

Antonio Colella Relatrice: Paola Palmero Correlatore: Giuseppe Ferrara

Il Cemento di Domani





**Politecnico
di Torino**

POLITECNICO DI TORINO

Facoltà di Architettura

Corso di Laurea Magistrale
in Architettura per la Sostenibilità

anno accademico: 2025/2026

Il Cemento di Domani

Valorizzazione delle scorie di acciaieria tramite carbonatazione acquosa per la decarbonizzazione del settore del cemento

Tesi di Laurea Magistrale

Sessione di Luglio 2026

Candidato:

Antonio Colella - s333477

Relatore: Prof.ssa Paola Palmero
Correlatore: Dott. Giuseppe Ferrara

A mamma e papà,

Indice:

01) Il cemento: ieri, oggi e domani

1.1) Il calcestruzzo nel mondo dell'architettura

1.2) Malte e calcestruzzi

1.2.1) Leganti aerei e leganti idraulici

1.2.2) Il cemento: cos'è e come viene prodotto

1.3) I sottoprodotti: punti di forza e criticità

1.4) Obiettivi per il 2050

02) Gli SCMs attuali, emergenti e futuri

2.1) Gli SCMs attuali

2.2) Gli SCMs emergenti

2.3) Gli SCMs futuri

03) La Carbonatazione: da problema a risorsa

3.1) La carbonatazione passiva

3.2) La carbonatazione diretta

3.2.1) La carbonatazione diretta in fase di miscelazione del calcestruzzo fresco

3.2.2) La carbonatazione intesa come stagionatura accelerata

3.3) Quando conviene la carbonatazione accelerata: il rischio di Carbon leakage e l'introduzione del CBAM

3.4) Demolizione circolare e carbonatazione passiva: trasformare le macerie da rifiuto a pozzo di carbonio

3.4.1) Un nuovo modello economico: premiare il corretto conferimento delle macerie

3.4.2) Realtà attuale e prospettive future

04) Attività Sperimentale

4.1) La preparazione delle polveri

4.2) Test effettuati

4.3) Prove meccaniche

4.4) Risultati ottenuti

05) Applicazioni industriali

5.1) MCI Carbon

5.2) Heidelberg Materials

5.3) Neustark

5.4) CarbiCrete

Conclusioni

Il cemento: ieri, oggi e domani

Il primo capitolo affronta l'evoluzione del cemento, dalla scoperta della pozzolana fino ai giorni nostri. L'ultima parte è dedicata all'utilizzo dei sottoprodotti nei cementi odierni e su quali sono gli obiettivi che questo settore si è prefissato al 2050 per provare a raggiungere la neutralità carbonica.

01) Il cemento: ieri, oggi e domani

1.1) Il calcestruzzo nel mondo dell'architettura

1.2) Malte e calcestruzzi

1.2.1) Leganti aerei e Leganti idraulici

1.2.2) Il cemento: cos'è e come viene prodotto

1.3) I sottoprodotti: punti di forza e criticità

1.4) Obiettivi per il 2050

1.1) Il Calcestruzzo nel mondo dell'architettura

Nella preistoria, prima dell'avvento delle malte, l'architettura si basava sulla semplice sovrapposizione di grandi blocchi di pietra, la cui stabilità dipendeva esclusivamente dalla gravità e dall'attrito.

I primi leganti utilizzati, come il gesso e la calce aerea, avevano un limite fondamentale: erano “aerei”, ovvero capaci di indurire solo a contatto con l'aria e non erano in grado di resistere all'azione dilavante dell'acqua. Questo limitava notevolmente le possibilità costruttive, rendendo le malte inadatte per opere idrauliche o esposte alle intemperie.

La vera rivoluzione avvenne in epoca romana con la scoperta della pozzolana (o pulvis Puteolana) che rappresenta una delle invenzioni cruciali nella storia dei materiali da costruzione. Per capirne la portata viene riportato un passo del “De Architectura” di Marco Vitruvio Pollione:

“esiste una specie di polvere chiamata pozzolana che per natura possiede qualità straordinarie. Si trova nella Baia di Napoli e nelle terre circostanti il Vesuvio. Questa polvere, mescolata con calce e sabbia rende la muratura talmente stabile che questa indurisce non solo negli edifici normali, ma anche sotto l'acqua”.

I Romani scoprirono che questa sabbia vulcanica, se miscelata con la calce, conferiva alla malta la capacità di indurire anche sott'acqua e di sviluppare una maggiore resistenza meccanica. In questo contesto, si potrebbe definire pozzolanica una sabbia speciale capace di trasformare una malta da aerea in idraulica nonostante il legante impiegato sia di per sé aereo.

Oggi siamo in grado di definire che questo effetto è dovuto alla presenza, nella pozzolana, di Silice e Allumina reattive nei confronti della calce per il loro stato amorfo e vetroso. Inoltre, i Romani intuirono che, laddove non esistevano giacimenti naturali di lava vulcanica, lo stesso effetto si sarebbe potuto ottenere andando a sostituire la pozzolana di origine vulcanica con argilla cotta macinata in forma di mattoni o tegole finemente macinate (cocciopesto)^[1]. La scoperta delle malte idrauliche portò alla produzione del cosiddetto calcestruzzo romano e generò trasformazioni tecnologiche epocali. Questo nuovo materiale (denominato opus caementitium) gettato in casseforme permise di superare il sistema trilitico per creare archi, volte e cupole di dimensioni fino all'ora impensabili oltre che di costruire porti, ponti e acquedotti durevoli grazie alla sua resistenza all'acqua.

Nel corso dei secoli non vi furono sostanziali stravolgimenti nell'utilizzo della tecnica del calcestruzzo e le malte continuarono ad essere impiegate come legante per le murature in pietra e laterizio.

Tra la fine del '700 e l'inizio dell'800, i lavori di ricerca di scienziati francesi come Lavoisier, Vicat e Le Chatelier e di tecnici britannici come Parker, Frost e Aspdin segnarono la transizione definitiva dai leganti antichi alla moderna ingegneria dei materiali, rivoluzionando per sempre le tecnologie costruttive.

A seguito delle suddette ricerche, il contenuto di argilla fu aumentato da circa il 10% fino al 40% con miscele artificiali di calcare ed argilla da inviare al forno di cottura per ottenere prodotti che vanno dalla calce idraulica al cemento. Grazie a questo incremento nelle proporzioni delle due materie prime si aumentò il contenuto di silicati e alluminati di calcio con un relativo incremento della resistenza meccanica del materiale^[1].

Il 21 ottobre 1824 Joseph Aspdin depositò il brevetto del suo nuovo materiale: il cemento *Portland*. Il nome “Portland” fu scelto per la somiglianza del colore finale del materiale indurito con la pregiata pietra da costruzione estratta sull'isola di Portland, nel Dorset.

Inizialmente, Aspdin non aveva evidenziato l'importanza della temperatura di cottura per aumentare le percentuali dei silicati e degli alluminati. Sarà il britannico I. C. Johnson a capirne l'importanza e ad aumentare la temperatura di cottura della calce e dell'argilla ben oltre i 900°C per combinare tutta la calce in silicati e alluminati di calcio.

L'ingegnere francese Louis Vicat definì in seguito, in modo netto e scientificamente corretto, la distinzione tra:

- **Calce idraulica**, che necessita dello spegnimento con acqua per convertire tutto l'ossido di calcio libero in idrossido di calcio
- **Cemento Portland**, il cui prodotto (denominato “clinker”) prima di essere impiegato, non richiede alcun trattamento di spegnimento per l'assenza di calce libera. Infine, al clinker viene aggiunto il gesso che serve a rallentare la presa dopo la miscelazione del cemento con l'acqua^[1].

Sarà soltanto a partire dalla fine dell'800 che il cemento Portland iniziò a svilupparsi a pieno. Le ricerche condotte dal chimico francese Le Chatelier portarono alla scoperta della presenza nel cemento Portland di composti di fondamentale importanza come:

- I **Silicati**, bicalcico e tricalcico, responsabili del buon comportamento meccanico delle malte e dei calcestruzzi
- Gli **alluminati**, tricalcico e ferro-alluminato tetracalcico^[1].

Nel corso del Novecento, il calcestruzzo armato divenne il materiale da costruzione per eccellenza, andando a rappresentare uno dei pilastri fondamentali nella ricerca linguistica e compositiva del movimento moderno. Inoltre, nell'ambito della ricostruzione post-bellica, si dimostrò un alleato essenziale. La sua economicità e il suo rapido utilizzo furono infatti fondamentali nel dare una risposta concreta a una domanda di abitazioni che, in termini quantitativi, non aveva mai avuto precedenti.

1.2) Malte e calcestruzzi

Calcestruzzi e malte sono costituiti da una miscela di leganti, aggregati, additivi e acqua nella giusta proporzione a seconda delle prestazioni richieste.

In particolare, come definito dalla Normativa Europea UNI EN 206, il calcestruzzo è un materiale da costruzione ottenuto dalla miscelazione omogenea di legante idraulico (tipicamente cemento, conforme alla UNI EN 197-1), aggregati (sabbia e ghiaia di diverse dimensioni), acqua, eventuali additivi e/o aggiunte (come materiali inorganici fini, quali ceneri volanti o fumo di silice). La suddetta normativa, inoltre, non si limita a definire la composizione del materiale ma stabilisce anche i requisiti prestazionali che il prodotto deve soddisfare identificando sei distinte classi di resistenza basate sulla resistenza minima garantita in N/mm2 (o Mpa) misurata a 28 giorni.

Le classi di resistenza sono le seguenti:

Classe (Simbolo)	Resistenza Iniziale Minima	Resistenza Finale
32,5 R	$\geq 16,0 \text{ N/mm}^2$	$\geq 32,5 \text{ N/mm}^2$; $\leq 52,5 \text{ N/mm}^2$
32,5 N	$\geq 10,0 \text{ N/mm}^2$	$\geq 32,5 \text{ N/mm}^2$; $\leq 52,5 \text{ N/mm}^2$
42,4 R	$\geq 20,0 \text{ N/mm}^2$	$\geq 42,5 \text{ N/mm}^2$; $\leq 62,5 \text{ N/mm}^2$
42,5 N	$\geq 10,0 \text{ N/mm}^2$	$\geq 42,5 \text{ N/mm}^2$; $\leq 62,5 \text{ N/mm}^2$
52,5 R	$\geq 30,0 \text{ N/mm}^2$	$\geq 52,5 \text{ N/mm}^2$; -
52,5 N	$\geq 20,0 \text{ N/mm}^2$	$\geq 52,5 \text{ N/mm}^2$; -

Tab.1: Classi di resistenza dei cementi comuni afferenti alla Normativa Europea UNI EN 197-1.
*La resistenza iniziale minima viene misurata a 7 giorni; la resistenza finale a 28 giorni.

Le lettere N o R, riportate nella tabella 1, indicano rispettivamente:

- N (Normale)**: sviluppo di resistenza più lento nelle prime fasi, ma offre maggiore lavorabilità e un minor calore di idratazione.
- R (Rapido)**: sviluppo di resistenza veloce, ideale quando è necessario disarmare rapidamente o in condizioni di bassa temperatura.

La Normativa Europea UNI EN 998, invece, disciplina e definisce le malte preconfezionate come una miscela di uno o più leganti inorganici (es: calce, cemento), aggregati (tipicamente sabbia), acqua ed eventuali aggiunte e/o additivi. La principale differenza tra questi due composti sta nelle dimensioni massime

degli aggregati, che ne determinano poi la funzione strutturale. Gli aggregati si suddividono infatti in due macrocategorie:

- Aggregati Fini (sabbia)**: granulometria fino a circa 4 mm.
- Aggregati Grossolani (Ghiaia o Pietrisco)**: granulometria superiore a 4 mm.

Per quanto riguarda il calcestruzzo la dimensione degli aggregati varia generalmente tra i 16 mm e i 32 mm, che in alcuni casi specifici, può scendere a 8 mm fino a un massimo di 64 mm. Per le malte, invece, la dimensione degli aggregati è molto ridotta rispetto al calcestruzzo, parliamo infatti di una granulometria massima di 4 mm.

1.2.1) Leganti aerei e leganti idraulici

I leganti rappresentano dei materiali ottenuti in seguito alla cottura di materiali di origine minerale. Se mescolati con acqua, danno vita ad un impasto capace di indurire aderendo in maniera irreversibile alle superfici con le quali entrano in contatto. Una grande differenziazione dei materiali leganti consiste nella suddivisione in:

- **Leganti aerei** (quali gesso e calce aerea), ovvero impasti che induriscono e fanno presa solo in presenza di aria.
- **Leganti idraulici** (quali calce idraulica e cemento), ovvero impasti che induriscono e fanno presa anche in presenza di acqua.

In seguito, verrà approfondito il cemento, oggetto del presente lavoro di tesi.

1.2.2) Il cemento: cos'è e come viene prodotto

Come definito dalla Normativa UNI-EN-197-1, Il cemento è un legante idraulico, cioè un materiale inorganico finemente macinato che, quando mescolato con acqua, forma una pasta che fa presa e indurisce a seguito di reazioni e processi di idratazione e che, una volta indurito, mantiene la sua resistenza e stabilità anche sott'acqua.

Il cemento conforme alla Normativa UNI-EN-197-1, definito cemento CEM, opportunatamente dosato e miscelato con aggregato e acqua, deve essere in grado di produrre un calcestruzzo o una malta capace di conservare la lavorabilità per un periodo di tempo sufficiente e di raggiungere, dopo determinati periodi, livelli di resistenza meccanica prestabiliti nonché di possedere una stabilità di volume a lungo termine.

L'indurimento idraulico del cemento CEM è dovuto principalmente all'idratazione dei silicati di calcio, ma anche altri composti chimici, per esempio gli alluminati, possono partecipare al processo di indurimento. La somma delle proporzioni di Ossido di Calcio reattivo (CaO) e di biossido di silicio reattivo (SiO₂) nel cemento CEM deve essere almeno il 50% in massa quando i contenuti percentuali sono determinati in conformità alla EN 196-2.

La produzione di cemento Portland si sviluppa nei seguenti passaggi (Fig.1):

- Estrazione delle materie prime:

Gli impianti di cemento sono solitamente situati in prossimità di cave dove vi è disponibilità di materiali naturali come calcare, marna, gesso e argilla che forniscono composti come l'ossido di calcio, l'ossido di silicio, l'ossido di alluminio, l'ossido di ferro e l'ossido di magnesio.

- Frantumazione:

Le materie prime, una volta estratte dalla cava, vengono sottoposte a una prima frantumazione per ridurne le dimensioni.

- Macinazione a crudo e omogenizzazione:

In seguito alla frantumazione, le materie prime vengono miscelate e macinate insieme per produrre la "farina cruda". Al fine di garantire un'elevata qualità del cemento, la composizione chimica della materia prima che ne deriva viene monitorata e controllata con la massima attenzione. La farina raggiungerà una finezza tale (tipicamente sempre sotto i 160 micrometri) da permettere che il materiale sia reattivo, ovvero abbia un'elevata capacità di reidratarsi: più il materiale sarà fino, più sarà idratabile.

- Preriscaldamento:

I gas di scarico caldi provenienti dal forno preriscaldano la farina cruda in polvere prima che entri nel forno.

- Precalcinazione:

La precalcinazione è il cuore del moderno processo di cottura del cemento per quanto riguarda l'efficienza energetica e la riduzione delle emissioni legate al calore, è in questa fase che avviene la quasi totalità della decomposizione del calcare.

Il calcare (presente nella farina cruda) viene riscaldato da una fiamma e dai gas di scarico caldi del forno scatenando una reazione chimica che permette al Carbonato di Calcio (CaCO₃) di decomorsi in Ossido di Calcio (CaO) e anidride carbonica (CO₂). Questo rilascio di CO₂ noto come "emissione di processo" rappresenta circa i due terzi delle emissioni totali provenienti dalla produzione di cemento. Costituisce una reazione inevitabile se viene utilizzato il calcare come fonte primaria di calcio; una delle soluzioni a lungo termine per eliminare queste emissioni è la cattura/ stoccaggio/ utilizzo del Carbonio (CCUS *Carbon Capture Utilisation Storage*).

Questa fase di decarbonatazione inizia a temperature significativamente alte, circa 700°C, e procede rapidamente tra 850°C e 1000°C (la temperatura tipica di esercizio di un precalcinatore è intorno ai 900°C).

L'efficienza energetica di questa fase, nodo importantissimo dei moderni impianti di produzione del cemento, sta nello sfruttamento dei gas di scarico che salgono dal forno rotante. Questo recupero di calore rende il processo molto più funzionale, riducendo la quantità di combustibile necessaria nel forno rotante stesso, dove entra un materiale già quasi completamente decarbonatato.

- Produzione di Clinker nel forno rotante:

Il materiale proveniente dal precalcinatore (principalmente CaO e ossidi di silicio e alluminio) entra in un forno speciale costituito da un cilindro (kiln) rotante (Fig.2), disposto orizzontalmente con leggera inclinazione. La temperatura all'interno del cilindro cresce fino a circa 1480°C, tale da permettere che i materiali si decompongano e si aggregino tra loro senza fondere.

A queste altissime temperature, gli ossidi si fondono parzialmente e reagiscono chimicamente tra loro per formare i composti mineralogici del clinker (Silicati, Alluminati e Ferro-alluminati di Calcio). Può avvenire anche una piccola percentuale residua di decarbonatazione se il calcare non è stato completamente decomposto nel precalcinatore.

