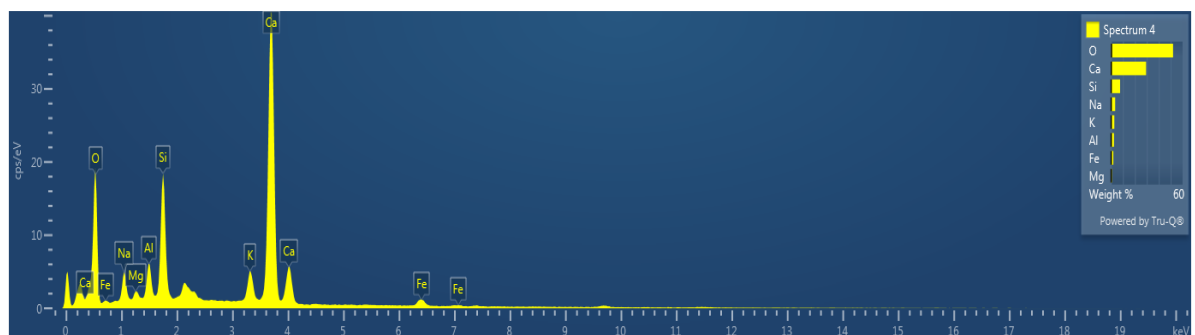


Figura 39: Diffrattogramma del Getto 1 "Spectrum 4"

Tabella 18: Risultati indagini SEM+EDX del Getto 1 "Spectrum 4"

Spectrum 4	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
O	K series	71,05	0,2391	52,02	0,32	70,36
Na	K series	6,62	0,02795	3,38	0,1	3,19
Mg	K series	1,22	0,00806	0,69	0,06	0,61
Al	K series	5,1	0,03665	2,45	0,06	1,97
Si	K series	17,26	0,13675	7,55	0,09	5,82
K	K series	7,91	0,06698	2,68	0,06	1,48
Ca	K series	80,01	0,71484	29,32	0,21	15,83
Fe	K series	4,17	0,04167	1,89	0,09	0,73
Total				100		100

Questo punto analizza la pasta di fondo del materiale. I dati mostrano la presenza bilanciata di Sodio (3,38%), Alluminio (2,45%) e Silicio (7,55%), con un solido contenuto di Calcio (29,32%). Questa composizione conferma l'avvenuta reazione della loppa e la formazione del gel cementante di tipo C-A-S-H.

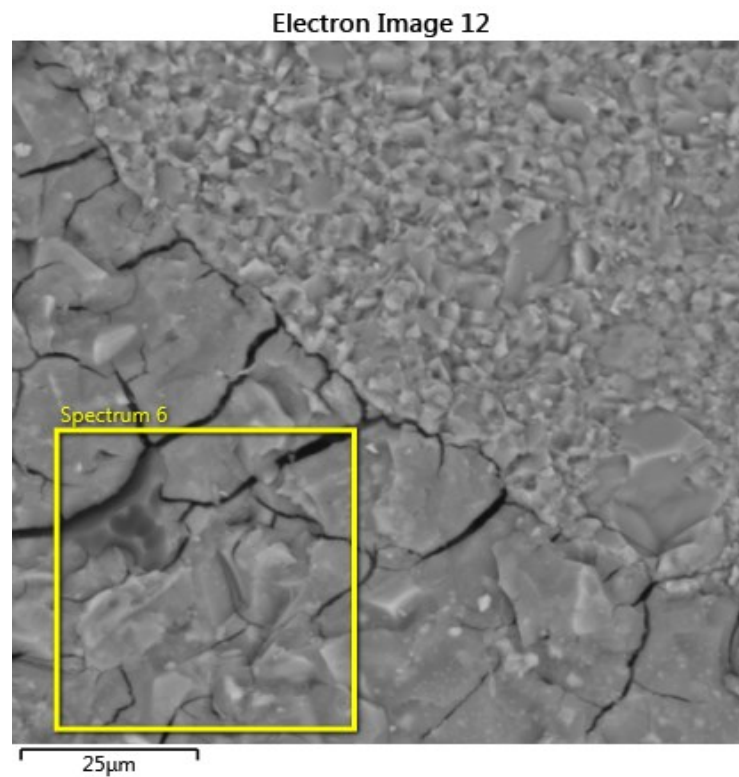


Figura 40: Scansione SEM del Getto 1 "Spectrum 6"

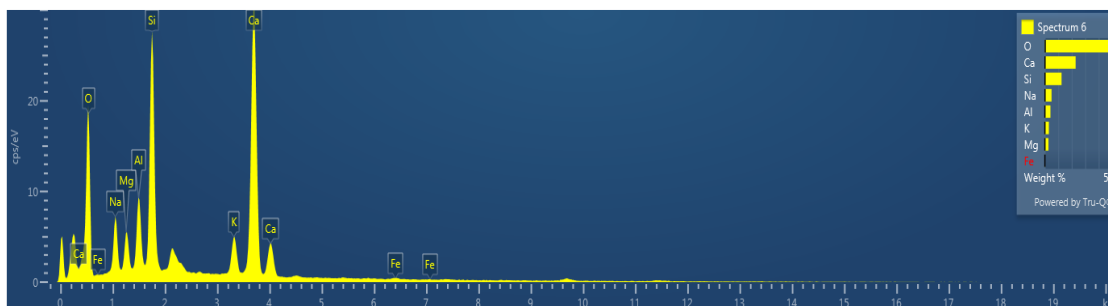


Figura 41: Diffrattogramma del Getto 1 "Spectrum 6"

Tabella 19: Risultati indagini SEM+EDX del Getto1 "Spectrum 6"

Spectrum 6	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
O	K series	72,48	0,24391	49,54	0,31	66,24
Na	K series	10,52	0,04438	5,04	0,11	4,69
Mg	K series	4,78	0,0317	2,66	0,08	2,34
Al	K series	8,48	0,06088	4,18	0,08	3,32
Si	K series	26,92	0,21334	12,44	0,12	9,47
K	K series	8,08	0,06841	2,96	0,06	1,62
Ca	K series	58,95	0,52668	22,86	0,17	12,2
Fe	K series	0,66	0,00662	0,31	0,07	0,12
Total				100		100

Questo secondo punto, sempre preso sulla matrice, mostra un incremento del Silicio (12,44%), dell'Alluminio (4,18%) e del Sodio (5,04%). L'alto tenore di Sodio testimonia l'ottima diffusione della soluzione attivatrice all'interno della miscela.