Per scatenare le suddette reazioni chimiche necessarie, occorre un'elevatissima quantità di calore (1480°C circa) proveniente dalla combustione di combustibili di vario tipo, che porta a ulteriori emissioni di anidride carbonica. Questa tipologia di emissione è nota come "emissione di combustione" e rappresenta circa un terzo delle emissioni totali derivanti dalla produzione di cemento. Alcune soluzioni largamente adottate per ridurre l'impatto derivante dalle emissioni di combustione sono l'aumento dell'efficienza energetica del forno e l'utilizzo di combustibili alternativi (derivanti da rifiuti) o biomasse.

- Raffreddamento Clinker:

Dal forno, il clinker caldo viene raffreddato. I refrigeratori sono fondamentali per la creazione dei minerali del clinker che determinano le prestazioni del cemento.

- **Macinazione e aggiunta di gesso:**

L'aggiunta di gesso è indispensabile e serve a ritardare la presa quando il cemento entrerà a contatto con l'acqua. Grazie al gesso rimarrà fluido per almeno un'ora. In questa fase vengono miscelati anche altri eventuali additivi minerali.

- **Stoccaggio e imballaggio:**

Il prodotto finale viene omogenizzato e immagazzinato in silos di cemento, per poi essere spedito a una stazione di imballaggio.

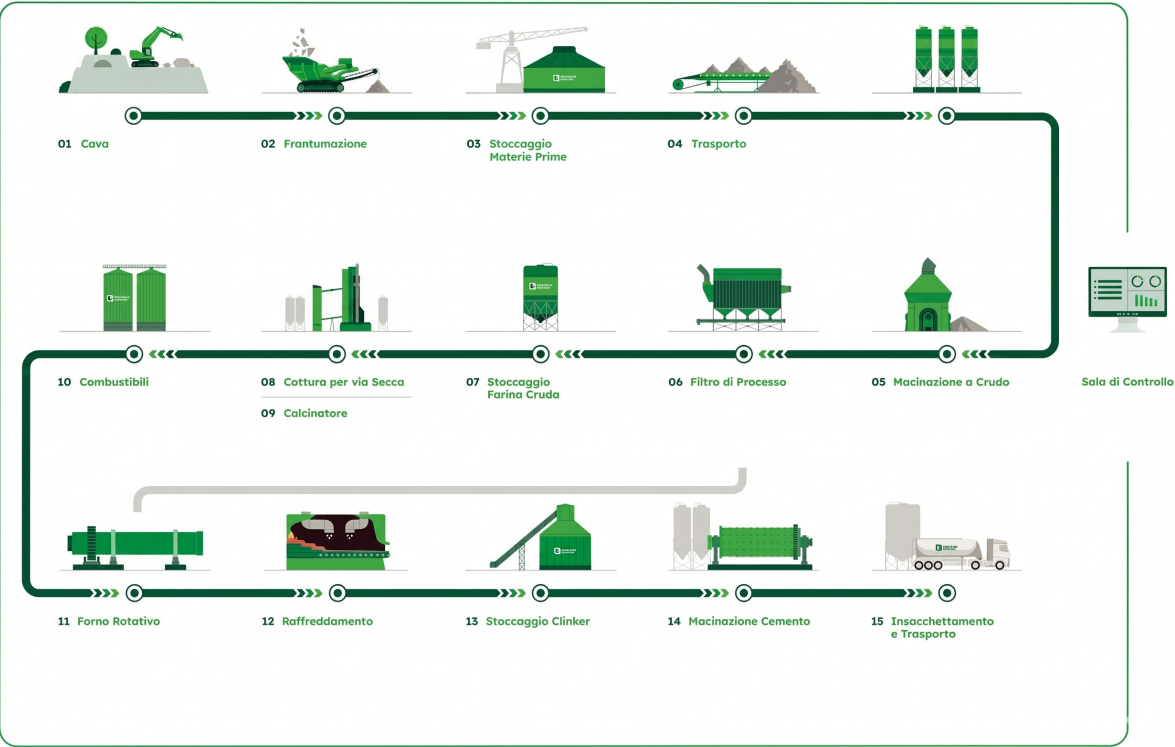


Fig.2: Impianto di produzione Heidelberg Materials, sede: Cagnano Amiterno (AQ)



Fig.3: Impianto di produzione Heidelberg Materials, sede di Cagnano Amiterno (AQ), sala di controllo.

Fig.1: Processo illustrativo produzione del cemento.
Fonte: <https://www.heidelbergmaterials.it/it/alla-scoperta-del-cemento>

1.3) I sottoprodotti: punti di forza e criticità

A partire dal 1824, quando Joseph Aspdin brevettò il Cemento Portland, Il clinker ha rappresentato per anni il principale costituente del cemento. Per oltre un secolo e mezzo, infatti, la tipologia di cemento maggiormente utilizzata è stata quella che oggi, basandoci sulla normativa Europea UNI-EN 197-1, definiamo “CEM I”, ovvero un cemento caratterizzato da una percentuale di clinker pari almeno al 95%. Soltanto a partire dai primi anni 2000 l'industria del cemento, spinta dalla necessità di ridurre le emissioni di CO₂, ha intensificato lo sviluppo di cementi di miscela. Questi prodotti vedono il clinker sostituito parzialmente da sottoprodotti industriali (quali scorie d'altoforno, ceneri volanti, fumi di silice) riducendo la sua componente, in alcuni casi, fino al 5% (CEM III/C). Questi sottoprodotti industriali sono comunemente noti come *SCM (Supplementary Cementitious Materials)* e sono normati dalla normativa Europea UNI EN 197-1, che definisce la composizione, le specifiche e i criteri di conformità per i cementi comuni. I più utilizzati in Unione Europea vengono di seguito riportati nella Tabella 2:

NOME (IT)	NOME TECNICO (EN)	ORIGINE	FUNZIONE/ IMPATTO	TIPI DI CEMENTO	PERCENTUALI DI SOSTITUZIONE
Loppa d'Altoforno (GGBS)	Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS)	Sottoprodotto vetroso della produzione di ghisa (siderurgia)	Eccellente sostituto del clinker (fino al 95% in alcuni cementi). Migliora la durabilità e la resistenza agli attacchi chimici	CEM II: Cemento Portland alla loppa CEM III: Cemento d'altoforno CEM V: Cemento composito	- CEM II/A-S: 6-20 - CEM II/B-S: 21-35 - CEM II/A-M: 12-20 - CEM II/B-M: 21-35 - CEM III/A: 36-65 - CEM III/B: 66-80 - CEM III/C: 81-95 - CEM V/A: 18-30 - CEM V/B: 31-49
Genere Volante Silicea	Fly Ash (FA)	Sottoprodotto della combustione del carbone nelle centrali termoelettriche	Materiale pozzolanico. Migliora la lavorabilità e la resistenza a lungo termine	CEM II: Cemento Portland alle ceneri volanti CEM IV: Cemento Pozzolanic CEM V: Cemento Composito	- CEM II/A-V: 6-30 - CEM II/B-V: 21-35 - CEM II/A-M: 12-20 - CEM II/ B-M: 21-35 - CEM IV/A: 11-35 - CEM IV/B: 45-64 - CEM V/A: 18-30 - CEM V/B: 31-49
Genere Volante Calcareo	Fly Ash (FA)	Sottoprodotto della combustione del carbone nelle centrali termoelettriche	Materiale pozzolanico. Migliora la lavorabilità e la resistenza a lungo termine	CEM II: Cemento Portland alle ceneri volanti CEM IV: Cemento Pozzolanic	- CEM II/A-W: 6-20 - CEM II/B-W: 21-35 - CEM II/A-M: 12-20 - CEM II/ B-M: 21-35 - CEM IV/A: 11-35 - CEM IV/B: 36-55
Fumo di Silice	Silica Fume (SF) or Microsilica	Sottoprodotto della produzione di leghe ferrosilicio o silicio metallico	Materiale pozzolanico altamente reattivo. Utilizzato in piccole quantità per calcestruzzi ad altissime prestazioni	CEM II: Cemento Portland ai fumi di silice. CEM II: Cemento composito CEM IV: Cemento pozzolanico	- CEM II/A-D: 6-10 - CEM II/A-M: 12-20 - CEM II/B-M: 21-35 - CEM IV/A: 11-35 - CEM IV/B: 36-55

Tab.2: Sottoprodotti maggiormente utilizzati in Unione Europea

L'utilizzo degli SCMs ha la duplice funzione di ridurre le emissioni di CO₂ e adottare un approccio circolare con l'utilizzo di materiali secondari provenienti da altre industrie. Oltre ai 3 SCMs maggiormente utilizzati riportati in tabella, vi sono altri costituenti come le pozzolane naturali e l'argilla calcinata che si prestano molto bene come sottoprodotti alternativi alle scorie e alle ceneri volanti. Nonostante possa sembrare una soluzione semplice e facilmente adottabile ovunque, vi sono delle sfide significative legate alla sostituzione del clinker. In particolare, la disponibilità degli SCMs e le loro proprietà. Se infatti è vero che per alcuni SCMs come i fumi di silice la disponibilità nel prossimo futuro non è in crisi, in quanto sottoprodotto di settori industriali non in declino, non si può affermare lo stesso per altre tipologie di sottoprodotti. Il principale ostacolo all'abbassamento del fattore clinker in Europa e nel mondo è proprio la crisi della disponibilità futura di questi SCMs tradizionali. La transizione energetica e la decarbonizzazione di altri settori industriali, infatti, impongono:

- **Abbandono definitivo del carbone:** la dismissione delle centrali a carbone in Europa (in accordo con gli obiettivi climatici fissati) comporterà, in misura sempre maggiore, un crollo drastico nella produzione di ceneri volanti.
- **Transizione siderurgica:** Il passaggio dai metodi tradizionali di produzione dell'acciaio basati sull'altoforno (da cui derivano le GGBS) a metodi a basse emissioni, come i forni elettrici ad arco (EAF), ridurrà drasticamente la disponibilità di Loppa d'Altoforno.

CEMBUREAU (l'associazione europea dell'industria del cemento), ipotizza che:

- Il consumo di **ceneri volanti** in Europa diminuirà da circa 3 milioni di tonnellate nel 2020 a meno di 1 milione di tonnellate entro il 2050
- Il consumo di **scorie** in Europa diminuirà da circa 13 milioni di tonnellate nel 2020 ad un massimo di 4 milioni di tonnellate entro il 2050 [2]

A fronte di questi dati, appare evidente quanto il mondo dell'industria del cemento sia alla ricerca costante di nuove soluzioni per reperire SCMs alternativi. I potenziali nuovi sottoprodotti devono essere testati tenendo conto delle proprietà idrauliche e pozzolaniche richieste, della durabilità e della sostenibilità al fine di garantire che il cemento prima e il calcestruzzo poi mantengano la propria resistenza e durabilità nel tempo. Ovviamente sia la quantità di clinker utilizzata nel cemento, sia il tipo di SCM utilizzato influenzano molto le prestazioni del cemento, andando ad inficiare sulla resistenza e sulla durabilità del calcestruzzo. In particolare, gli SCMs contribuiscono alla resistenza del calcestruzzo attraverso tre meccanismi principali:

- la **reazione idraulica**: quando il cemento Portland reagisce con l'acqua (processo di idratazione), produce due componenti principali: i Silicati di Calcio Idrati (C-S-H) che si formano sotto forma di fibre e sono fondamentali per la resistenza del cemento, e l'idrossido di calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ meglio noto come Portlandite. Gli SCMs con proprietà idrauliche latenti (come la loppa d'altoforno) reagiscono anche con l'acqua, in presenza di portlandite, contribuendo allo sviluppo della resistenza.

- la **reazione pozzolanica**: Nel corso del processo di idratazione, gli SCMs con attività pozzolanica (come ceneri volanti silicee e fumi di silice) reagiscono con l'idrossido di calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ e l'acqua per formare ulteriori C-S-H. La formazione di questi C-S-H aggiuntivi comporta un aumento della resistenza a compressione.

- l'**effetto riempitivo**: particelle estremamente fini, come i fumi di silice, si interpongono tra le particelle di cemento andando a riempire i vuoti interstiziali. Questo riduce la porosità e la dimensione dei pori, fattore determinante per la resistenza del calcestruzzo.

Per quanto riguarda invece la durabilità, ovvero la capacità del materiale di resistere nel tempo agli agenti aggressivi esterni (quali cloruri, solfati, anidride carbonica, cicli di gelo/disgelo), gli SCMs giocano un ruolo importante in due fattori principali:

- **Riduzione permeabilità**: gli SCMs, riducendo la porosità capillare, rendono molto più difficile per gli agenti aggressivi penetrare nel calcestruzzo. Questo diventa un passaggio essenziale per prevenire la corrosione delle armature e l'attacco chimico.

- **Aumento resistenza chimica**: la reazione pozzolanica consuma la portlandite, che è la componente più vulnerabile all'attacco dei solfati. Riducendo la $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ libera, si limitano le reazioni che portano alla formazione di prodotti espansivi che causano il degrado del calcestruzzo.

Tenuto conto delle proprietà di resistenza e durabilità che gli SCMs possono conferire al cemento e di conseguenza al calcestruzzo diventa sempre più importante analizzare e modificare, caso per caso, i parametri che regolano la progettazione strutturale, l'esecuzione della posa della miscela e il "mix design" del calcestruzzo. Infatti, larga parte delle tipologie di cemento oggi utilizzate è rappresentata da cementi a basso contenuto di clinker di cui la normativa attuale ne consente già l'uso.

In Europa, il contenuto di clinker nei cementi è storicamente più alto rispetto alla media globale. Analizzando infatti alcuni dati forniti dall'IEA (*International Energy Agency*), nel 2021 il rapporto clinker/cemento si attestava al 77,3% in Europa, contro una media globale del 71%. Se andiamo a confrontare questi

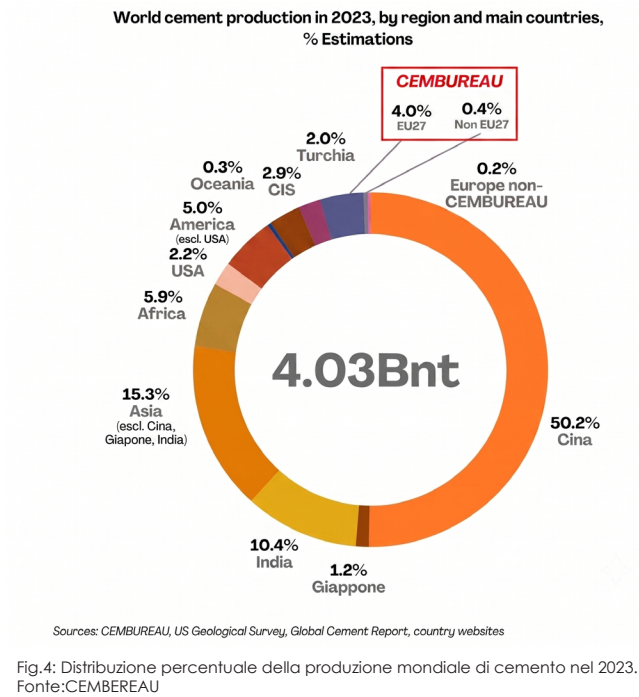
dati con altri paesi extra-europei notiamo che la media Europea, in alcuni casi, risulta decisamente più alta.

Per quanto riguarda la **Cina**, che rappresenta da sola circa il 51% della produzione mondiale di cemento, questo rapporto si attestava al 65% nel 2022. Un dato nettamente più incoraggiante rispetto alla media europea nonostante bisogna tener sempre presente che paesi come la Cina beneficiano di una vasta disponibilità di materiali sostitutivi derivanti dai settori di produzione di energia elettrica da carbone e da quello metallurgico, mantenendo così rapporti clinker/cemento inferiori alla media europea. In Nord America invece notiamo rapporti molto elevati, superiori alla media europea. Nel 2022 il rapporto Clinker/Cemento si attestava all'89 % negli **Stati Uniti** e all'86% in **Canada**. ^[3]

L'industria Europea del cemento, rappresentata da CEMBEREAU, ha fissato l'obiettivo di ridurre questo rapporto al 75% entro il 2030 e al 60% entro il 2050, allineandosi in questo modo allo scenario "Net Zero" redatto dall'*International Energy Agency*.

1.4) Obiettivi per il 2050

Il calcestruzzo è il materiale artificiale più utilizzato al mondo e la sua domanda è in continua crescita. A tal proposito viene considerato uno dei materiali più impattanti, non per l'intensità delle sue emissioni per unità di misura ma a causa del suo volume assoluto di produzione. Materiali come l'acciaio e l'alluminio, infatti, nonostante presentino emissioni più elevate per ogni kg prodotto vengono considerati generalmente meno impattanti in virtù delle minori quantità che ne vengono prodotte e consumate.



Si stima che, a causa della rapida urbanizzazione e della necessità di sviluppare infrastrutture vitali in tutto il mondo, dall'edilizia residenziale e pubblica (case, scuole, ospedali) ai sistemi di trasporto e all'infrastruttura energetica pulita, la produzione globale di cemento aumenterà tra il 12% e il 23% entro il 2050 rispetto ai livelli del 2014. Questa crescita pone il settore di fronte a una sfida epocale: il calcestruzzo è e continuerà ad essere un materiale essenziale nel prossimo futuro ma la sua componente principale, il cemento, deve subire una trasformazione radicale per allineare la sua impronta di carbonio agli obiettivi climatici globali.

Il settore globale del cemento e del calcestruzzo, tramite associazioni come la GCCA (*Global Cement and Concrete Association*) e CEMBUREAU, si è impegnato formalmente a raggiungere la neutralità carbonica per l'intera industria del cemento e del calcestruzzo entro il 2050, contribuendo a limitare il riscaldamento globale a 1,5°C.

Negli ultimi 35 anni, dal 1990 al 2020, l'intero settore ha già compiuto grandi passi avanti con una riduzione sostanziale delle emissioni di CO₂, principal-

mente grazie alla sostituzione del clinker e a misure di riduzione dei combustibili.

Nel decennio attuale, dal 2020 al 2030, si stima di ridurre le emissioni di CO₂ in una percentuale pari a quella per cui si sono resi necessari i tre decenni dal 1990 al 2020. Le azioni e le iniziative chiave sono e saranno:

- **Aumento della sostituzione del clinker** in favore di sottoprodotti come ceneri volanti, scorie d'altoforno granulate macinate (GGBS) e fumi di silice. Questi sottoprodotti stanno svolgendo e continueranno a svolgere un ruolo cruciale nei prossimi cinque anni e in più anche nuovi sottoprodotti come calcare macinato, polveri di calcestruzzo riciclate e l'introduzione di argille calcinate insieme ad altri materiali promettenti svolgeranno un ruolo sempre più importante.

- **Riduzione dei combustibili fossili e aumento dell'uso di combustibili alternativi:** la sostituzione dei combustibili fossili (come carbone e pet-coke) con rifiuti non riciclabili e biomasse è una tecnologia già matura e che nei prossimi anni verrà sempre più implementata. Stando alla "Net Zero Roadmap" stilata da GCCA, In Europa l'obiettivo è quello di raggiungere il 60% di combustibili alternativi entro il 2030, con una quota del 30% di biomassa. L'utilizzo di Combustibili Solidi Secondari (CSS) permette di recuperare energia dai rifiuti, riducendo le emissioni legate ai combustibili fossili ed evitare lo smaltimento in discarica o l'incenerimento inefficiente. I Combustibili Solidi Secondari (CSS) sono rifiuti non pericolosi pretrattati per ottenere un prodotto solido con caratteristiche definite e classificate secondo la norma UNI EN 15359. Tuttavia, nonostante questa standardizzazione i CSS presentano comunque diverse criticità. Questi sono intrinsecamente più eterogenei dei combustibili fossili e questo può comportare un rischio sia per l'impianto che per la qualità finale del prodotto. Infatti, la presenza di Cloro e Alkali all'interno di questi combustibili, può causare incrostazioni e potenzialmente corrosione nel forno, riducendo l'efficienza e aumentando i costi di manutenzione. Inoltre, la variabilità chimica può influire sulla stabilità della cottura e in ultima analisi sulla qualità finale del clinker e del cemento. Richiedono, in aggiunta, anche costosi pretrattamenti per raggiungere gli standard di qualità necessari prima di poter essere utilizzati, rendendo così la loro gestione più complessa e onerosa rispetto ai combustibili tradizionali.

In sintesi, se da un lato è vero che i CSS permettono di abbattere le emissioni di CO₂ legate ai combustibili tradizionali, dall'altro lato richiedono investimenti significativi in tecnologia e monitoraggio per non compromettere l'efficienza e la conformità ambientale.

- **Sviluppo della tecnologia e delle infrastrutture CCUS:** la sigla CCUS (*Carbon Capture, Utilisation and Storage*) identifica un insieme di tecnologie progettate per catturare l'anidride carbonica (CO₂) proveniente da grandi fonti industriali (come cementifici o centrali elettriche) o

direttamente dall'aria, per impedirne il rilascio nell'atmosfera.
Il processo si articola in tre fasi principali:

- **Cattura:** la CO₂ viene separata dagli altri gas prodotti durante i processi industriali. Nel settore del cemento, questo passaggio è cruciale poiché gran parte delle emissioni non deriva solo dai combustibili (emissioni energetiche), ma dalla reazione chimica di calcinazione del calcare (emissioni di processo), che sono inevitabili.
- **Utilizzo:** la CO₂ catturata viene riutilizzata in nuovi processi produttivi. Può essere convertita in prodotti chimici o combustibili sintetici, oppure utilizzata per la mineralizzazione o per la stagionatura del calcestruzzo, dove viene immagazzinata permanentemente.
- **Stoccaggio:** Se non viene utilizzata, la CO₂ viene compressa e trasportata (via gasdotto o nave) per essere iniettata in formazioni geologiche profonde, dove rimane isolata permanentemente dall'atmosfera.

Dal 2030 al 2050, la piena implementazione delle tecnologie adottate nel decennio corrente e la loro estensione a tutta l'industria del cemento e del calcestruzzo, si stima possa portare il settore al raggiungimento della neutralità climatica. La sostituzione del clinker continuerà e nonostante la fornitura di ceneri volanti e GBBS diminuirà drasticamente, non sarà lo stesso per calcare macinato e argilla calcinata che invece andranno ad occupare un posto sempre più importante tra i sottoprodotti del futuro. La CO₂ dovrà essere catturata e riutilizzata, quando possibile, o stoccata. L'implementazione di questa tecnologia su larga scala potrebbe eliminare del tutto le emissioni di processo durante la produzione del clinker. Infine, lo sviluppo di nuove tecnologie potrebbe aiutare e accorciare i tempi verso la neutralità carbonica del settore.

GETTING TO NET ZERO

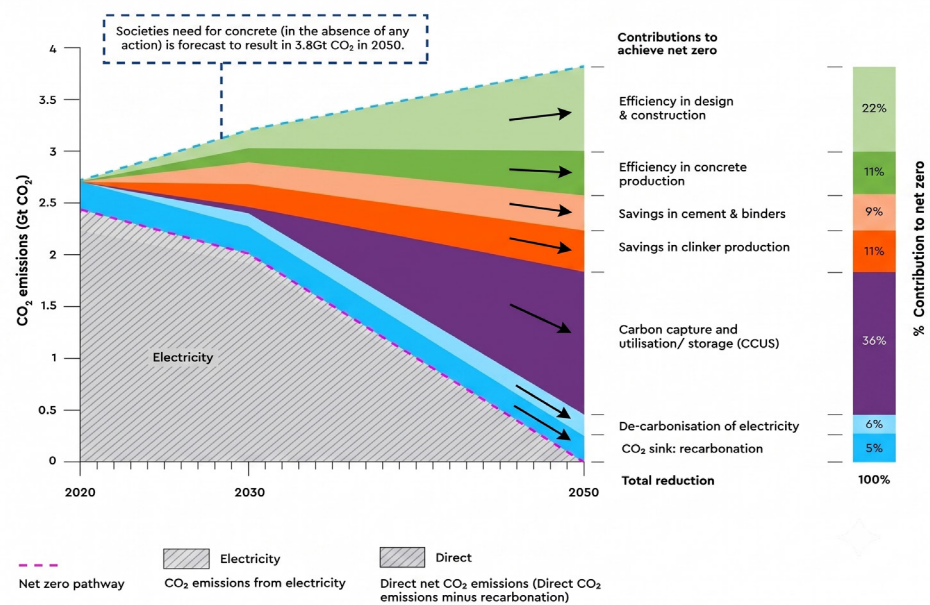


Fig.5: Peso percentuale delle iniziative necessarie alla neutralità carbonica del settore in vista del 2050.
Fonte: GCCA.

Gli SCMs attuali, emergenti e futuri

Come discusso nel capitolo 1, la necessità di individuare nuove fonti di SCMs deriva dalla prevista diminuzione di sottoprodotti 'tradizionali' come la scoria granulata d'altoforno (GBBS) e le ceneri volanti, dovuta alle transizioni in atto nei settori siderurgico ed energetico. La sostituzione parziale del clinker con SCMs costituisce infatti una delle strategie primarie nell'ottica di decarbonizzare il settore del cemento entro il 2050.

02) Gli SCMs attuali, emergenti e futuri

2.1) Gli SCMs attuali

2.2) Gli SCMs emergenti

2.3) Gli SCMs futuri

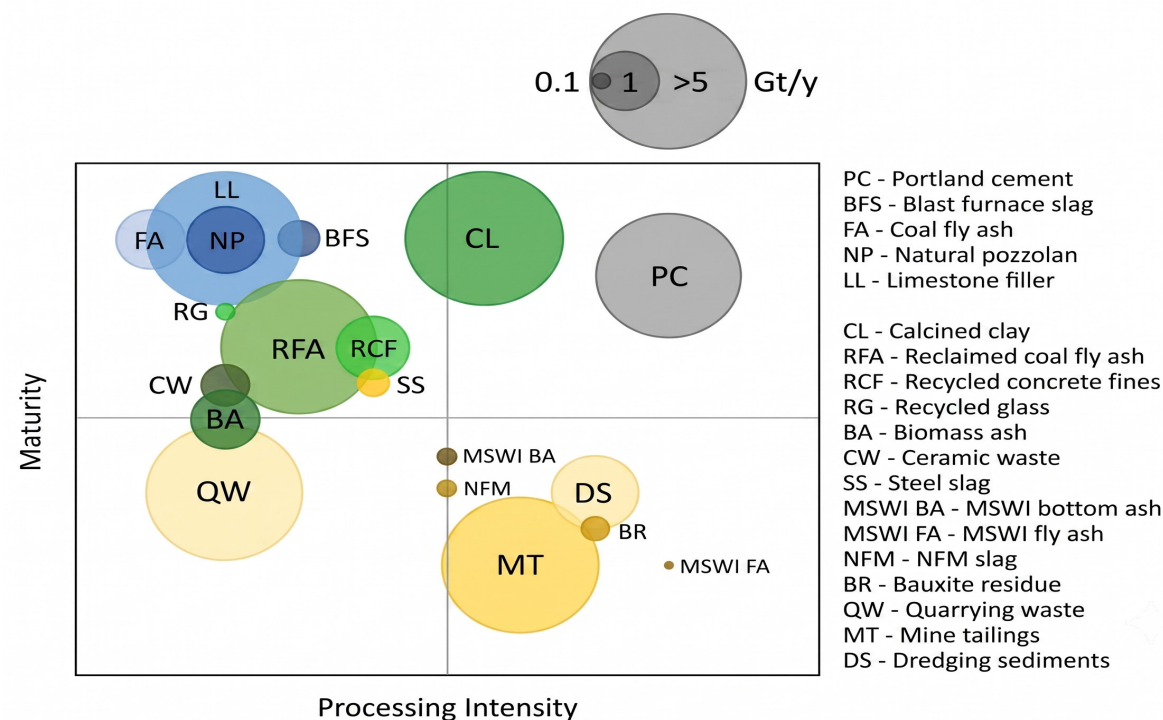


Fig.6: Grafico riassuntivo che mostra i volumi di offerta o di riserva dei sottoprodotti attuali, emergenti e futuri in funzione della maturità e dell'intensità di lavorazione.[5]

In figura 3 gli SCMs vengono suddivisi in base a tre colorazioni differenti in:

- **Attuali** (rappresentati in blu), ovvero materiali già consolidati come la loppa d'altoforno (BFS) e le pozzolane naturali (NP)
- **Emergenti** (rappresentati in verde), ovvero materiali che stanno guadagnando quote di mercato, come le argille calcinate (CL)
- **Futuri** (rappresentati dal colore giallo), ovvero materiali che rappresentano un grande potenziale ma che trovano ancora davanti a sè barriere tecniche, economiche e normative come le scorie di acciaieria (SS).

Sull'asse verticale viene indicata la "Maturity", ovvero quanto il materiale è già inserito sul mercato e trattato nelle normative. In alto troviamo infatti materiali ampiamente utilizzati come il cemento Portland o le Pozzolane Naturali, in basso invece troviamo materiali ancora in fase di ricerca iniziale o lontani dal mercato.

Sull'asse orizzontale viene indicato invece il "Processing Intensity", ovvero l'energia, i costi e la complessità necessari per trasformare il prodotto in un SCM reattivo. Sulla sinistra troviamo infatti materiali che richiedono lavorazioni modeste, come semplice essiccazione o macinazione. A destra ci sono invece materiali che richiedono processi energivori o chimicamente intensivi, come calcinazione o utilizzo di alte temperature nelle fasi di processo.

Infine, la dimensione del cerchio rappresenta le riserve o i volumi di fornitura annuale di quel materiale specifico.

2.1) Gli SCMs attuali

Di seguito verranno trattati la loppa d'altoforno e le pozzolane naturali, due materiali già consolidati ma con prospettive completamente diverse. Infatti, se da un lato la loppa d'altoforno diminuirà drasticamente nei prossimi anni, dall'altro le pozzolane naturali potranno rappresentare un pilastro strategico per il futuro dei cementi compositi.

- Scorie d'altoforno (Blast Furnace Slag):

La loppa granulata d'altoforno (nota in ambito internazionale con l'acronimo GBFS- *Granulated Blast Furnace Slag*) rappresenta storicamente e quantitativamente uno degli SCMs più importanti e ampiamente utilizzati nell'industria del cemento.

La loppa d'altoforno è un sottoprodotto della produzione della ghisa all'interno degli altiforni. Per poter essere utilizzata efficacemente come SCM, la scoria fusa deve essere sottoposta a un processo di raffreddamento rapido, solitamente effettuato con getti d'acqua, all'interno di un granulatore. Questo raffreddamento veloce impedisce la cristallizzazione e "congela" il materiale in uno stato vetroso (amorfo) altamente reattivo, rendendolo a tutti gli effetti un prodotto industriale distinto e di alto valore commerciale.[6]

A differenza dei materiali pozzolanici, la loppa d'altoforno possiede una reattività idraulica latente. Questo significa che, una volta attivata (in genere dall'alcalinità generata dall'idratazione del clinker), reagisce per formare silicati di calcio idrati (C-S-H) simili a quelli del cemento Portland. Grazie a questa caratteristica, le normative consentono di utilizzare la loppa d'altoforno in sostituzione al clinker in proporzioni estremamente elevate, in alcuni tipi fino al 95% [Tabella 2].

L'impiego di GBFS offre al calcestruzzo notevoli benefici in termini di durabilità aumentando significativamente la resistenza a lungo termine e fornendo un'eccellente protezione contro gli ambienti chimicamente aggressivi [7].

Nonostante la loppa d'altoforno rappresenti, insieme alle ceneri volanti e al calcare, il sostituto del clinker per eccellenza, non rappresenta la soluzione per la futura decarbonizzazione globale. La produzione di cemento è in crescita ma la disponibilità di loppa è in costante decrescita; se nel 1980 rappresentava il 17% di tutta la produzione di cemento, nel 2014 era all'incirca dell'8%. Inoltre, oltre il 90% della GBFS attualmente prodotta nel mondo (stimata all'incirca sui 330 milioni di tonnellate annue, secondo la "World Steel Association") è già interamente assorbita dall'industria del cemento e del calcestruzzo[8], il che significa che non c'è ulteriore margine per aumentare la riduzione di CO₂ sfruttando questo sottoprodotto.

- Pozzolane naturali (Natural Pozzolans, NP):

L'utilizzo di pozzolane naturali rappresenta una delle strategie più consolidate per la parziale sostituzione del clinker nella produzione di cementi a basso impatto carbonico.

Sebbene il loro utilizzo affondi le radici nell'antichità, con la scoperta romana della "pulvis puteolana" che permise la nascita dei primi leganti idraulici [1], oggi le pozzolane stanno vivendo una nuova era di interesse industriale.

Le pozzolane naturali sono materiali silicei o allumino-silicei con una struttura altamente amorfa e derivano principalmente da fonti naturali come depositi vulcanici o rocce sedimentarie.[5]

Uno dei punti di forza di questo materiale è rappresentato dalla vasta disponibilità seppur in zone geograficamente circoscritte. Trattandosi di un materiale vulcanico, i giacimenti più grandi sono localizzati in aree con una storia geologica legata ad attività vulcanica esplosiva. La pozzolana si forma infatti quando il magma, ricco di silice e allumina, viene espulso violentemente e si raffredda così rapidamente (in aria o in acqua) da non riuscire a cristallizzare, formando una struttura vetrosa e amorfa.

I principali giacimenti sono localizzati in:

- **Italia:** sono presenti alcuni dei giacimenti più estesi e utilizzati fin dall'antichità. Nella zona di Pozzuoli e dei Campi Flegrei si trova la pozzolana vera e propria, originata dalle eruzioni del Vesuvio e della caldera flegrea. Anche la regione Lazio è ricchissima di giacimenti di pozzolana sia rossa che nera, localizzati nella zona dei Colli Albani, oltre che di tufi pozzolanici localizzati nella zona di Viterbo.

- **Grecia:** L'Isola di Santorini ospita uno dei giacimenti di pozzolana naturale più grandi al mondo. La particolarità di questo materiale risiede nelle sue specifiche proprietà geologiche e chimiche che lo distinguono dagli altri materiali pozzolanici.

- **Germania:** Nella regione dell'Eifel si trova il cosiddetto "Trass", un tufo allumino-siliceo di origine vulcanica.