Nella formulazione del Getto 2, a base di sola loppa, lo scheletro granulare è composto a metà da aggregato riciclato attivato alcalinamente (Sand AAM) e l'altra metà da aggregato da demolizione ordinario (Sand RCA). I punti scelti per l'analisi evidenziano l'interazione tra le due diverse famiglie di inerti:

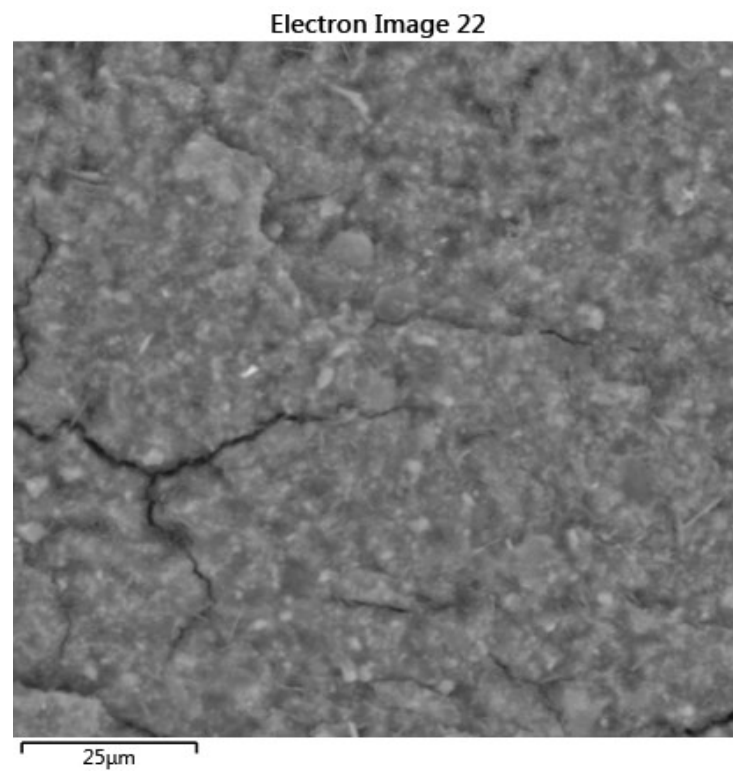


Figura 42: Scansione SEM del Getto 2 "Spectrum 12"

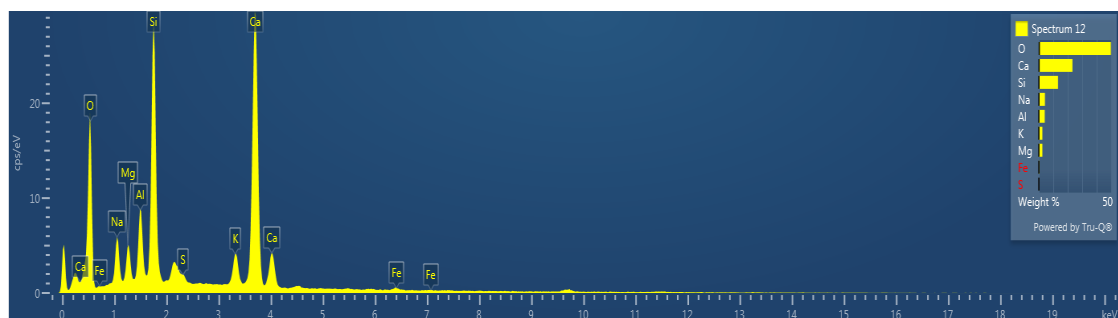


Figura 43: Diffrattogramma del Getto 2 "Spectrum 12"

Tabella 20: Risultati indagini SEM+EDX del Getto 2 "Spectrum 12"

Spectrum 12	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
O	K series	69,85	0,23506	49,74	0,32	66,58
Na	K series	8,46	0,03571	4,24	0,11	3,95
Mg	K series	4,27	0,02832	2,45	0,08	2,16
Al	K series	8	0,05746	4,06	0,08	3,23
Si	K series	27,79	0,22023	13,23	0,12	10,09
S	K series	0,15	0,00133	0,07	0,05	0,05
K	K series	6,47	0,05481	2,46	0,06	1,35
Ca	K series	57,73	0,5158	23,22	0,18	12,4
Fe	K series	1,06	0,01063	0,52	0,07	0,2
Total				100		100

In questa zona, presa sulla pasta legante circostante, lo spettro mostra valori di Silicio pari al 13,23%, Alluminio al 4,06% e Sodio al 4,24%. I dati indicano che la Loppa ha reagito regolarmente formando un network C-A-S-H stabile ed esteso.

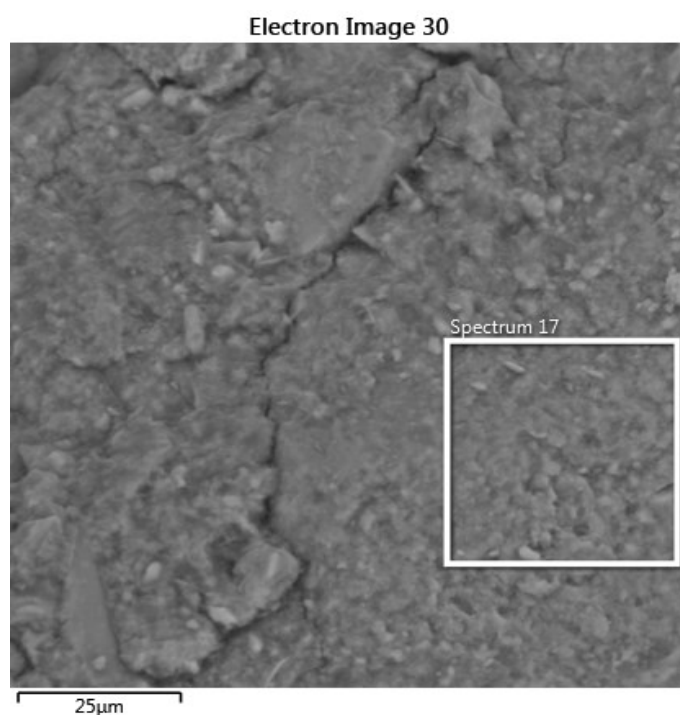


Figura 44: Scansione SEM del Getto 2 "Spectrum 17"