- **Stati Uniti:** negli ultimi decenni sono stati mappati e sfruttati enormi giacimenti negli Stati Uniti Occidentali. In particolare, negli stati del Nevada, California, Arizona e New Mexico sono presenti vastissimi depositi di tufo vulcanico o diatomite.

Uno dei principali vantaggi nell'utilizzo delle pozzolane naturali risiede nella semplicità della loro lavorazione. Infatti, a differenza di altri SCM emergenti che richiedono un trattamento energivoro prima di poter essere utilizzati, la preparazione delle pozzolane naturali richiede generalmente solo essiccazione e macinazione[5]. Questa semplicità di lavorazione conferisce al materiale un'impronta carbonica estremamente

ridotta, contribuendo in modo significativo agli obiettivi di decarbonizzazione della filiera.

Inoltre, questo materiale offre in termini di durabilità un contributo significativo al calcestruzzo. Le pozzolane naturali sono infatti particolarmente efficaci nel mitigare l'espansione causata dalla reazione alcali-silice (ASR) attraverso una combinazione di fattori chimici e strutturali che modificano l'ambiente interno del calcestruzzo, neutralizzando gli elementi che innescano il degrado.[5]

Seppur il loro utilizzo nell'industria del cemento presenti grandi vantaggi dal punto di vista energetico e la natura intrinseca del materiale mitighi gli effetti di espansione del calcestruzzo, le pozzolane naturali sono caratterizzate da una reattività molto più lenta rispetto a quella di materiali come loppa d'altoforno o ceneri volanti ad alto contenuto di calcio. Questa cinetica lenta si traduce in un minore sviluppo della resistenza a breve termine[5]. Infatti, mentre il clinker del cemento Portland reagisce quasi istantaneamente a contatto con l'acqua, la pozzolana deve aspettare che l'idratazione del clinker liberi la calce per poter iniziare la sua reazione.

Nel periodo critico, che copre un arco temporale di 7 giorni dal getto, un cemento pozzolanico ha proprietà meccaniche significativamente inferiori a quelle di un cemento Portland puro; a 2 giorni la resistenza può risultare inferiore del 30-50% mentre a 7 giorni nonostante il divario si riduca la resistenza rimane tipicamente inferiore del 15-25%. Questo incide in maniera significativa sui tempi di disarmo delle casseforme in cantiere, che devono necessariamente essere allungati. La parità nelle prestazioni meccaniche si verifica a 28 giorni dal getto, quando le resistenze di un cemento pozzolanico e di un cemento Portland puro sono pressoché analoghe. Per ovviare alla problematica della lenta idratazione e reattività della pozzolana e consentirne un uso maggiormente diffuso, le due soluzioni principali sono una macinazione separata dal clinker e una combinazione chimica di altri materiali. La macinazione separata consente di aumentare la finezza del materiale per aumentare l'area superficiale accelerandone la reattività a breve termine. La combinazione chimica con altri materiali invece, come accade nei sistemi LC3 (sistemi ternari composti da clinker, argilla calcinata e calcare) consente il superamento definitivo di questo limite eguagliando le resistenze a 7 giorni e addirittura superandole trascorsi i 28 giorni. Tuttavia, il punto di forza dei cementi pozzolanici si verifica nelle lunghe stagionature. Grazie alla reazione pozzolanica lenta ma costante, il calcestruzzo diventa più denso e meno poroso restituendoci un prodotto molto più impermeabile e durevole.[5]

Una problematica aggiuntiva riguarda la domanda d'acqua e la lavorabilità. A causa della forma spesso angolare delle particelle e dell'elevata porosità interna, le miscele contenenti Pozzolana Naturale tendono ad avere una maggiore richiesta d'acqua. Questo può ridurre la lavorabilità del calcestruzzo fresco, rendendo necessario l'impiego di dosaggi superiori di additivi superfluidificanti, con un conseguente impatto sui costi.

2.2) Gli SCMs emergenti

Tra gli SCMs emergenti verranno trattate le **argille calcinate** per via della loro vasta disponibilità in aree strategiche, temperature di cottura richieste meno elevate rispetto al clinker e durabilità del prodotto finale.

- Argille calcinate

In un quadro di progressiva diminuzione degli SCMs tradizionali, le riserve globali di argilla sono considerate virtualmente illimitate rispetto alla domanda di cemento. La mappa geologica mondiale (Fig.9) mostra enormi giacimenti di argille, specialmente nei Paesi in via di sviluppo dove l'urbanizzazione è in piena accelerazione e nei prossimi decenni ci sarà una crescente richiesta di calcestruzzo. Proprio in questi paesi, caratterizzati da realtà industriali più aggressive e dinamiche, la produzione attesa di CO₂ nei decenni a venire sarà in costante crescita (Fig.7).[9] Inoltre in questi paesi come l'India, il Sud-est Asiatico e i paesi africani come Etiopia e Nigeria, il peso relativo del settore del cemento sulle emissioni totali della nazione ricoprono percentuali davvero importanti (Fig.8).[9]

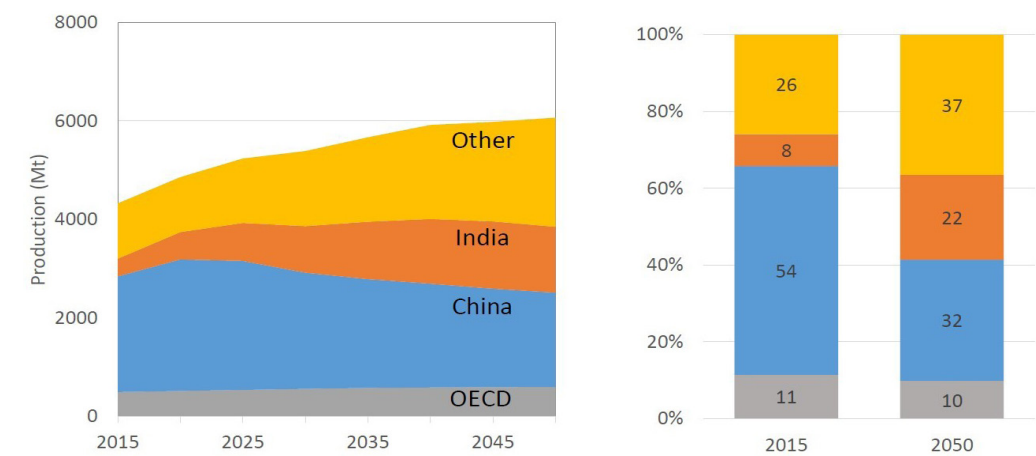


Fig.7: Produzione attesa di CO₂ al 2050
Fonte: Karen Scrivener, Realistic Option to reduce CO₂ emissions from Cement and Concrete, ICC 2022 Napoli.

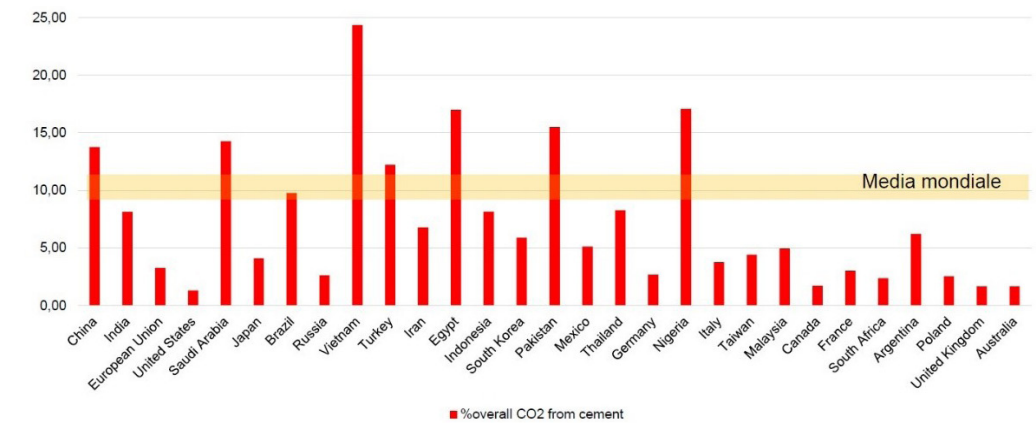


Fig.8: Peso relativo del settore del cemento sulle emissioni totali della nazione
Fonte: Karen Scrivener, Realistic Option to reduce CO₂ emissions from Cement and Concrete, ICC 2022 Napoli.

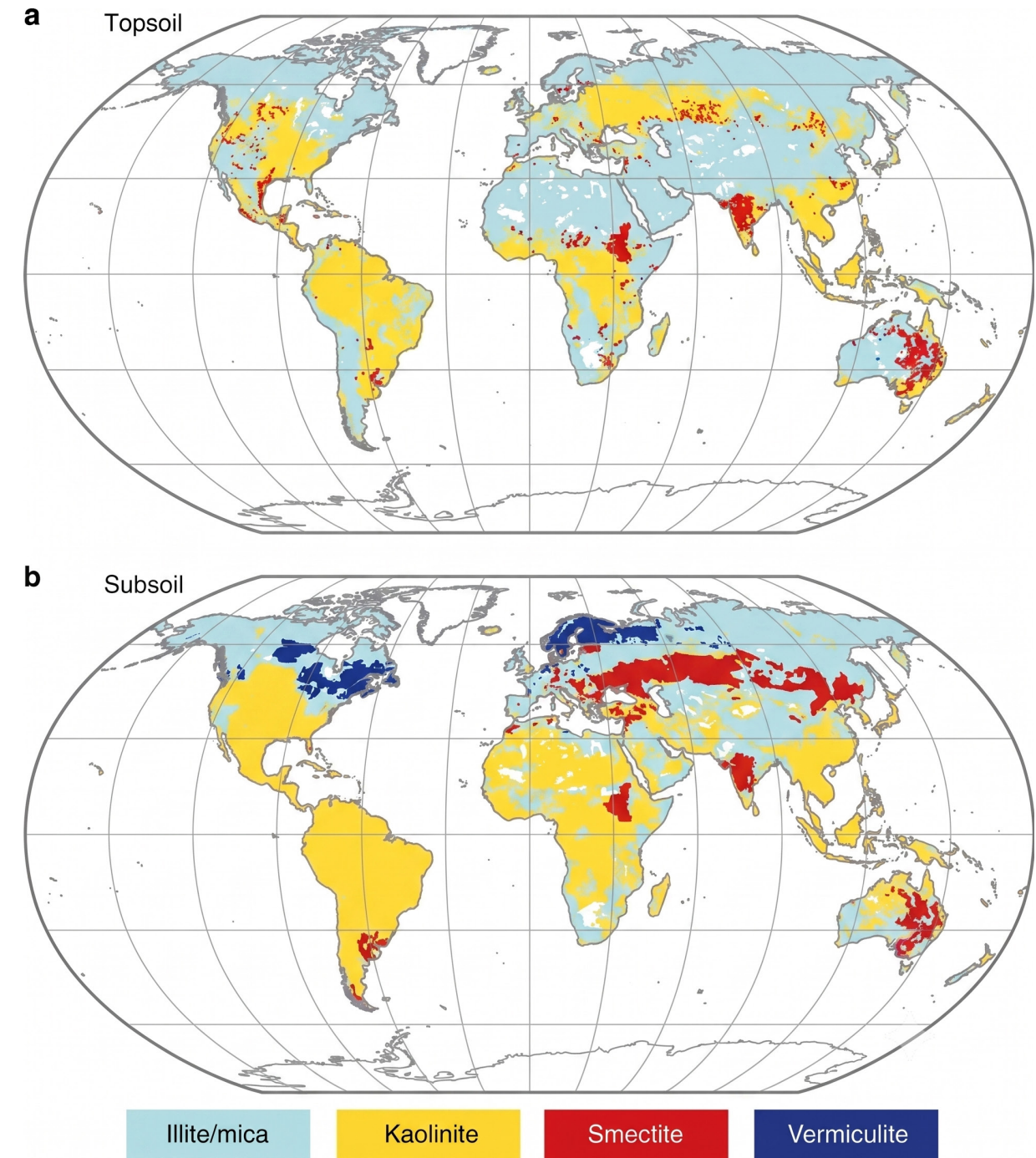


Fig.9: Mappa geologica mondiale
Fonte: Karen Scrivener, Realistic Option to reduce CO₂ emissions from Cement and Concrete, ICC 2022 Napoli.

L'argilla è un materiale che allo stato naturale non è reattivo, pertanto è necessario rendere amorfa la sua originaria struttura cristallina attraverso una decomposizione termica. In questo modo il materiale acquista reattività, divenendo idoneo a legare con altre sostanze (in particolare con l'acqua e l'idrossido di calcio) per formare nuovi composti simili ai C-S-H. Per attivarlo è necessario un processo di calcinazione a temperature moderate comprese tra 700 e 850 °C [6], dove ad ogni tipologia di argilla utilizzata corrisponde una temperatura specifica. Il materiale risultante è il metacaolino, un silico-alluminato con struttura amorfa e un'e-

levata reattività pozzolanica. Questo processo comporta un vantaggio ambientale considerevole, i 700-850°C necessari per la calcinazione rappresentano infatti un fabbisogno energetico nettamente inferiore rispetto ai processi industriali tradizionali, garantendo così un considerevole risparmio di energia.^[11]

Le argille calcinate esprimono il loro massimo potenziale nei sistemi ternari noti come LC3 (*Limestone Calcined Clay Cement*). La formulazione tipica prevede circa il 50% di clinker, 30% di argilla calcinata, 15% di calcare e 5% di gesso ^[10]. Sviluppato come alternativa sostenibile ai cementi tradizionali, il cemento con argille calcinate non rappresenta un ripiego ecologico, ma un materiale ad altissime prestazioni:

- **Resistenza meccanica:** l'argilla calcinata reagisce molto più rapidamente rispetto alle ceneri volanti o alla loppa. Le resistenze a 7 e 28 giorni sono pari o addirittura superiori a quelle di un cemento Portland puro. ^[9]

- **Durabilità:** La reazione sinergica dell'LC3 genera un effetto riempitivo che affina e chiude le porosità del calcestruzzo. Questo lo rende un prodotto ideale per contrastare la penetrazione degli ioni cloruro (ideale per architetture costiere o ponti) e garantire una maggiore resistenza alla degradante reazione alcali-silice (ASR). ^[9]

Come per le pozzolane naturali, anche le particelle di argilla calcinata possiedono un'altissima area superficiale specifica. Questo richiede l'utilizzo di molta acqua, riducendo drasticamente la lavorabilità (lo slump) del calcestruzzo fresco. Per garantire la corretta fluidità senza aggiungere acqua (che ridurrebbe le resistenze), è indispensabile l'uso mirato di additivi chimici di nuova generazione.

2.3) Gli SCMs futuri

Di seguito verranno trattate le scorie di acciaieria, sottoprodotto utilizzato nell'ambito dell'attività sperimentale svolta in questo lavoro di tesi.

- Steel Slag

Di fondamentale importanza è distinguere la loppa d'altoforno (GBFS), sottoprodotto della produzione della ghisa e SCM già largamente utilizzato, dalle "scorie di acciaieria", che si distinguono in:

- Scorie da Forno ad Ossigeno (BOF- Basic Oxygen Furnace):

Derivano dal ciclo integrale per la conversione della ghisa in acciaio ^[12] ^[5]. Sono ricche di ossido di calcio e fasi espansive, il che le rende spesso più adatte come materia prima per la produzione del clinker (nella farina cruda) piuttosto che come SCM diretto ^[6] ^[5].

- Scorie da Forno Elettrico ad Arco (EAF – Electric Arc Furnace):

Rappresentano il vero scarto destinato ad aumentare considerevolmente nei prossimi decenni. Il forno elettrico, che ricicla rottami di acciaio, è una tecnologia in forte espansione poiché più sostenibile del ciclo integrale; si stima che la sua quota di mercato globale raggiungerà il 40% nel 2030, con un conseguente aumento dei volumi di scorie EAF (circa 120-170 kg per tonnellata di acciaio) ^[13]. In Italia, ad esempio, circa l'85% dell'acciaio è già prodotto tramite forni elettrici ^[12].

- Scorie di Siviera (LFS- Ladle Furnace Slag):

Derivano dai processi di metallurgia secondaria (raffinazione). A causa della loro natura polverulenta e della spiccata instabilità volumetrica, il loro riutilizzo è estremamente complesso e attualmente sono quasi totalmente conferiti in discarica.

L'impiego diretto delle scorie EAF e BOF come sottoprodotto in parziale sostituzione del clinker è attualmente ostacolato da diverse criticità chimico-fisiche. Innanzitutto, a differenza della tradizionale loppa d'altoforno che subisce un processo di raffreddamento rapido in acqua volto a "congelare" una struttura amorfa e vetrosa altamente reattiva, le scorie EAF e BOF subiscono solitamente un raffreddamento lento all'aria. Questo gradiente termico prolungato favorisce la formazione di fasi cristalline che possiedono una **reattività idraulica limitata o del tutto nulla**^[13]. A questa inerzia chimica si somma il grave problema dell'**instabilità volumetrica**, comunemente definita *unsoundness*. Le scorie fresche contengono spesso ossido di calcio (calce libera, CaO) e ossido di magnesio (MgO) non reagiti; a contatto con l'acqua questi composti si idratano generando forti espansioni che possono causare fessurazioni e compromettere la durabilità del calcestruzzo.^[6]

Inoltre, dal punto di vista prettamente operativo ed energetico, le scorie di acciaieria sono materiali estremamente duri e densi (a causa dell'elevato contenuto di ferro). Il loro **basso indice di macinabilità**

rappresenta un ostacolo tecnico ed economico di non poco conto: la macinazione del materiale ai livelli di finezza necessari per l'impiego come legante attivo, operazione indispensabile per massimizzarne l'area superficiale specifica e stimolarne la reattività, richiede un dispendio energetico considerevole che rischia di penalizzare il bilancio carbonico complessivo dell'operazione di recupero ^[14].

Infine, va tenuto conto dei rigidi vincoli imposti dalla **sicurezza ambientale**. Derivando dalla fusione e dal riciclo di rottami metallici eterogenei, le scorie possono trattenere al loro interno elementi e metalli pesanti potenzialmente tossici, come cromo, nichel e vanadio. L'impiego di questi scarti pone dunque delle sfide complesse in termini di conformità normativa, rendendo imperativa una rigorosa valutazione e mitigazione del rischio di lisciviazione per scongiurare qualsiasi rilascio di contaminanti nel suolo o nelle falde acquifere durante il ciclo di vita dell'infrastruttura ^[5].

Nonostante le problematiche che questo sottoprodotto porta con sé, l'impiego delle scorie di acciaieria come Materiali Cementizi Supplementari rappresenta una straordinaria opportunità per l'economia circolare. La loro natura inerte e la loro instabilità volumetrica richiedono, come abbiamo visto, processi di valorizzazione che comportano sfide significative sotto il profilo energetico e ambientale. Per fronteggiare questi limiti, la ricerca tecnologica ha sviluppato diverse soluzioni di trattamento, ciascuna caratterizzata da specifici impatti sulla sostenibilità complessiva della filiera.

Una prima soluzione consiste nell'attivazione meccanica mediante una macinazione ultra-fine, finalizzata ad aumentare la superficie esposta del materiale per stimolarne la reattività. Sotto il profilo energetico, tuttavia, questa opzione risulta fortemente penalizzante: le scorie siderurgiche sono materiali estremamente duri e densi, la cui frantumazione richiede un dispendio di energia elettrica considerevolmente superiore rispetto ad altri SCMs ^[5]. Questo elevato fabbisogno energetico rischia di vanificare il beneficio ambientale derivante dalla sostituzione del clinker, peggiorando l'impronta carbonica del prodotto finale. Inoltre, un'eccessiva polverizzazione della scoria espone a maggiori rischi di lisciviazione di metalli pesanti tossici nell'ambiente, ponendo seri problemi di conformità ambientale.

Un secondo approccio prevede il trattamento termico ad alta temperatura, ovvero la rifusione della scoria (spesso con l'aggiunta di correttori chimici come silice o allumina, utili a ridurne la basicità) seguita da una tempra rapida in acqua per "congelare" il materiale in uno stato vetroso e reattivo. L'impatto energetico di questa operazione è enorme se eseguita a valle del processo produttivo, poiché richiede una seconda volta (dopo le emissioni generate per la produzione del materiale primario) l'emissione di enormi quantità di calore ^[13]. Per rendere questa soluzione realmente sostenibile, è indispensabile applicare un approccio sinergico di stretta collaborazione tra le due industrie. Il trattamento deve avvenire direttamente all'interno dell'acciaieria, sfruttan-

do il calore latente della scoria ancora fusa appena estratta dal forno, evitando così l'impatto ambientale di una seconda fusione.

La soluzione attualmente considerata più sostenibile e promettente è la carbonatazione minerale accelerata, che integra la valorizzazione dello scarto con le tecnologie di *Cattura, Utilizzo e Stoccaggio del Carbonio (CCUS)*. Facendo reagire la scoria con l'anidride carbonica, il materiale si stabilizza dimensionalmente e sviluppa una nuova reattività pozzolanica ^{[13][12]}. L'impatto ambientale di questa soluzione è estremamente virtuoso, poiché trasforma la scoria in un serbatoio permanente di carbonio, consentendo di ottenere un materiale con un'impronta carbonica potenzialmente negativa.

Infine, per fronteggiare le problematiche di acquisizione su larga scala, le soluzioni tecnologiche devono essere necessariamente affiancate da soluzioni sistemiche basate sulla sinergia industriale a livello territoriale, dal momento che attualmente enormi volumi di scorie finiscono ancora in discarica ^[12]. La creazione di reti locali tra acciaierie, impianti di trattamento e cementerie permetterebbe di gestire il recupero in un'ottica, per quanto possibile, "a chilometro zero". Questo approccio logistico è fondamentale per la sostenibilità di un prodotto, risparmiando sulle materie prime e abbattendo drasticamente le emissioni associate al trasporto su gomma dei materiali pesanti.

La Carbonatazione: da problema a risorsa

La carbonatazione del calcestruzzo rappresenta uno dei processi chimico-fisici più rilevanti e complessi nel ciclo di vita dei materiali cementizi.

Da un punto di vista prettamente chimico, consiste nella reazione tra l'anidride carbonica (CO_2) presente nell'aria e i composti ricchi di calcio presenti nella pasta di cemento idratata, in primis l'idrossido di calcio o portlandite [$\text{Ca}(\text{OH})_2$], per andare a formare carbonato di calcio e acqua. A seguito di questo processo di "ricarbonatazione", una quota di CO_2 viene permanentemente stoccata all'interno del materiale.

Questa reazione rappresenta l'inverso del processo di decarbonatazione che avviene invece all'interno del forno per la produzione del clinker, dove il calcare si trasforma in ossido di calcio e anidride carbonica.^[15]

Di fondamentale importanza è far chiarezza sulle diverse tipologie di questo fenomeno e sancire una netta differenziazione tra:

- **Carbonatazione passiva** (o naturale): è un processo spontaneo, a lungo termine, che si verifica durante l'intera vita utile di una struttura in cui la CO_2 atmosferica penetra lentamente all'interno della porosità del calcestruzzo. ^[16]

Sebbene agisca come un pozzo di assorbimento del carbonio, rappresenta un grave problema di durabilità per le opere in calcestruzzo armato, soprattutto in calcestruzzi altamente porosi a causa di un non corretto confezionamento.

- **Carbonatazione diretta** (o attiva/accelerata): è un processo intenzionale in cui il calcestruzzo fresco, o nelle primissime fasi di maturazione, viene esposto ad alte concentrazioni di CO_2 . Questo processo promuove la formazione di carbonato di calcio, migliorando le prestazioni del materiale e sequestrando permanentemente l'anidride carbonica. Questa strategia si configura come una delle principali tecnologie CCU (*Carbon Capture and Utilization*) per la decarbonizzazione del settore. ^[16]

03) La Carbonatazione: da problema a risorsa

3.1) La carbonatazione passiva

3.2) La carbonatazione diretta

3.2.1) La carbonatazione diretta in fase di miscelazione del calcestruzzo fresco

3.2.2) La carbonatazione intesa come stagionatura accelerata

3.3) Quando conviene la carbonatazione accelerata: il rischio di Carbon leakage e l'introduzione del CBAM

3.4) Demolizione circolare e carbonatazione passiva: trasformare le macerie da rifiuto a pozzo di carbonio

3.4.1) Un nuovo modello economico: premiare il corretto conferimento delle macerie

3.4.2) Realtà attuale e prospettive future

3.1) La Carbonatazione passiva

La carbonatazione passiva non rappresenta un problema per il calcestruzzo in sé; al contrario, la formazione di carbonato di calcio tende ad aumentare la resistenza meccanica del calcestruzzo e a ridurre la porosità capillare [6]. Il problema critico emerge quando questo fenomeno interessa il calcestruzzo armato.

Normalmente, l'idratazione del cemento Portland genera un ambiente interno altamente alcalino, con un pH che supera il valore di 12,5. Questa forte basicità è essenziale perché protegge le barre d'acciaio interne attraverso la formazione di un sottile strato di ossido passivante che inibisce la corrosione. Quando la CO₂ atmosferica penetra nel calcestruzzo e reagisce con la portlandite per formare carbonato di calcio, si verifica una drastica riduzione del pH, che può scendere fino a valori compresi tra 8 e 10,5. [17]

Una volta che il fronte di carbonatazione raggiunge le armature e il pH si abbassa neutralizzando l'ambiente, il film protettivo sull'acciaio viene distrutto, consentendo la corrosione dell'armatura da parte di altri agenti aggressivi (aria ed umidità). L'ossidazione dell'acciaio genera ruggine, che occupa un volume maggiore rispetto all'acciaio originario, provocando tensioni interne, fessurazioni, distacco ed espulsione del copriferro. Il tasso di diffusione della carbonatazione passiva raggiunge il suo picco a un'umidità relativa compresa tra il 50% e il 65%; in ambienti totalmente saturi d'acqua o completamente secchi, il processo rallenta notevolmente. [16] [6]

3.2) La carbonatazione diretta

3.2.1) La carbonatazione diretta in fase di miscelazione del calcestruzzo fresco

Un approccio emergente per sfruttare la CO₂ a fini sostenibili è l'introduzione del carbonio direttamente nella fase di impasto del calcestruzzo. Questa tecnica si realizza iniettando CO₂ gassosa o utilizzando acqua pre-carbonatata durante la miscelazione di cemento e aggregati nella betoniera.

Aggiungendo CO₂ in fase di miscelazione, il gas reagisce quasi istantaneamente con i composti del cemento, innescando una rapida formazione di carbonato di calcio ma riducendo allo stesso tempo, fin dai primi stadi, il contenuto di idrossido di calcio.

I test sperimentali dimostrano che l'uso di acqua carbonatata o gas iniettato accelera i processi di idratazione iniziali: a dimostrazione di ciò i campioni esibiscono spesso un aumento della resistenza a compressione a stagionature molto brevi grazie alla maggiore concentrazione di calcite che agisce da riempitivo e nucleante. [18]

Dal punto di vista ambientale, questa tecnologia fissa permanentemente la CO₂ nella matrice del calcestruzzo, abbassando l'impronta carbonica del prodotto.

Tuttavia, in seguito alla riduzione di contenuto di idrossido di calcio causata dalla reazione con la CO₂, il pH iniziale del calcestruzzo si abbassa considerevolmente. L'idrossido di calcio (o portlandite) serve infatti a mantenere l'ambiente interno del calcestruzzo altamente alcalino, con un pH che solitamente si attesta intorno a 12,5. Questo ambiente ad alto pH è molto importante affinché le reazioni di idratazione proseguano senza criticità il proprio corso fino alla maturazione del prodotto finale. Dunque, un abbassamento del contenuto di portlandite, può comportare una lieve riduzione delle prestazioni meccaniche a stagionature più avanzate (28 giorni) se il mix non è adeguatamente bilanciato [18].

Per far fronte a questa problematica, il tecnologo del calcestruzzo deve riporre la massima attenzione nel dosaggio della quantità di CO₂ iniettata (per impedire un crollo del pH), nella regolazione del rapporto acqua/cemento e nell'aggiunta di eventuali additivi che compensino il calo del pH e garantiscano il completamento delle reazioni di idratazione del composto. Infatti, sebbene il pH subisca un calo, in alcune miscele ingegnerizzate l'alcalinità residua rimane sufficiente (pH 11-12) per mantenere la passivazione dell'acciaio. [17]

3.2.2) La carbonatazione intesa come stagionatura accelerata

La stagionatura accelerata per carbonatazione, o carbonation curing, avviene sottoponendo i manufatti in calcestruzzo, nelle primissime ore dopo il getto, a un'atmosfera ricca di CO₂ all'interno di camere controllate.^[17]

Durante questo processo di stagionatura, la portlandite non si accumula come nella normale maturazione del calcestruzzo, ma viene attivamente consumata dalla reazione con l'anidride carbonica ^[35].

Nella fase di idratazione iniziale del calcestruzzo i silicati di calcio, reagendo con l'acqua, producono C-S-H e portlandite. Quando il prodotto entra in contatto con l'anidride carbonica, questa reagisce con la portlandite trasformandola in carbonato di calcio solido e acqua.^[35]

A dimostrazione di ciò, le analisi a raggi X effettuate su campioni trattati con "carbonation curing" confermano questo processo. I picchi della portlandite si riducono drasticamente o scompaiono del tutto a favore di un aumento dei picchi associati alle fasi cristalline del carbonato di calcio. Anche l'analisi Termogravimetrica (TGA) mostra una netta riduzione di peso nella fascia compresa tra i 400 e i 500 °C, corrispondente alla decomposizione della portlandite ^[35].

L'efficienza di questo processo è strettamente legata all'umidità relativa, che deve essere accuratamente mantenuta intorno al 50-60%: l'acqua è necessaria per dissolvere gli ioni di calcio, ma un eccesso bloccherebbe i pori impedendo la diffusione del gas.^[17]

Questa reazione genera calcite e un gel di silice amorfa (SiO₂), senza la formazione della tradizionale portlandite ^[16]. I vantaggi di questo processo sono significativi:

- **Prestazioni meccaniche migliori:** consente al calcestruzzo di sviluppare buone resistenze a compressione in pochissime ore o in un solo giorno, superando spesso i valori ottenuti con la stagionatura tradizionale in acqua.

- **Microstruttura:** il carbonato di calcio precipitato all'interno delle porosità contribuisce a aumentare la densità del manufatto, migliorando la resistenza all'assorbimento di acqua e la resistenza verso gli agenti esterni, come solfati o acidi. ^[34] ^[35]

- **Sequestro di Carbonio:** Permette di fissare fino al 10-20% del peso del cemento sotto forma di anidride carbonica permanente.

Tuttavia, la mancata presenza di portlandite nel materiale comporta un calo del pH che negli strati superficiali completamente carbonatati può scendere da circa 13.0 a valori compresi tra 9.1 e 9.9 ^[34], rendendo la matrice cementizia poco adatta al contatto con le armature.

Proprio per questo motivo il "carbonation curing" trova la sua massima e più sicura applicazione nell'industria della prefabbricazione per elementi non armati come blocchi, cordoli o tegole (Fig.10). Questo perché, richiedendo un ambiente chiuso, ben si adatta alla produzione in stabilimento e perché l'abbassamento del pH derivante dal processo lo rende inadatto alla protezione

delle tradizionali armature in acciaio. In caso di necessità strutturale, queste matrici neutralizzate si abbinano perfettamente a rinforzi alternativi, come le barre in polimeri fibrorinforzati, che non temono la corrosione ma che, al contrario traggono beneficio dall'assenza di un ambiente iper-alcalino.



Fig.10: Produzione di blocchi "cement free" presso lo stabilimento di produzione dell'azienda "Patio Drummond" in Quebec. Fase di carbonatazione all'interno di camere controllate.
Fonte: Patio Drummond

3.3) Quando conviene la carbonatazione accelerata: Il rischio di Carbon leakage e l'introduzione del CBAM

Come già ampiamente discusso, il settore del cemento è strutturalmente caratterizzato da un'elevata intensità carbonica, dovuta per due terzi alle emissioni dirette derivanti dalle reazioni chimiche necessarie per la produzione del clinker.

Questa particolarità espone fortemente l'industria europea al rischio di "carbon leakage" ovvero il fenomeno per cui, a causa dei crescenti costi imposti dalle politiche climatiche dell'Unione Europea, le imprese potrebbero essere spinte a trasferire la produzione in Paesi in cui i limiti alle emissioni sono meno rigorosi o inesistenti. [19]

Delle politiche climatiche imposte dall'Unione Europea, tra le più impattanti per le aziende c'è il sistema EU ETS, *European Union Emissions Trading Scheme*, ovvero lo strumento principale dell'UE per la lotta al cambiamento climatico e la riduzione delle emissioni in una modalità che sia economicamente efficiente.

Questo sistema è stato lanciato nel 2005 e rappresentava all'epoca il primo grande mercato mondiale della CO₂. Rimane tuttora il più vasto, andando a coprire il 40% circa delle emissioni totali dell'Unione. [19]

Il sistema si basa sul principio del "Cap and Trade", ovvero le aziende ricevono o acquistano quote di emissioni che possono scambiare sul mercato.

Viene fissato un tetto massimo alla quantità totale di gas serra che può essere emessa dagli impianti coperti dal sistema (circa 10.000). Questo tetto ogni anno viene gradualmente ridotto per garantire che le emissioni totali vadano a diminuire costantemente nel tempo. All'interno di questo meccanismo, le imprese ricevono o acquistano delle quote di emissione. Ogni quota concede l'emissione di una tonnellata di CO₂ (o la quantità equivalente per altri gas serra). Se l'impresa è virtuosa e riduce nel tempo le proprie emissioni, può vendere le quote avanzate. Se al contrario emette più del dovuto, deve acquistare quote aggiuntive che fungono da incentivo economico alla decarbonizzazione.

Questo sistema si è evoluto in diverse fasi negli anni, attualmente siamo nella fase 4 (2021-2030) che adotta standard molto più rigorosi delle fasi precedenti. Se infatti in passato diversi settori esposti alla concorrenza internazionale (come appunto quello del cemento) ricevevano molte quote gratuitamente per evitare il fenomeno del *carbon leakage*, oggi queste quote gratuite stanno diminuendo drasticamente e nel settore del cemento si è passati da 14,6 Mt nel 2019 a circa 10 Mt nel 2021, con l'obiettivo di raggiungere zero quote gratuite entro il 2050.