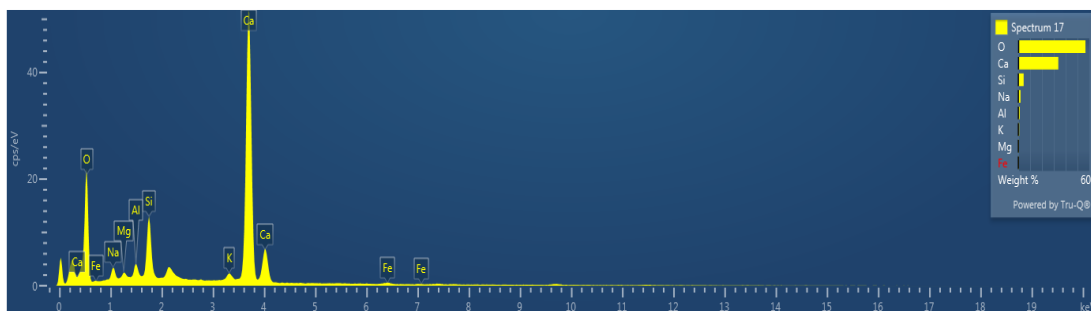


Figura 45: Diffrattogramma del Getto 2 "Spectrum 17"

Tabella 21: Risultati indagini SEM +EDX del Getto 2 "Spectrum 17"

Spectrum 17	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
O	K series	81,49	0,27423	56,72	0,29	74,96
Na	K series	3,92	0,01654	1,91	0,09	1,75
Mg	K series	1,06	0,00704	0,55	0,05	0,48
Al	K series	2,68	0,01925	1,19	0,05	0,93
Si	K series	11,55	0,09152	4,57	0,07	3,44
K	K series	2,58	0,02182	0,78	0,04	0,42
Ca	K series	102,3	0,91402	33,79	0,24	17,82
Fe	K series	1,2	0,01196	0,5	0,07	0,19
Total				100		100

Questo punto si differenzia per un contenuto di Silicio più basso (4,57%) e un valore di Calcio decisamente più alto (33,79%). Lo spettro intercetta la vecchia pasta di cemento ordinario rimasta attaccata ai granuli di calcestruzzo riciclato (RCA), introducendo una locale variazione nella chimica del materiale.

Il Getto 3 rappresenta il benchmark per il sistema legante ibrido, composto al 90% da loppa d’altoforno e al 10% da cemento Portland (CEM I), utilizzando il 100% di sabbia fine naturale Esincalce. Gli spettri isolano l'effetto dell'introduzione del clinker nel sistema:

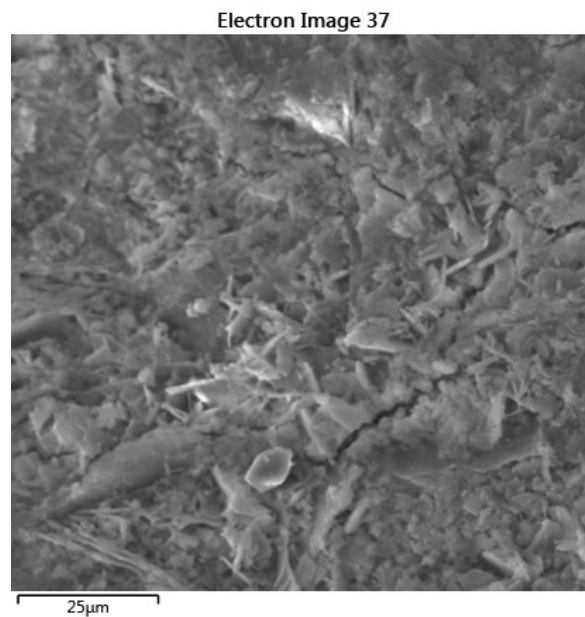


Figura 46: Scansione SEM del Getto 3 "Spectrum 21"

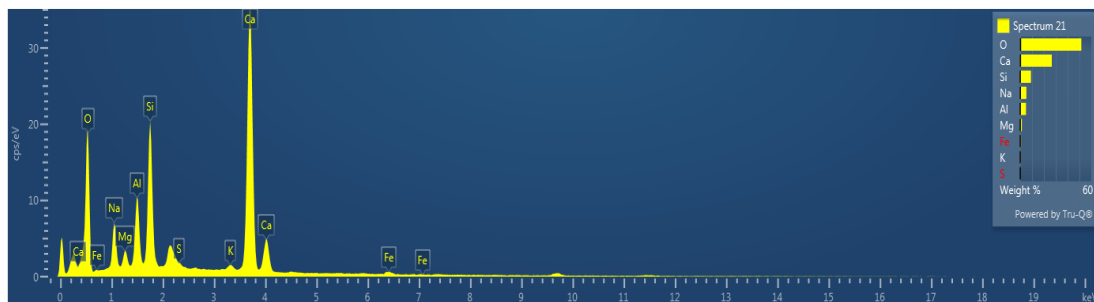


Figura 47: Diffrattogramma del Getto 3 "Spectrum 21"

Tabella 22: Risultati indagini SEM+EDX del Getto 3 "Spectrum 21"

Spectrum 21	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
O	K series	73,18	0,24627	51,58	0,31	68,56
Na	K series	10,3	0,04349	5,21	0,11	4,82
Mg	K series	2,37	0,01574	1,39	0,07	1,21
Al	K series	9,68	0,06956	4,88	0,08	3,84
Si	K series	19,14	0,15163	9,07	0,1	6,87
S	K series	0	0	0	0,05	0
K	K series	1,47	0,01244	0,53	0,04	0,29
Ca	K series	69,1	0,6174	26,63	0,2	14,13
Fe	K series	1,5	0,01499	0,72	0,08	0,27
Total				100		100

Mostra i tipici elementi dell'attivazione della loppa, con Sodio al 5,21%, Alluminio al 4,88% e Silicio al 9,07%.

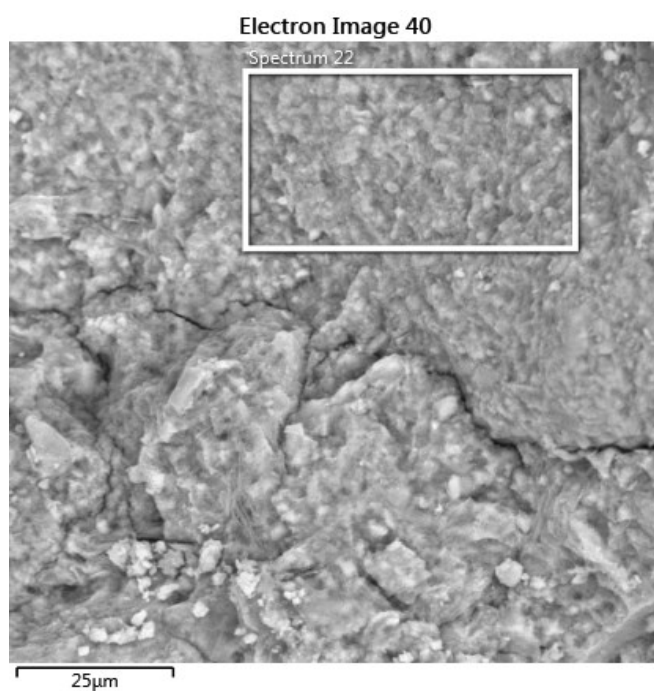


Figura 48: Scansione SEM del Getto 3 "Spectrum 22"

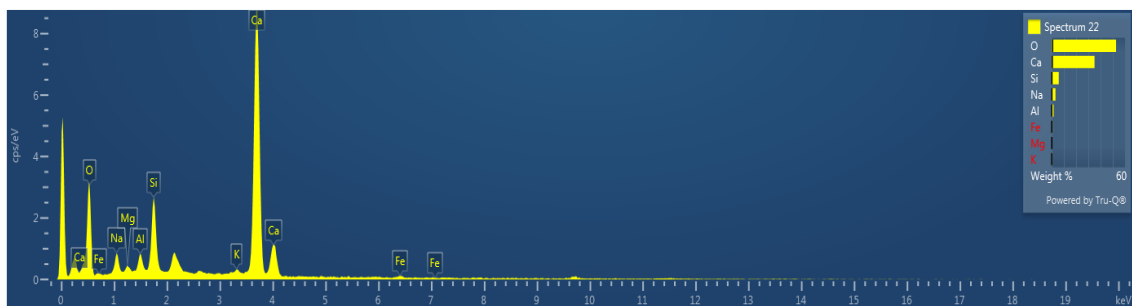


Figura 49: Diffratogramma del Getto 3 "Spectrum 22"

Tabella 23: Risultati SEM+EDX del Getto 3 "Spectrum 22"

Spectrum 22	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
O	K series	11,97	0,04027	52,62	0,77	71,27
Na	K series	1,09	0,00458	3,13	0,24	2,95
Mg	K series	0,19	0,00128	0,61	0,14	0,55
Al	K series	0,59	0,00423	1,58	0,14	1,27
Si	K series	2,4	0,01903	5,78	0,19	4,46
K	K series	0,26	0,00218	0,47	0,1	0,26
Ca	K series	17,54	0,15669	35,07	0,6	18,96
Fe	K series	0,29	0,00291	0,74	0,17	0,29
Total				100		100

Questo punto fa registrare un netto picco di Calcio, pari al 35,07%, a fronte di un calo del Silicio (5,78%). Lo spettro evidenzia l'idratazione della frazione di cemento Portland inserita nell'impasto, la quale genera composti ricchi di calcio che si affiancano al gel principale.

Nel Getto 4, il sistema legante ibrido viene unito con il 100% di aggregato riciclato da matrici attivate alcalinamente (Sand AAM). L'indagine EDX mette in luce una minore omogeneità della struttura:

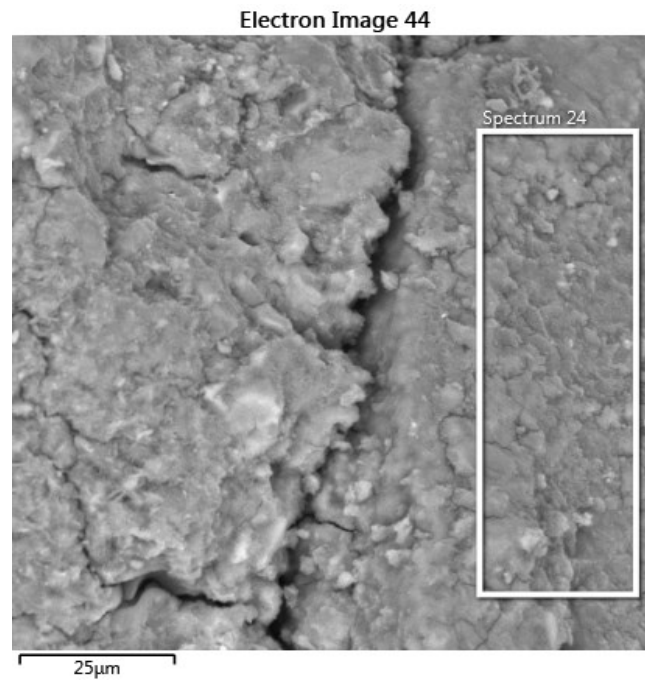


Figura 50: Scansione SEM del Getto 4 "Spectrum 24"

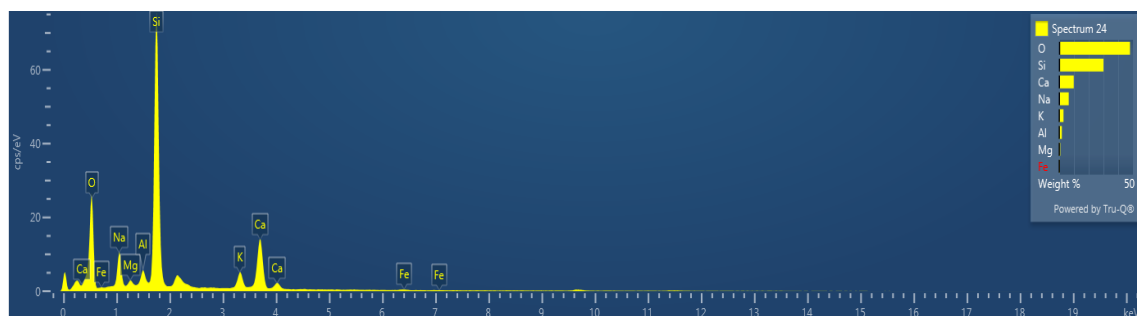


Figura 51: Diffrattogramma del Getto 4 "Spectrum 24"

Tabella 24: Risultati indagini SEM+EDX del Getto 4 "Spectrum 24"

Spectrum 24	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
O	K series	97,97	0,32967	47,97	0,27	62,87
Na	K series	16,29	0,06875	6,46	0,11	5,89
Mg	K series	1,57	0,0104	0,76	0,06	0,66
Al	K series	4,16	0,02988	1,76	0,06	1,37
Si	K series	75,94	0,60178	29,97	0,18	22,38
K	K series	7,89	0,06684	2,88	0,06	1,55
Ca	K series	26,42	0,23609	9,87	0,1	5,17
Fe	K series	0,76	0,00761	0,33	0,06	0,12
Total				100		100

Questo punto mostra una zona anomala ad altissimo contenuto di Silicio (29,97%) e Sodio (6,46%). Tale accumulo indica una non perfetta distribuzione degli attivatori o la presenza di frazioni vitree non reagite ereditate dall'inerte di recupero.