Con il passare degli anni, all'aumentare delle fasi è aumentato anche l'impatto economico cui le aziende devono far fronte per affrontare il costo delle quote ETS. Nel 2017 infatti, una quota costava appena poco meno di 6 euro, mentre a maggio 2021 aveva già superato i 50 euro. Questo crescente aumento dei costi rende conveniente per le aziende investire in tecnologie costose come la Cattura del Carbonio (CCUS), in quanto il costo dell'investimento diventa inferiore a quello che l'azienda andrebbe a pagare in quote

ETS.

Per salvaguardare la competitività europea, l'UE ha introdotto il CBAM, *Carbon Border Adjustment Mechanism*, una tassazione sui prodotti importati che impone alle aziende importatrici un costo equivalente a quello pagato dalle imprese europee nel sistema ETS [19]. Lo scopo è quello di evitare che aziende extra UE che non adottano esigenti standard ambientali come quelli europei possano trarre profitto da quest'ultimi, garantendo così condizioni di parità sul mercato [20].

Strutturato in modo da rispecchiare il sistema europeo di scambio di quote di emissione (EU ETS) e nel rispetto delle regole dell'Organizzazione Mondiale del Commercio, il suo funzionamento pratico si basa su un sistema di acquisto e restituzione di certificati [21]. In concreto, gli importatori europei devono registrarsi presso le autorità nazionali competenti per ottenere la qualifica di "dichiaranti CBAM autorizzati" [21] [22]. Entro il 31 maggio di ogni anno, questi soggetti sono tenuti a presentare una dichiarazione formale in cui comunicano la quantità esatta di merci importate nell'anno civile precedente e il totale delle emissioni di gas serra in esse incorporate. Insieme alla formulazione della dichiarazione, l'importatore deve "restituire" un numero di certificati CBAM esattamente corrispondente alle emissioni dichiarate. Il costo di tali certificati non è predeterminato, ma viene calcolato dalla Commissione Europea sulla base della media settimanale dei prezzi d'asta delle quote EU ETS, espressa in euro per tonnellata di CO₂. Al fine di garantire equità e premiare gli sforzi climatici globali, qualora il produttore extra-europeo possa dimostrare di aver già pagato un prezzo del carbonio proporzionale alle emissioni incorporate nella merce esportata, tale costo può essere detratto dal numero di certificati CBAM richiesti al momento dell'importazione.

Dopo una prima fase transitoria, durata dal 2023 fino alla fine del 2025, in cui vigevano il solo obbligo di rendicontazione delle emissioni senza oneri finanziari, il meccanismo è entrato pienamente in vigore dal 2026 per tutti i settori selezionati ad alta emissività di gas serra. [21] [20] [22]

3.4) Demolizione circolare e carbonatazione passiva: trasformare le macerie da rifiuto a pozzo di carbonio

Nel dibattito sulla sostenibilità del settore delle costruzioni, la fase di fine vita degli edifici è stata storicamente considerata un onere ambientale, associato alla generazione di enormi volumi di rifiuti e ai conseguenti problemi di smaltimento. Tuttavia, grazie a una più profonda comprensione del ciclo di vita dei materiali cementizi, oggi è possibile rovesciare questo modello: la demolizione, se eseguita e gestita correttamente, può rappresentare non soltanto l'inizio del riciclo dei materiali, ma può rappresentare una straordinaria opportunità per la mitigazione climatica attraverso il fenomeno della **carbonatazione passiva**.

Il calcestruzzo non è un materiale inerte, ma interagisce chimicamente con l'atmosfera per tutta la sua esistenza. Il processo di ricarbonatazione passiva consiste nel riassorbimento naturale dell'anidride carbonica (CO₂) atmosferica da parte della pasta di cemento idratata, che converte l'idrossido di calcio in carbonato di calcio. [15]

Se in un edificio integro questo assorbimento è un processo estremamente lento, limitato dalla poca superficie esposta all'atmosfera e dalla compattezza del materiale, la situazione cambia drasticamente durante la demolizione. Quando una struttura viene abbattuta e il calcestruzzo viene ridotto in frantumi, la superficie del materiale esposta all'aria si moltiplica in modo esponenziale, innescando una fortissima accelerazione del processo di ricarbonatazione [15]. Le macerie, di fatto, si trasformano in vere e proprie spugne in grado di sequestrare stabilmente quantità significative di CO₂ dall'aria, agendo come pozzi di assorbimento del carbonio.

3.4.1) Un nuovo modello economico: premiare il corretto conferimento delle macerie

Nonostante il grande potenziale che un corretto conferimento delle macerie rappresenterebbe in ottica di assorbimento di CO₂, la gestione dei rifiuti da costruzione presenta ancora oggi problematiche non da poco conto. Molto spesso infatti, per evitare i costi di conferimento, le macerie finiscono in discariche illegali o vengono disperse nell'ambiente, causando inquinamento e vanificando la possibilità di recupero [23] [19].

Per favorire un giusto smaltimento presso impianti di riciclaggio autorizzati, diventa necessario effettuare un cambio di rotta basato su incentivi economici diretti. L'idea principale è quella di riconoscere un "premio" economico, o l'assegnazione di *Carbon Credits*, alle ditte di demolizione e costruzione che certificano il corretto conferimento delle macerie presso gli impianti appositi [19]. In un mercato in cui le emissioni hanno un costo sempre più elevato, la CO₂ che quelle macerie andranno a sequestrare possiede un valore economico tangibile. Riconoscere una quota di questo valore (tramite crediti scambiabili sul mercato o sgravi fiscali) a chi smaltisce correttamente, annullerebbe la convenienza dello smaltimento abusivo, dirottando enormi flussi di materiale verso la filiera legale e circolare.

L'introduzione di questo sistema premiante genererebbe un vantaggio immediato per gli impianti di riciclaggio, i quali vedrebbero aumentare esponenzialmente i volumi di macerie in ingresso.

All'interno di questi impianti, il processo di trattamento non dovrebbe essere immediato. Sfruttando la chimica della ricarbonatazione, gli impianti di smaltimento evolverebbero in veri e propri "siti di stoccaggio".

Le macerie frantumate verrebbero lasciate "stagionare" in cumuli esposti all'aria per un determinato periodo di tempo X. Durante questo periodo, il materiale massimizzerebbe la cattura di un quantitativo Y di CO₂ dall'atmosfera. Solo al termine di questa fase di assorbimento naturale, il calcestruzzo verrebbe sottoposto ai definitivi processi di vagliatura e riciclo per la creazione di nuovi inerti (aggregati riciclati) pronti per essere reintrodotti sul mercato [19].

Il ciclo dell'economia circolare non può dirsi concluso se il materiale riciclato non trova acquirenti. Perché un produttore di calcestruzzo dovrebbe acquistare inerti riciclati piuttosto che la più economica materia prima vergine estratta in cava?

La risposta sta nella normativa. Per incentivare l'acquisto di aggregati riciclati è fondamentale un inasprimento dei CAM *Criteri Minimi Ambientali* [24]. Se per gli appalti delle opere pubbliche si rendesse obbligatorio e stringente l'utilizzo di una quota minima, ben più elevata di quella attuale, di inerte riciclato all'interno dei nuovi calcestruzzi, le aziende produttrici sarebbero obbligate a rivolgersi agli impianti di riciclaggio. Questo meccanismo genererebbe una domanda stabile, rendendo economicamente sostenibile l'intera filiera: dalla demolizione selettiva passando per la stagionatura assorbiti-CO₂ fino alla vendita del nuovo aggregato "green" [19].

3.4.2) Realtà attuale e prospettive future

- Il premio in Crediti di Carbonio per le demolizioni:

Attualmente, i mercati dei crediti di carbonio (come l'EU ETS) si applicano ai grandi emettitori industriali (come ad esempio le cementerie).

L'idea di monetizzare la ricarbonatazione passiva assegnando un premio economico diretto o *carbon credits* alle ditte di demolizione che conferiscono il materiale agli impianti rappresenterebbe un grande passo in avanti verso una demolizione e un riciclo consapevole.

A mancare è dunque un sistema normativo certificato in grado di tracciare e retribuire questo specifico "mancato inquinamento" dovuto alla ricarbonatazione del calcestruzzo e in particolare delle macerie frantumate, nonostante rappresenti una realtà scientifica pienamente riconosciuta. Proprio L'IPCC (Gruppo Intergovernativo sul Cambiamento Climatico dell'ONU) riconosce infatti ufficialmente questo fenomeno come un pozzo di assorbimento attivo [15].

- Impianti di riciclaggio strutturati come "siti di stoccaggio":

Nonostante sia scientificamente riconosciuto il fatto che lasciare le macerie all'aperto funga da pozzo di assorbimento di anidride carbonica, oggi gli impianti di riciclaggio non sono strutturati, né incentivati, per far "stagionare" lunghi periodi le macerie. L'obiettivo attuale è smaltire i volumi il più in fretta possibile per ragione di spazi e costi.

- CAM stringenti:

I criteri Ambientali Minimi sono già realtà e prescrivono l'uso di materiali recuperati per l'edilizia pubblica, generalmente attestati intorno al 5%.

Per compiere un ulteriore salto in avanti sarebbe necessario un innalzamento di questa percentuale ed un utilizzo di aggregati riciclati non più relegato a opere meramente non strutturali. La sfida del prossimo futuro, che dipenderà dalla capacità della filiera di migliorare le tecniche di demolizione selettiva [23], sarà infatti quello di innalzare la qualità degli inerti da riciclo allargando così un loro utilizzo anche per opere strutturali.

Attività Sperimentale

Il capitolo affronta il percorso dell'attività sperimentale svolta presso il laboratorio LINCE, DISAT, del Politecnico di Torino da Giugno 2025 a Novembre 2025.

E' stato analizzato un sottoprodotto industriale in polvere sottoposto a processi di valorizzazione volti alla cattura di CO₂ e all'incremento di reattività.

In seguito alla produzione delle polveri sono state effettuate prove di caratterizzazione chimica, test di reattività e prove meccaniche sulle relative paste cementizie.

L'**obiettivo** è stato quello di studiare se possono essere impiegati trattamenti di carbonatazione per valorizzare scorie provenienti dal mondo della produzione dell'acciaio. In particolare, è stata analizzata la possibilità di catturare CO₂ e allo stesso tempo di migliorare la reattività idraulica delle polveri una volta impiegate in impasti cementizi.

E' stata infine investigata la possibilità di impiegare dei prodotti chimici per migliorare l'efficienza del processo.

Lo studio si inserisce all'interno di una strategia più ampia volta alla decarbonizzazione dell'industria del cemento. La riduzione dell'impronta di carbonio è ottenuta sostituendo parte del cemento con il sottoprodotto trattato. Inoltre, un ulteriore taglio delle emissioni è dovuto alla cattura diretta di CO₂ del sottoprodotto impiegato. Infine, la valorizzazione e il riuso di uno scarto industriale, come la steel slag, contribuisce ulteriormente alla strategia complessiva di decarbonizzazione del settore.

Il processo proposto, che si basa su un trattamento poco energivoro (temperatura e pressione ambientale), si presta a future applicazioni volte alla scalabilità in impianti industriali. Da questo punto di vista, lo studio apre la strada a futuri scenari che vedono l'implementazione del processo di carbonatazione in impianti integrati alla produzione di cemento.

04) Attività Sperimentale

4.1) La preparazione delle polveri

4.2) Test effettuati

4.3) Prove meccaniche

4.4) Risultati ottenuti

4.1) La preparazione delle polveri

Le quattro tipologie di polveri analizzate sono state:

- CEM I 52.5 N, Cemento 100% Portland:

Lo scopo dell'utilizzo di questa polvere è stato quello di usarla come campione di riferimento rispetto alle altre polveri e relative paste cementizie prodotte in seguito.

- Scoria di acciaio macinata (Ground Granulated Basic Oxygen Furnace Steel Slag) proveniente da un impianto di produzione di acciaio localizzato in Europa:

La seconda tipologia di polvere utilizzata è stata una scoria di acciaio, dalla granulometria affine a quella del cemento standardizzato sopra citato. In questo caso la polvere non ha subito processi aggiuntivi in laboratorio ed è stata utilizzata così come ci è stata fornita dall'impianto di produzione dell'acciaio.

- Scoria di acciaio macinata carbonatata tramite processo di “Aqueous Carbonation”:

La terza tipologia di polvere utilizzata ha invece subito un processo di mineralizzazione in laboratorio. La scoria di acciaio macinata fornitaci dall'impianto è stata sottoposta a un processo di carbonatazione diretta in acqua tramite insufflaggio di anidride carbonica.

- Scoria di acciaio macinata carbonatata in soluzione acida tramite processo di “Aqueous Carbonation”:

La quarta tipologia di polvere utilizzata ha seguito un processo in laboratorio simile alla terza polvere. La differenza risiede nel processo di carbonatazione, invece di utilizzare acqua distillata, è stata utilizzata una soluzione acida al fine di promuovere il rilascio di calcio e migliorare la reattività della polvere trattata.

Per brevità, nel corso della trattazione, le polveri sopra citate (e le relative paste) verranno identificate rispettivamente come: CEM_Ref, SS_AR, SS_C, SS_C_A.

Nelle sezioni successive verranno descritti i processi di carbonatazione che hanno portato alla formazione delle ultime due polveri (SS_C e SS_A_C).

SS_C:

Componenti utilizzati:

Acqua distillata: 500 g
Polvere: 100 g
Flusso di CO₂: 250 l/h
Tempo: 60 minuti
Rpm: 3800 (centrifuga)
Rapporto liquido/solido: 5

Il processo:

In condizioni di temperatura e pressione ambientali sono state dosate le corrette quantità di acqua distillata e polvere (Steel Slag), al fine di preparare un impasto con un rapporto liquido/solido pari a 5. La miscela è stata preparata lavorando sotto cappa, ed omogenizzandola attraverso l'uso di un agitatore magnetico impostato ad una velocità di circa 750 rpm. Sulla piastra dell'agitatore è stata posizionata una beuta con all'interno un magnete; all'acqua deionizzata contenuta nella beuta è stata poi addizionata lentamente la polvere.

A questo punto sono stati misurati sia temperatura che pH (questi due parametri sono stati misurati due volte: all'inizio e alla fine del processo di carbonatazione: si è osservato un aumento della temperatura dal valore iniziale di 25,8 °C a quello finale di 34,9 °, ed una contestuale diminuzione del pH dal valore iniziale di 12,50 a quello finale di 6,84.

Dopo aver addizionato tutta la polvere è stato posizionato il tubo dell'anidride carbonica all'interno della beuta, è stata aperta la valvola della bombola di CO₂ (impostata tra 0 e 1 bar) e la miscela è stata lasciata sotto flusso di CO₂ (impostato a 250 l/h) per 60 minuti. (Fig.11)

Una volta terminati i 60 minuti per il conseguimento del processo di carbonatazione (Fig.12), si è passati alla separazione solido-liquido tramite centrifuga. La miscela, opportunamente omogenizzata, è stata divisa e inserita in 4 provettoni per centrifuga ed il processo avviato ad una velocità di 3800 rpm per una durata di 5 minuti. (Fig.14)

Dopo aver effettuato la centrifugazione e aver separato il liquido in eccesso, il composto è stato trasferito in un contenitore in vetro e lasciato essiccare a 60°C per 24 h. (Fig.13)

A valle dell'essiccamento la polvere ottenuta è stata impiegata per i test di caratterizzazione e per il confezionamento delle paste.

SS_C_A:

Componenti utilizzati:

Soluzione acida: 500 g
Polvere: 100 g
Flusso di CO₂: 250 l/h
Tempo: 60 minuti
Rpm: 3800 (centrifuga)
Rapporto liquido/solido: 5

Il processo:

In condizioni di temperatura e pressione ambientali sono state dosate le corrette quantità di soluzione acida e polvere (Steel Slag), al fine di preparare un impasto con rapporto liquido/solido pari a 5. La miscela è stata preparata lavorando sotto cappa, ed omogenizzandola attraverso l'uso di un agitatore magnetico impostato ad una velocità di circa 750 rpm. Sulla piastra dell'agitatore è stata posizionata una beuta con all'interno un magnete; all'acqua deionizzata contenuta nella beuta è stata poi addizionata lentamente la polvere.

A questo punto sono stati misurati sia temperatura che pH (questi due parametri sono stati misurati tre volte: inizialmente è stata misurata la temperatura prima della miscelazione, dunque della singola soluzione acida e la polvere; poi è stata misurata la temperatura a seguito della miscelazione che è durata 30 minuti e dunque all'inizio della fase di carbonatazione; infine al termine del processo di carbonatazione. Si è osservata una diminuzione della temperatura iniziale di 31,3 °C rispetto a quella intermedia di 30,0 °C e un aumento rispetto alla temperatura finale di 34,2 °C. Contestualmente c'è stato un innalzamento del pH che nella fase iniziale del processo era pari a 12,03 mentre nella fase intermedia di 12,38. Rispetto alla fase finale del processo c'è stato invece un abbassamento del pH che era pari a 6,42).

Dopo aver addizionato tutta la polvere è stato posizionato il tubo dell'anidride carbonica all'interno della beuta, è stata aperta la valvola della bombola di CO₂ (impostata tra 0 e 1 bar) e la miscela è stata lasciata sotto il flusso di CO₂ (impostato a 250 l/h) per 60 minuti.