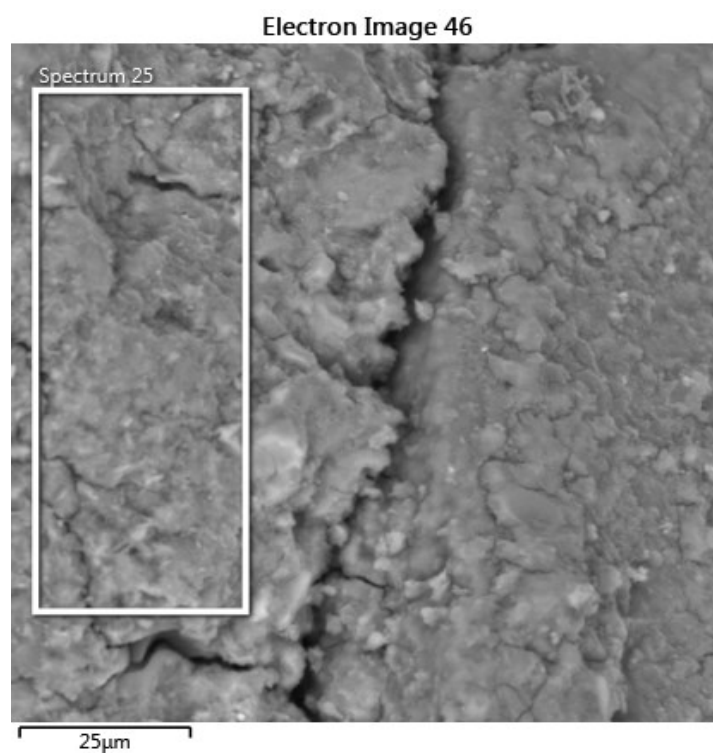


Figura 52: Scansione SEM del Getto 4 "Spectrum 25"

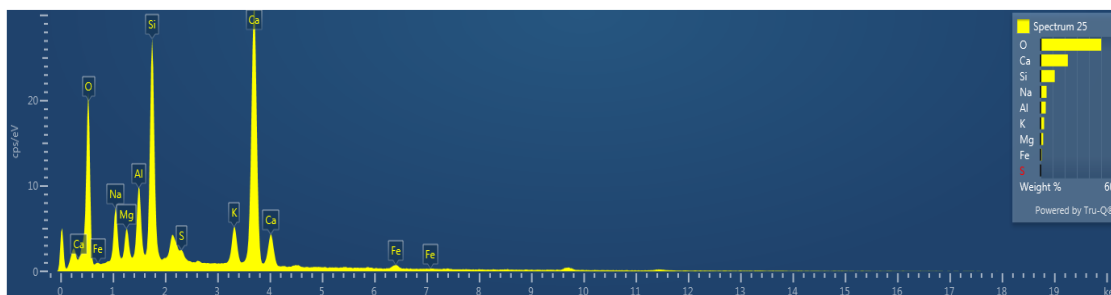


Figura 53: Diffrattogramma del Getto 4 "Spectrum 25"

Tabella 25: Risultati indagini SEM+EDX del Getto 4 "Spectrum 25"

Spectrum 25	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
O	K series	76,78	0,25838	50,17	0,31	66,99
Na	K series	10,61	0,04479	5,01	0,11	4,65
Mg	K series	4,04	0,0268	2,21	0,07	1,94
Al	K series	8,97	0,06441	4,3	0,08	3,41
Si	K series	26,09	0,20676	11,73	0,11	8,92
S	K series	0,37	0,00322	0,16	0,05	0,11
K	K series	8,3	0,0703	2,95	0,06	1,61
Ca	K series	60,03	0,53637	22,56	0,17	12,03
Fe	K series	2	0,02003	0,91	0,07	0,35
Total				100		100

Campionato sulla matrice, mostra valori standard di Calcio (22,56%) e Silicio (11,73%), ma evidenzia una struttura meno uniforme rispetto al corrispettivo Getto 1 a sola loppa

Il Getto 5 unisce il legante ibrido alla combinazione dei due aggregati di recupero (Sand AAM e Sand RCA). La microanalisi EDX evidenzia gli squilibri chimici più marcati dell'intera campagna:

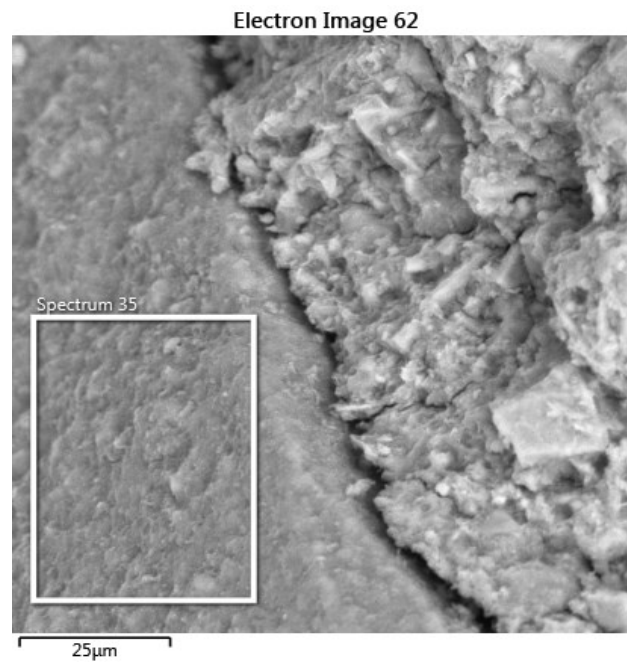


Figura 54: Scansione SEM del Getto "Spectrum 35"

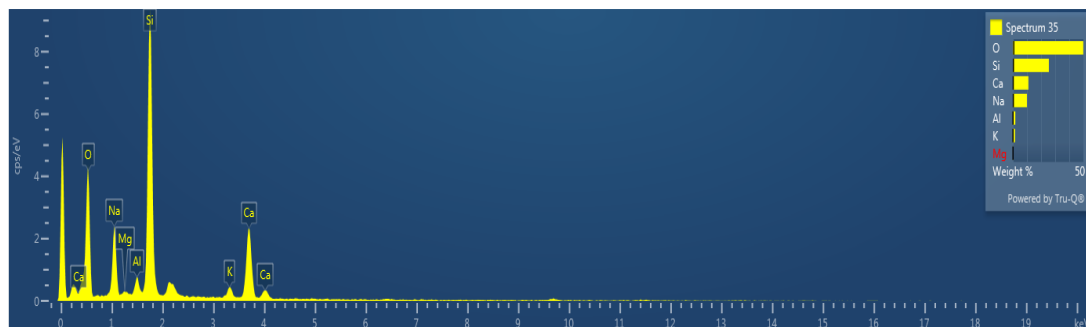


Figura 55: Diffattogramma del Getto 5 "Spectrum 35"

Tabella 26: Risultati indagini SEM+EDX del Getto 5 "Spectrum 35"

Spectrum 35	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
O	K series	16,1	0,05419	49,94	0,68	64,3
Na	K series	3,75	0,01585	9,96	0,32	8,92
Mg	K series	0,1	0,00065	0,34	0,14	0,29
Al	K series	0,59	0,00423	1,73	0,14	1,32
Si	K series	9,43	0,07474	25,54	0,42	18,73
K	K series	0,62	0,00527	1,5	0,12	0,79
Ca	K series	4,48	0,04002	10,99	0,26	5,65
Total				100		100

Registra un picco di Sodio insolito e molto elevato, pari al 9,96%, associato a un forte tenore di Silicio (25,54%). Questo sbilanciamento è il segno di un accumulo di attivatore non reagito o di silicati liberi concentrati all'interfaccia con i granuli porosi di recupero.

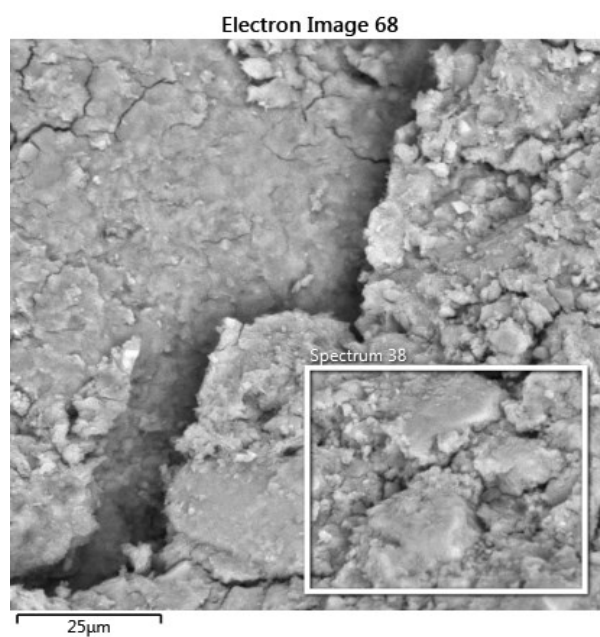


Figura 56: Scansione SEM del Getto 5 "Spectrum 38"

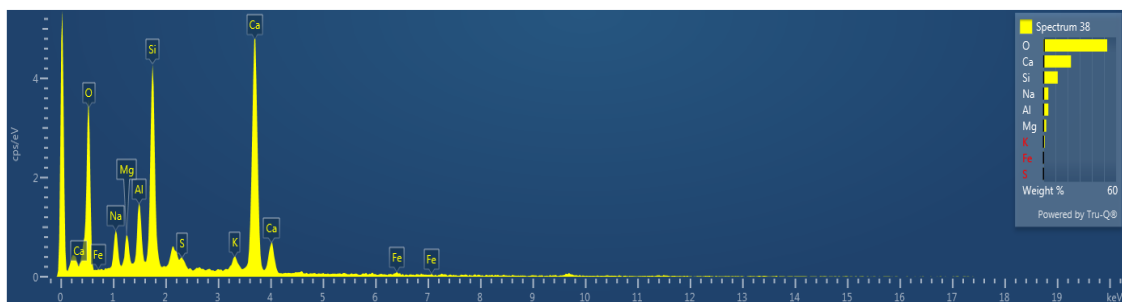


Figura 57: Diffrattogramma del Getto 5 "Spectrum 38"

Tabella 27: Risultati indagini SEM +EDX del Getto 5 "Spectrum 38"

Spectrum 38	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %
O	K series	13	0,04375	52,61	0,75	69,04
Na	K series	1,36	0,00576	4,18	0,26	3,82
Mg	K series	0,69	0,00454	2,4	0,19	2,07
Al	K series	1,35	0,00969	4,16	0,2	3,24
Si	K series	4,12	0,03263	11,9	0,29	8,89
S	K series	0,11	0,00096	0,31	0,12	0,2
K	K series	0,48	0,00409	1,1	0,12	0,59
Ca	K series	9,47	0,08458	22,78	0,43	11,93
Fe	K series	0,19	0,00193	0,57	0,16	0,21
Total				100		100

Questa zona mappa la pasta legante distante dalle anomalie, mostrando valori stabili di Calcio (22,78%) e Silicio (11,90%) che indicano la frazione di loppa correttamente attivata.

5. CONCLUSIONI

L'attività sperimentale sviluppata in questo lavoro, inserita all'interno del progetto europeo "RECONSTRUCT", ha permesso di analizzare la fattibilità tecnica dell'impiego di aggregati riciclati da demolizione all'interno di matrici cementizie innovative a basso impatto ambientale. L'intera campagna condotta sulle malte indurite delinea un quadro chiaro e coerente, nel quale le prove macro-meccaniche di flessione e compressione hanno trovato un perfetto riscontro analitico nei dati geometrici della porosimetria MIP e nelle risultanze chimico-morfologiche dell'analisi SEM-EDX. Attraverso questo approccio multi-scala, il comportamento macroscopico meccanico delle miscele è stato correlato direttamente alle caratteristiche microstrutturali della pasta indurita, offrendo risposte scientifiche riguardo l'interazione tra la tipologia di legante alternativo e la mineralogia degli inerti di recupero. I risultati raccolti dimostrano complessivamente che i sistemi a base di sola loppa traggono un enorme beneficio dall'introduzione dell'aggregato riciclato attivato alcalinamente (Sand AAM), il quale garantisce un'ottima ottimizzazione granulometrica e una perfetta interfaccia con la matrice, superando persino le prestazioni dei getti realizzati con inerti naturali calcareo-dolomitici. Al contrario, nei sistemi leganti ibridi la coesistenza del cemento Portland e dell'attivatore genera interferenze chimiche locali che penalizzano lo sviluppo del gel in presenza di aggregati di recupero, traducendosi in strutture più porose e meccanicamente meno performanti.