Una volta terminati i 60 minuti per il conseguimento del processo di carbonatazione si è passati alla separazione solido-liquido tramite centrifuga. La miscela, opportunamente omogenizzata, è stata divisa e inserita in 4 provettoni per centrifuga ed il processo avviato ad una velocità di 3800 rpm per una durata di 5 minuti.

Dopo aver effettuato la centrifugazione e aver separato il liquido in eccesso, il composto è stato trasferito in un contenitore di vetro e lasciato essiccare a 60°C per 24 h.

A valle dell'essiccamento la polvere ottenuta è stata impiegata per i test di caratterizzazione e per il confezionamento delle paste.



Fig. 11) Il composto è in fase di carbonatazione sotto aspirazione



Fig. 12) composto carbonatato



Fig. 13) Il composto a seguito della centrifuga e della stagionatura



Fig. 14) Fase di centrifuga

4.2) Test effettuati

Caratterizzazione **XRD**:

La caratterizzazione X-Ray Diffraction (XRD) è stata utilizzata per identificare le fasi cristalline (minerali) presenti nei materiali. Il test è stato condotto utilizzando un diffrattometro a raggi X Malvern Panalytical Empyrean (Fig.15) operante a 40 kV e 40 mA. La misurazione ha utilizzato un passo di 0,06 ° e una durata di 23 secondi per passo, scansionando l'angolo 2θ in un intervallo compreso tra 5° e 70°. Lo strumento presentava una configurazione Bragg-Brentano e impiegava un rilevatore PIXcel.

Come funziona la caratterizzazione:

La polvere viene pressata all'interno del foro del porta-campione del diffrattometro, un disco metallico con uno spazio circolare all'interno (Fig.16). E' fondamentale che la superficie sia perfettamente piana per garantire che i raggi X vengano diffratti correttamente. Una volta preparato il disco con la polvere livellata, questo verrà inserito all'interno del diffrattometro a raggi X. Il macchinario scansiona il campione in polvere esponendolo a radiazioni X, che sono diffratte dai piani cristallografici dei composti cristallini che compongono la polvere. Il test produce un “pattern” di picchi di intensità. La posizione e l'altezza di questi picchi permettono di identificare le fasi cristalline, e da queste la composizione mineralogica della polvere. (Fig 17/18/19)



Fig. 15) Diffrattometro a Raggi X. Modello: Malvern Panalytical Empyrean



Fig. 16) Posizionamento del campione per l'analisi XRD

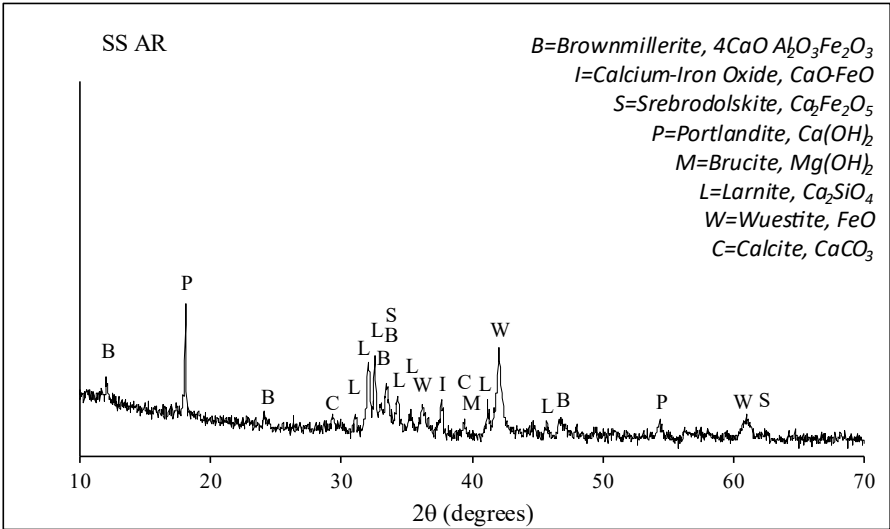


Fig. 17) Risultati analisi Raggi X per SS_AR

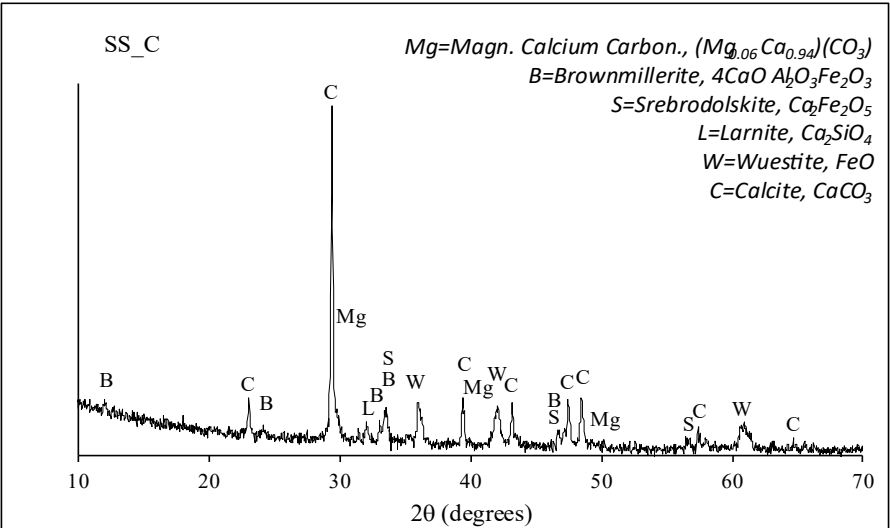


Fig. 18) Risultati analisi Raggi X per SS_C

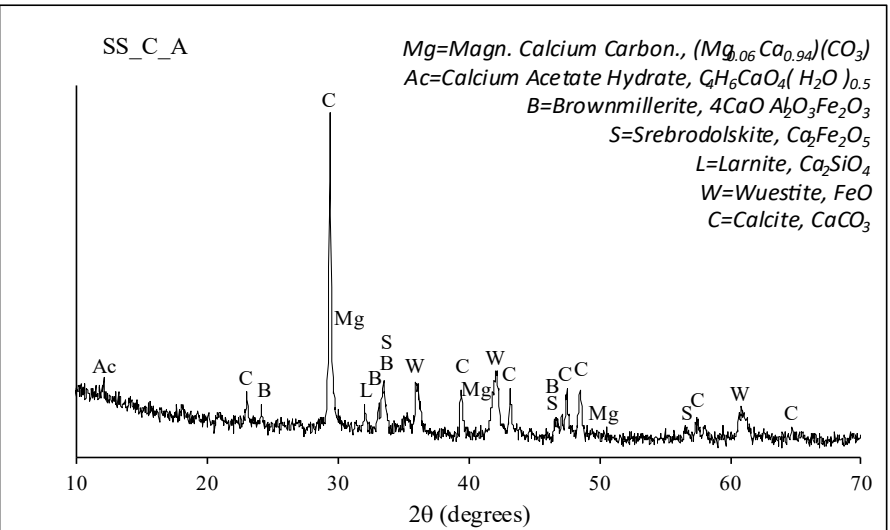


Fig. 19) Risultati analisi Raggi X per SS_C_A

Caratterizzazione **TG-DTA**:

La caratterizzazione attraverso *Thermogravimetric-Differential Thermal analysis* (TG-DTA) è stata impiegata nello studio per corroborare quantitativamente i risultati delle analisi ai raggi x, e per quantificare il contenuto di alcuni composti.

L'analisi è stata eseguita riscaldando i campioni in crogioli di allumina (Fig.20) a temperature fino a 1050°C, con una velocità di riscaldamento di 10°C al minuto. Il gas di trasporto utilizzato è stato l'azoto, con un flusso di 20L/min per mantenere un'atmosfera protettiva.

L'obiettivo principale di questo test è stato quello di quantificare il contenuto di CO₂ assorbita dal materiale. Questo assorbimento è stato quantificato calcolando la perdita di peso del campione nell'intervallo di temperatura compreso tra 550°C e 850°C [12]. Questa specifica perdita di massa è associata alla completa decomposizione del carbonato di calcio e dunque dell'effettivo assorbimento di CO₂.



La curva termogravimetrica (TG) nera (Fig.21/22/23) mostra la perdita di massa del campione durante il riscaldamento. L'area compresa tra i 550°C e gli 850°C rappresenta quella di maggior interesse ai fini del nostro obiettivo, in quanto indica l'intervallo termico di decomposizione dei carbonati.

Per quanto riguarda la SS_AR notiamo una perdita di massa minima in questo intervallo (pari allo 0,8%), confermando un basso contenuto iniziale di CO₂. Per quanto riguarda invece le restanti due polveri SS_C e SS_A_C notiamo un drastico calo della curva TG in quella zona, pari a una perdita di massa rispettivamente del 17% e del 15,7%. Questo indica la decomposizione termica del carbonato di calcio formatosi durante il processo di carbonatazione e l'avvenuta mineralizzazione della CO₂.

La curva rossa relativa all'analisi termica differenziale (DTA) identifica invece i processi esotermici o endotermici. Per quanto riguarda le polveri SS_C e SS_A_C osserviamo un picco molto pronunciato verso il basso intorno agli 800°C - 830°C. Questo picco rappresenta l'energia assorbita per decomporre la CaCO₃ e rilasciare CO₂ gassosa.

I grafici confermano che il trattamento di carbonatazione ha trasformato le componenti reattive del materiale in carbonato di calcio stabile, incrementando la massa di CO₂ sequestrata nel materiale.

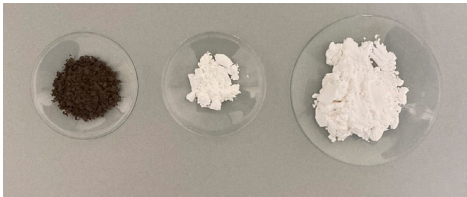


Fig. 20) Preparazione per test TGA: Steel Slag, idrossido di calcio (Portlandite) e Carbonato di Calcio (calcite).

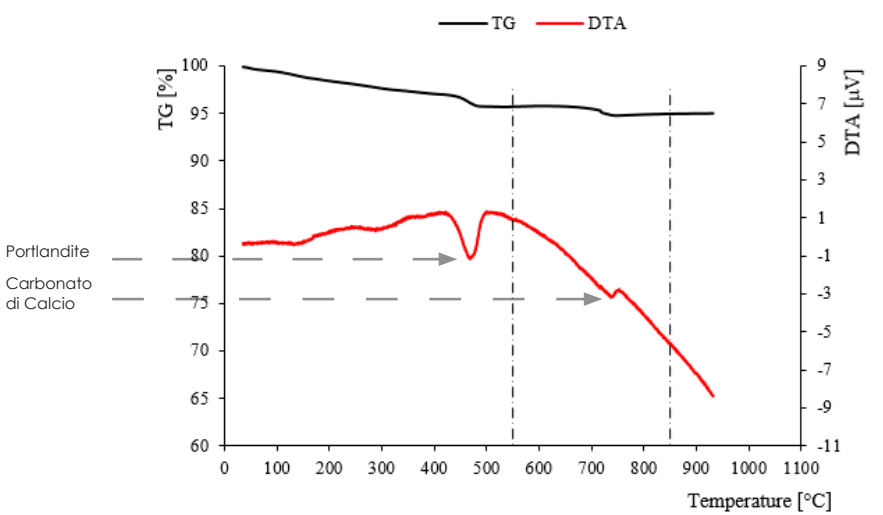


Fig. 21) Risultati analisi TGA per SS_AR

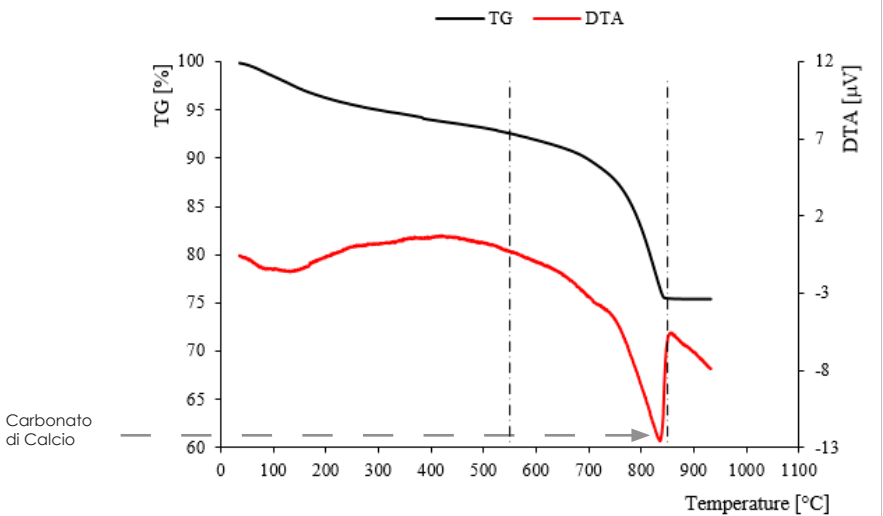


Fig. 22) Risultati analisi TGA per SS_C

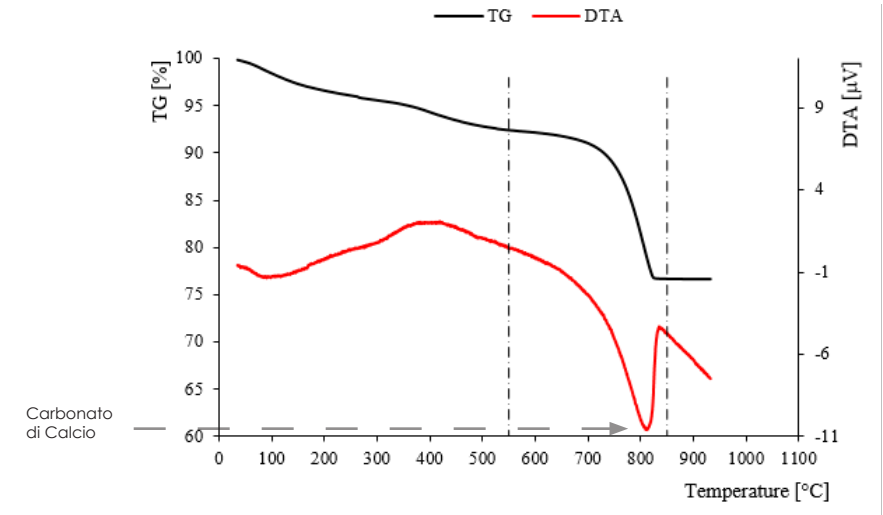


Fig. 23) Risultati analisi TGA per SS_C_A

Test **Bound Water** e **Portlandite Consumption**:

Questo test è stato effettuato per calcolare la reattività idraulica generale (Bound Water) e nello specifico la reattività pozzolanica (Portlandite Consumption) del materiale.

Il Bound Water test serve a quantificare l'acqua fisica assorbita dal gel tobermoritico (o in generale C-S-H). Sebbene non quantifichi la presenza dei C-S-H ne indica una maggiore o minore presenza. Un maggiore valore di questo parametro indica una maggiore presenza di C-S-H, quindi un miglior processo di idratazione.

La Portlandite Consumption indica la capacità del materiale di reagire con l'idrossido di calcio (portlandite, $\text{Ca}(\text{OH})_2$). Questa capacità, tipica dei materiali a base di silice amorfa, viene anche definita con il termine di pozzolanicità.

La prima fase del processo è stata quella di preparare un composto miscelando il materiale con una quantità nota di portlandite, carbonato di calcio, steel slag e una soluzione di idrossido/solfato di potassio (KOH) (Fig.24/26).

La soluzione di idrossido/solfato di potassio è stata poi utilizzata per tutti i test di Portlandite Consumption effettuati ed è formata da 100g di acqua, 2g di solfato di potassio e 0,4g di idrossido di potassio.

La miscela è stata poi sigillata ermeticamente per prevenire l'evaporazione dell'acqua e, soprattutto, per evitare fenomeni di carbonatazione naturale causata dal contratto con l'anidride carbonica presente nell'aria (Fig.25).

Nei 7 giorni successivi il composto viene mantenuto a una temperatura costante di 40°C, in stufa, per facilitare e accelerare le reazioni di idratazione in tempi brevi.

Durante questi 7 giorni il materiale pozzolanico consuma la portlandite disponibile per formare nuovi prodotti leganti come i C-S-H.

Allo scadere dei 7 giorni una parte della pasta viene prelevata e sottoposta a un processo di essiccazione a 40°C per 24 ore in una stufa da vuoto. Questo passaggio è fondamentale per bloccare la reazione di idratazione e rimuovere l'acqua non combinata chimicamente, preparando il campione per l'analisi termica finale.

Trascorse 24 ore si quantifica la portlandite rimasta nel campione tramite TG-DTA. La differenza tra la quantità iniziale e quella residua rappresenta quanta portlandite è stata consumata.

Durante il riscaldamento del campione da 30°C a 950°C, lo strumento registra diverse perdite di massa in intervalli di temperatura differenti.

Per il Bound Water (BW): viene analizzata la perdita di massa tra i 40°C e i 350°C. Questo valore quantifica l'acqua rilasciata dai silicati di calcio idrati (C-S-H) formati.

Per la Portlandite Consumption (PC): viene analizzata la perdita di massa legata alla deidrossilazione dell'idrossido di calcio residuo, che avviene solitamente intorno ai 400°C-500°C [24].