Scendendo nel dettaglio delle singole miscele, l'eccellente comportamento del Getto 1, confezionato con il 100% di Sand AAM, ha fatto registrare le prestazioni più elevate dell'intera campagna sperimentale, raggiungendo una resistenza a compressione di

43,97 MPa a 28 giorni e un ulteriore consolidamento fino a 48,47 MPa a 90 giorni. A scala microscopica, questo straordinario incremento trova una spiegazione diretta nei dati di porosimetria MIP, che hanno mostrato un netto affinamento dei pori con un diametro modale ridotto a soli 0,0073 μm . L'indagine EDX ha confermato che tale compattezza è legata alla perfetta affinità chimica tra l'aggregato di recupero attivato e la nuova pasta, una sinergia che promuove la formazione di un gel C-A-S-H continuo e denso, eliminando le zone di transizione interfacciale deboli tipiche delle miscele ordinarie. Di fondamentale importanza è il confronto con i Getti A e B realizzati con inerti naturali ottimizzati secondo la curva di Bolomey: il distacco prestazionale di oltre 14 MPa a favore del Getto 1 dimostra scientificamente come i materiali di recupero ad attivazione alcalina non rappresentino semplicemente un'alternativa ecologica a basso impatto, ma siano in grado di innalzare i requisiti prestazionali strutturali rispetto agli standard estrattivi tradizionali. Questo potenziale si estende anche all'impiego di sistemi combinati riciclati, come dimostrato dal comportamento del Getto 2, composto al 50% da Sand AAM e al 50% da Sand RCA. Questa formulazione ha confermato una piena sostenibilità strutturale attestandosi a 35,02 MPa a 28 giorni; la microanalisi ha messo in luce che la vecchia pasta di cemento ordinario aderente ai granuli di RCA introduce sì una leggera disomogeneità locale, ma senza compromettere la stabilità del gel di fondo. Al contrario, tale interferenza fisica giustifica l'elevato valore dell'area superficiale specifica dei pori riscontrato alla prova MIP (15,790 m^2/g), indice di un network di vuoti fortemente ramificato e tortuoso, ideale per incrementare la durabilità del materiale ostacolando la futura penetrazione di agenti aggressivi esterni.

D'altra parte, l'effetto divergente causato dall'introduzione del 10% di cemento Portland nei sistemi leganti ibridi mostra un impatto che varia radicalmente a seconda della geometria e della natura dell'inerte combinato. Nei sistemi con inerte fine naturale, ovvero nel confronto tra il Getto 3 e il Getto 0, l'aggiunta di cemento si rivela decisamente migliorativa, poiché l'idratazione precoce del cemento genera fasi cristalline ricche di calcio che vanno a riempire fisicamente i macro-vuoti causati dal pessimo assortimento granulometrico iniziale della sabbia Esincalce. Al contrario, quando il legante ibrido interagisce con gli inerti riciclati (Getti 4 e 5), si assiste a un decadimento prestazionale. Il Getto 4, ad esempio, subisce un calo di resistenza del 30% rispetto allo speculare Getto 1 a sola loppa, questo andamento è associato a un evidente fenomeno di ingrandimento grossolano dei pori.

In conclusione, i risultati ottenuti da questa sperimentazione sono molto interessanti. La ricerca sui materiali attivati alcalinamente e sul riciclo di questi ultimi rappresenta, nel campo dei materiali da costruzione, una direzione promettente.

La comunità scientifica è incoraggiata a perseguire ulteriori indagini, soprattutto per le due migliori miscele (Getto 1 e Getto 2), per valutarne la durabilità a lungo termine con cicli di degrado accelerato al fine di contribuire al progresso di questa promettente area di studio.

6. RINGRAZIAMENTI

Il termine di questo percorso di studi rappresenta per me un traguardo immenso, carico di significati profondi, forse anche perché non sempre sono riuscito a vivermelo con la serenità che avrei dovuto. Questa tesi non segna soltanto la conclusione di una laurea triennale, ma rappresenta la fine di un terzo della mia vita e una delle poche cose di cui possa sentirmi davvero fiero. Sono stati molti i momenti in cui ho temuto di non farcela, e altrettanti quelli in cui mollare tutto sembrava la via d'uscita più semplice. Ci sono state volte in cui ho preferito dedicarmi al lavoro piuttosto che aprire i libri, e altre in cui ho vissuto affetti e legami importanti che oggi si sono conclusi. Anche a quelle relazioni passate va un mio intimo e velato ringraziamento: ogni storia e ogni persona che ho amato ha lasciato un segno profondo, contribuendo a farmi crescere. Ogni singola esperienza mi ha portato esattamente qui, alla fine di questo lungo viaggio, che non potrei considerare chiuso senza ringraziare chi ha camminato al mio fianco.

Desidero esprimere la mia più sincera gratitudine alla Ing. Alessandra Mobili, relatrice di questa tesi, che mi ha seguito con costante attenzione lungo tutto il percorso del tirocinio e durante le fasi di stesura di questa ricerca sperimentale. Allo stesso modo, ringrazio il correlatore, Prof. Jacopo Donnini, per gli insegnamenti, gli incoraggiamenti e il continuo supporto dimostratomi. Un aiuto cruciale e insostituibile è stato poi quello del dottorando e Ing. Daniele Berdini: con te ho iniziato questo percorso tra i banchi dell'università e alla fine mi hai guidato in ogni mia prova di laboratorio, offrendomi consigli preziosi accompagnati sempre da un sorriso di supporto.

Il ringraziamento più profondo va alla mia famiglia. Grazie a mamma e babbo: non mi avete mai fatto mancare nulla, siete un esempio ideale di amore, una vera rarità ai giorni d'oggi, e siete sempre stati i primi, in assoluto, a credere in me e a sostenermi in qualsiasi cosa facessi. Un ringraziamento speciale e una dedica profonda vanno ai miei nonni, radici e pilastri fondamentali della mia vita: a Domenico, Maria e Giuseppe esprimo tutta la mia gratitudine per l'affetto incondizionato, la presenza costante e la saggezza che continuano a trasmettermi ogni giorno; a nonna Gianna, che non potrà vedermi indossare questa corona d'alloro ma che sento vicina, dedico l'emozione di questo passo, certo che ovunque sia stia gioendo insieme a me. Grazie anche ai miei fratelli Daniele, Lorenzo e Matteo: è una fortuna immensa avervi accanto e, anche se non ce lo diciamo mai abbastanza, vi voglio bene e vi ringrazio per aver quasi sempre creduto in me. Infine, non posso non ringraziare l'ultimo arrivato, il piccolo Tommy in questi 4 mesi di vita ha portato un'ondata di gioia in tutta la nostra famiglia.

Ai miei amici va il merito di avermi sempre spronato e spinto a continuare, anche quando la stanchezza prendeva il sopravvento. Ringrazio chi c'è oggi a festeggiare, ma anche chi non ha potuto esserci: ogni persona incontrata lungo la strada mi ha lasciato un insegnamento, arricchendo il mio bagaglio personale. Un grazie sincero va anche alla "Croce del Sud": dopo giornate intense e sfiancanti di lavoro, ho sempre saputo di poter trovare un rifugio, una birra pronta e una seconda casa tra le mura di quel chiosco demmè.

7. INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Passanti cumulativi Prova Granulometrica	24
Tabella 2: Massa Volumica Sand AAM	28
Tabella 3: Massa volumica Sabbia Silicea.....	28
Tabella 4: Massa volumica Aggregato Dolomitico.....	28
Tabella 5: Prova del castelletto della sabbia silicea	31
Tabella 6: Costruzione della curva ideale di Bolomey Getto A	33
Tabella 7: Costruzione della curva ideale Bolomey Getto B.....	34
Tabella 8: (sinistra) Mix Design Getto 0 - Getto 5; (destra) Mix Design Getto A e B	35
Tabella 9: Classi di consistenza delle malte secondo la norma UNI EN 1015- 3:2007	41
Tabella 10: Risultati completi Slump test	43
Tabella 11: Risultati Massa volumica, Resistenza a flessione e a compressione a 2 giorni di stagionatura	54
Tabella 12: Risultati Massa volumica, Resistenza a flessione e a compressione a 7 giorni di stagionatura	55
Tabella 13: Risultati Massa volumica, Resistenza a flessione e a compressione a 28 giorni di stagionatura.....	56
Tabella 14: Risultati Massa volumica, Resistenza a flessione e a compressione a 90 giorni di stagionatura.....	57
Tabella 15: Risultati prove porosimetriche.....	70
Tabella 16: Risultati indagini SEM+EDX del Getto 0 "Spectrum 1"	77
Tabella 17: Risultati indagini SEM+EDX del Getto 0 "Spectrum 2"	78
Tabella 18: Risultati indagini SEM+EDX del Getto 1 "Spectrum 4"	80
Tabella 19: Risultati indagini SEM+EDX del Getto 1 "Spectrum 6"	81
Tabella 20: Risultati indagini SEM+EDX del Getto 2 "Spectrum 12"	83
Tabella 21: Risultati indagini SEM +EDX del Getto 2 "Spectrum 17".....	84
Tabella 22: Risultati indagini SEM+EDX del Getto 3 "Spectrum 21"	86
Tabella 23: Risultati SEM+EDX del Getto 3 "Spectrum 22"	87
Tabella 24: Risultati indagini SEM+EDX del Getto 4 "Spectrum 24"	89
Tabella 25: Risultati indagini SEM+EDX del Getto 4 "Spectrum 25"	90
Tabella 26: Risultati indagini SEM+EDX del Getto 5 "Spectrum 35"	92
Tabella 27: Risultati indagini SEM +EDX del Getto 5 "Spectrum 38".....	93

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] United Nations Environment Programme (2025). Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025: *Not just another brick in the wall - The solutions exist. Scaling them will build on progress and cut emissions fast*. Paris.
- [2] United Nations Environment Programme (UNEP), *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*, Nairobi: UNEP, 2022.
- [3] International Energy Agency (IEA), *Cement – Analysis*, Paris: IEA, 2023.
- [4] M. Amran, N. Makul, R. Fediuk, Y. H. Lee, N. I. Vatin, Y. Yee Long, K. Mohammed, "Global carbon recoverability experiences from the cement industry," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 17, art. e01439, 2022.
- [5] J. S. J. Van Deventer, J. L. Provis, P. Duxson, D. G. Brice, "Chemical research and climate change as drivers in the commercial adoption of alkali activated materials," *Waste and Biomass Valorization*, vol. 1, no. 1, pp. 145–155, 2010.
- [6] J. L. Provis, J. S. J. Van Deventer, *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report*, RILEM TC 224-AAM, Dordrecht: Springer, 2015.
- [7] H. Kühl, "Slag cement and process of making the same," *US Patent 900,939*, 1908.
- [8] A. O. Purdon, "The action of alkalis on blast-furnace slag," *Journal of the Society of Chemical Industry*, vol. 59, pp. 240-251, 1940.
- [9] V. D. Glukhovskiy, *Gruntosilikaty (Soil Silicates)*, Kiev: Gosstroyizdat, 1959.

- [10] G. Masi, S. Manzi, M. C. Bignozzi, "Gender Balance in Construction Material Research: The Analysis of Alkali-Activated Materials by a Bibliometric Study Using Scopus Database," *Frontiers in Materials*, vol. 7, art. 572514, 2020.
- [11] J. Davidovits, "Why Alkali-Activated Materials (AAM) are Not Geopolymers," *Technical Paper #25*, Geopolymer Institute Library, 2018.
- [12] B. Ren, Y. Zhao, H. Bai, S. Kang, T. Zhang, S. Song, "Eco-friendly geopolymer prepared from solid wastes: A critical review," *Chemosphere*, vol. 267, art. 128900, 2021.
- [13] J. Yang, X. He, "Durability and sustainability of cement and concrete composites," *Materials*, vol. 16, no. 16, art. 5693, 2023.
- [14] H. S. Gökçe, "Durability of slag-based alkali-activated materials: A critical review," *Journal of the Australian Ceramic Society*, 2024.
- [15] D. Khale, R. Chaudhary, "Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: a review," *Journal of Materials Science*, vol. 42, no. 9, pp. 1120-1135, 2007.
- [16] A. A. Aliabdo, M. Abd Elmoaty, H. A. Salem, "Effect of water addition, plasticizer and alkaline solution constitution on fly ash based geopolymer concrete performance," *Construction and Building Materials*, vol. 121, pp. 694–703, 2016.
- [17] B. Walkley, J. G. Sanjayan, "Reactions and strength development in alkali-activated slag and fly ash binders with increasing silicate activation," *Cement and Concrete Research*, vol. 72, pp. 10–21, 2015.

- [18] 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," *Frontiers in Materials*, vol. 6, art. 45, 2019.
- [19] A. Battaglia, L. Barbieri, "L'impatto ambientale del processo cloro-soda: aspetti energetici e implicazioni," *Chimica & Industria*, vol. 98, pp. 20–27, 2016.
- [20] E. N. Kani, A. Allahverdi, "Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan," *Ceramics International*, vol. 38, pp. 4085–4092, 2012.
- [21] H. Maghsoodloorad, A. Allahverdi, "Efflorescence formation and control in alkali-activated phosphorus slag cement," *International Journal of Civil Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 425–438, 2016.
- [22] R. R. Lloyd, J. L. Provis, J. S. J. Van Deventer, "Microscopy and microanalysis of inorganic polymer cements," *Microscopy and Microanalysis*, vol. 15, pp. 1–12, 2009.
- [23] M. Sivasakthi, R. Jeyalakshmi, N. P. Rajamane, "Effect of change in the silica modulus of sodium silicate solution on the microstructure of fly ash geopolymers," *Journal of Building Engineering*, vol. 44, art. 102939, 2021.
- [24] Leong, Hsiao Yun; ONG, Dominic Ek Leong; Sanjayan, Jay G.; Nazari, Ali. *The effect of different Na₂O and K₂O ratios of alkali activator on compressive strength of fly ash based-geopolymer*. Construction and Building Materials, 2016, vol. 110, pp.114-123.