Test **Bound Water** e **Portlandite Consumption** per SS_AR:

- Quantità attese:
- Soluzione di Potassio: 10,8 g
 - CaCO_3 : 1 g
 - $\text{Ca}(\text{OH})_2$: 6 g
 - Steel Slag (As Received): 2 g
- Quantità effettivamente utilizzate:
- Soluzione di Potassio: 10,8064 g
 - CaCO_3 : 1,0009 g
 - $\text{Ca}(\text{OH})_2$: 6,0019 g
 - Steel Slag (As Received): 2,0018 g

	7/07/2025	14/07/2025	15/07/2025
Peso totale (vetro+sacchetto+mix)	55,57 g	54,62 g	45,47 g
Peso vetro	34,96 g	34,96 g	
Peso sacchetto	1,24 g		
peso netto mix	19,37 g		
Peso sacchetto + mix	20,57 g	19,71 g	

Test **Bound Water** e **Portlandite Consumption** per SS_C:

- Quantità attese:
- Soluzione di Potassio: 10,8 g
 - CaCO_3 : 1 g
 - $\text{Ca}(\text{OH})_2$: 6 g
 - Steel Slag (As Received): 2 g
- Quantità effettivamente utilizzate:
- Soluzione di Potassio: 10,7937 g
 - CaCO_3 : 1,0001 g
 - $\text{Ca}(\text{OH})_2$: 6,0024 g
 - Steel Slag (As Received): 2,0008 g

	7/07/2025	14/07/2025	15/07/2025
Peso totale (vetro+sacchetto+mix)	57,29 g	56,48 g	47,34 g
Peso vetro	37,00 g	37,00 g	
Peso sacchetto	1,22 g		
peso netto mix	19,02 g		
Peso sacchetto + mix	20,23 g	19,50 g	

Test **Bound Water** e **Portlandite Consumption** per SS_C_A:

Quantità attese:

- Soluzione di Potassio: 10,8 g
- CaCO_3 : 1 g
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$: 6 g
- Steel Slag (As Received): 2 g

Quantità effettivamente utilizzate:

- Soluzione di Potassio: 10,8066 g
- CaCO_3 : 1,0006 g
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$: 6,0000 g
- Steel Slag (As Received): 2,0003 g

	8/07/2025	15/07/2025	16/07/2025
Peso totale (vetro+sacchetto+mix)	57,78 g	57,06 g	48,48 g
Peso vetro	38,44 g	38,44 g	
Peso sacchetto	1,21 g		
peso netto mix	18,09 g		
Peso sacchetto + mix	19,33 g	18,58 g	



Fig. 24) Soluzione di Potassio, Steel Slag, Idrossido di Calcio e Calcite

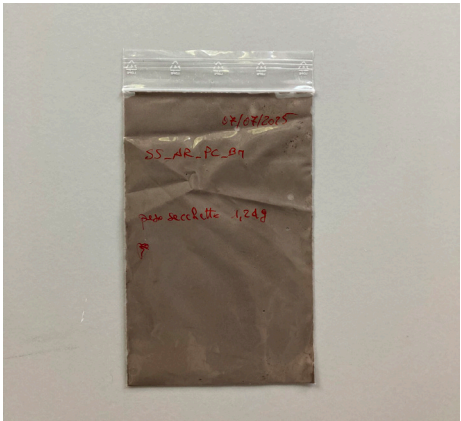


Fig. 25) Composto sigillato



Fig. 26) Misurazione quantità delle componenti che formano il composto

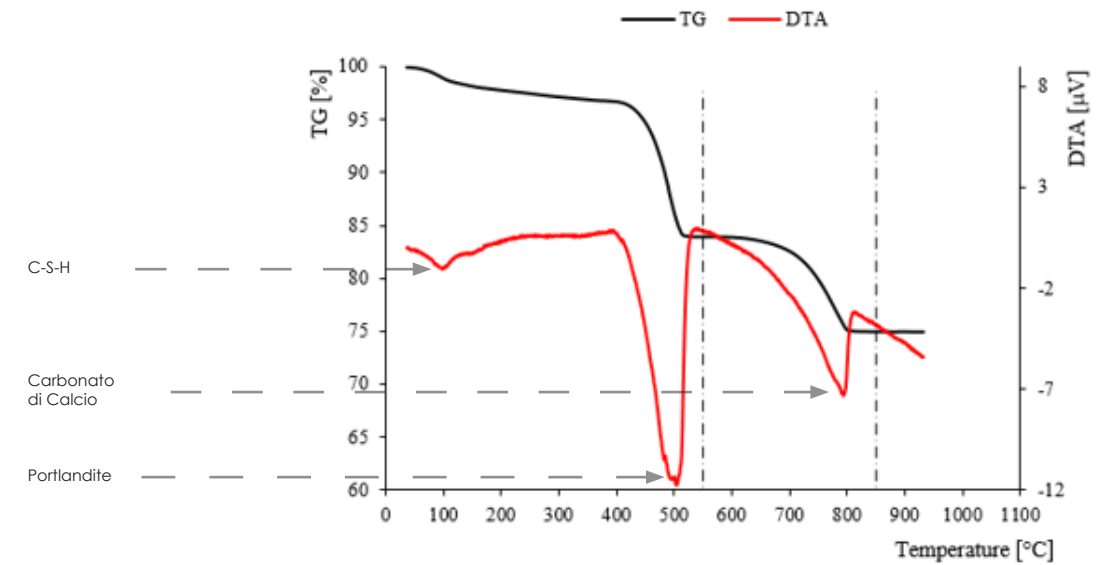


Fig. 27) Risultati analisi BW_PC per SS_AR

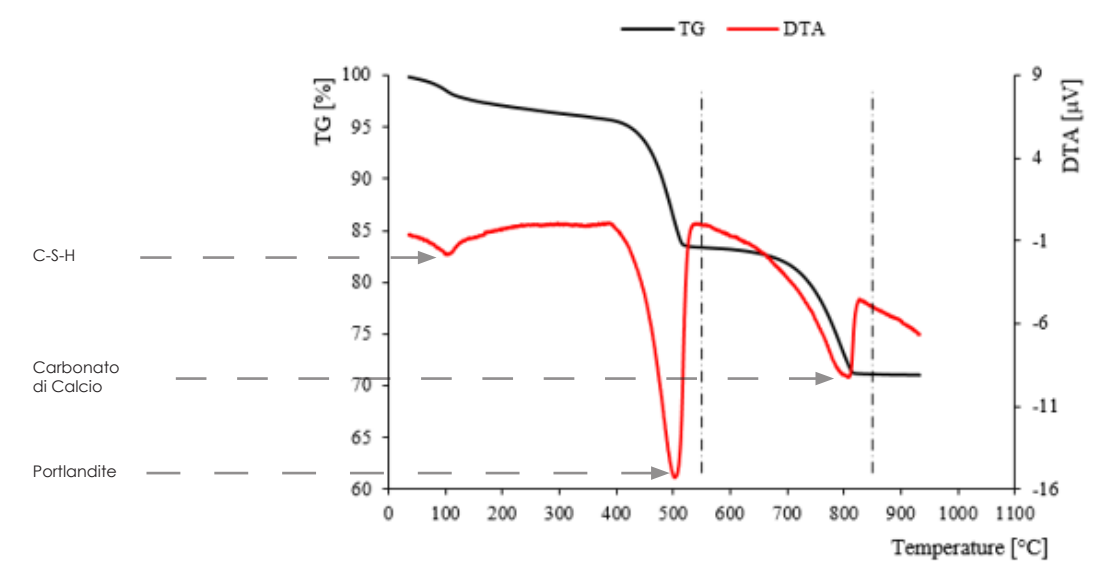


Fig. 28) Risultati analisi BW_PC per SS_C

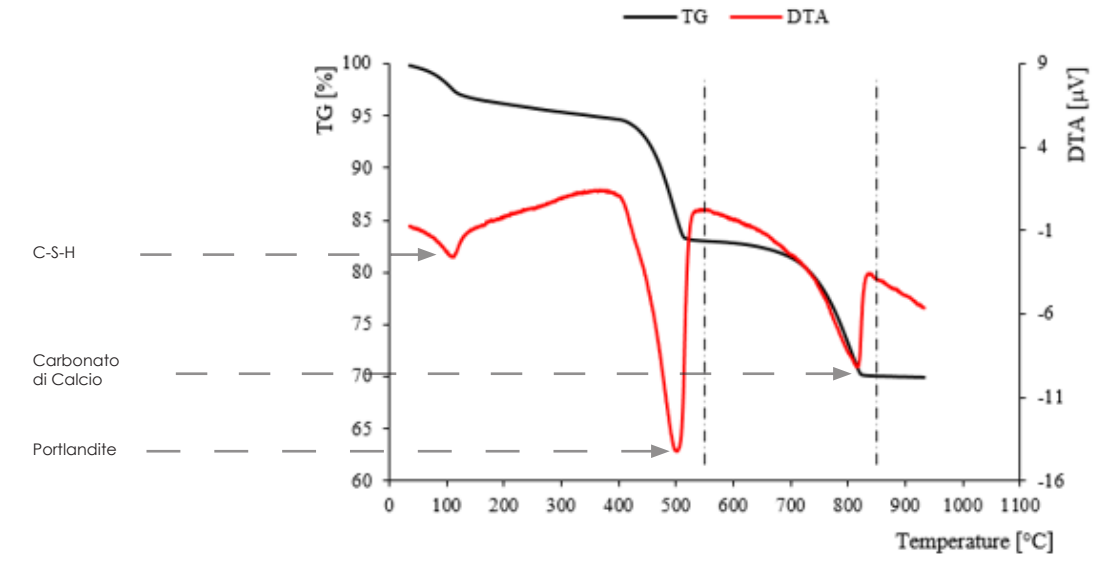


Fig. 29) Risultati analisi BW_PC per SS_C_A

4.3) Prove meccaniche:

A seguito dei test effettuati si è proceduto con la produzione delle quattro tipologie di paste cementizie differenti e le relative prove meccaniche effettuate su provini 20 mmX20mmX80mm (Fig.30/31). In seguito al getto, i campioni sono stati scasserati dopo 24h (Fig.32) e immersi in acqua per la maturazione fino al momento dei test, effettuati a: 3, 7, 28 e 56 giorni. Il contatto con l'acqua serve a mantenere l'umidità costante e favorire le reazioni di idratazione del cemento. Composizione delle quattro differenti paste cementizie, miscelate per 10 minuti:

	Percentuale di sostituzione	Provino Utilizzato	CEM I	Steel Slag	Acqua
CEM_Ref	0%	20X20X80 mm ³	200 g	0 g	100g
SS_AR	20%	20X20X80 mm ³	160 g	40 g	100g
SS_C	20%	20X20X80 mm ³	160 g	40 g	100g
SS_A_C	20%	20X20X80 mm ³	160 g	40 g	100g



Fig. 30) Getto della pasta cementizia all'interno dei casseri



Fig. 31) Stagionatura della pasta cementizia per 24h



Fig. 32) Provini scasserati prima di essere immersi in acqua

La macchina utilizzata per effettuare le prove meccaniche è stata il modello "MEGA 100-300-30 DM1" (Fig.33). La struttura è dotata di celle di carico specifiche (in questo caso da 50 kN) per diverse scale di forza, nel caso del nostro studio le velocità di carico impostate sono state:

- 10 N/s per le prove di resistenza a flessione
- 500 N/s per le prove di resistenza a compressione (Fig.34)

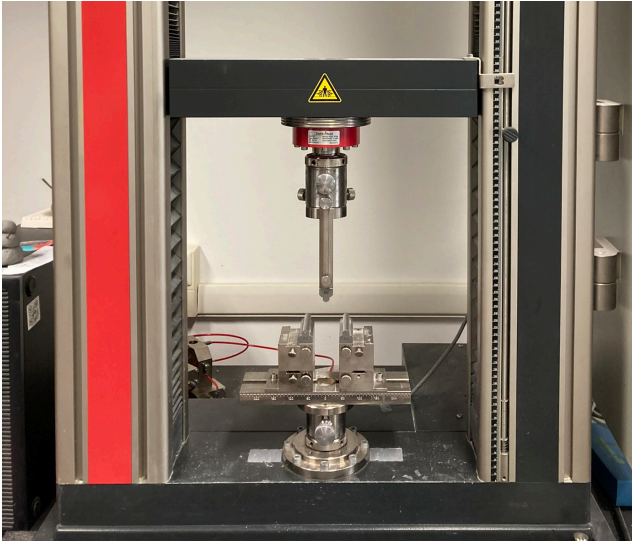


Fig. 33) Preparazione macchina per prove di resistenza a flessione

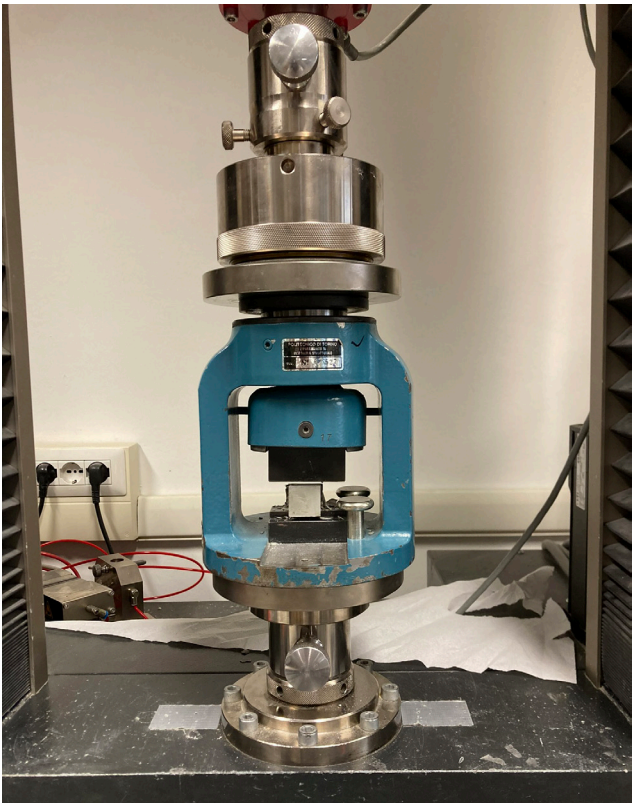


Fig. 34) Preparazione macchina per prove di resistenza a compressione

Prove di resistenza a compressione:

I grafici seguenti (Fig.35/36/37/38) mostrano i valori medi di resistenza a compressione misurati a 3, 7, 28 e 56 giorni. I risultati di alcuni provini sono stati omessi in quanto hanno subito una rottura prematura a causa del mancato allineamento della piastra di carico. La normativa UNI-EN 196-1 impone infatti di non considerare i provini che differiscono dalla media per più del 10%. Osservando il trend dei valori medi (barra con pattern a tratteggio, riportante anche la deviazione standard), notiamo un'evoluzione significativa. Andando ad analizzare questa progressione nel breve, medio e lungo termine notiamo che:

- **Resistenza a 3 giorni:** Nel brevissimo termine, il campione di riferimento Portland registra i valori nettamente più alti, attestandosi a 36,1 MPa. Confrontandola con le altre tre paste cementizie contenenti il 20% di Steel Slag, si nota che la miscela trattata in soluzione acida e la scoria vergine non trattata presentano valori medi quasi identici. Osservando le deviazioni standard, le barre di errore ci indicano due paste che si comportano in modo quasi indistinguibile, confermando il fisiologico ritardo di idratazione iniziale degli SCM carbonatati senza mostrare ancora alcun divario reale(Fig.35).

- **Resistenza a 7 giorni:** A una settimana dal getto, il campione di riferimento "CEM_ref" sale ulteriormente, mentre si osserva un lieve sorpasso del valore medio del campione SS_C_A sulla scoria non trattata (SS_ar). Tuttavia, guardando la deviazione standard , le barre di errore continuano a sovrapporsi ampiamente. A questo stadio, non possiamo definire questo scarto numerico come un "incremento" reale o statisticamente rilevante. (Fig.36)

- **Resistenza a 28 giorni:** Nel medio termine, la tendenza si stabilizza. Il valore medio del campione SS_C_A si posiziona vicinissimo a quello del campione SS_ar. Analizzando l'errore, la barra della deviazione standard di SS_C_A risulta estremamente ampia e va a coprire quasi interamente il range di SS_ar. Pertanto, anche a 28 giorni, non vi è ancora alcuna evidenza statistica di un distacco prestazionale netto tra la polvere trattata e quella vergine. Va inoltre considerata l'anomalia del campione SS_C, il cui calo è viziato dalla rottura prematura di due provini a causa di un mancato allineamento della piastrra di carico.(Fig.37)

- **Resistenza a 56 giorni:** Questo è il momento della svolta e l'unico punto in cui il miglioramento è inequivocabile e statisticamente robusto. Il campione SS_C_A subisce un'impennata raggiungendo una media di 57,5 MPa. Crucialmente, il limite inferiore della sua deviazione standard si posiziona nettamente al di sopra del limite superiore della barra di errore sia del campione SS_ar sia del campione SS_C. La sovrapposizione statistica sparisce del tutto: il distacco è reale e certifica definitivamente che il trattamento di carbonatazione in soluzione acida trasforma la scoria in un legante ad altissima efficienza, il quale richiede però tempi di maturazione lunghi per far emergere i propri benefici.(Fig.38)

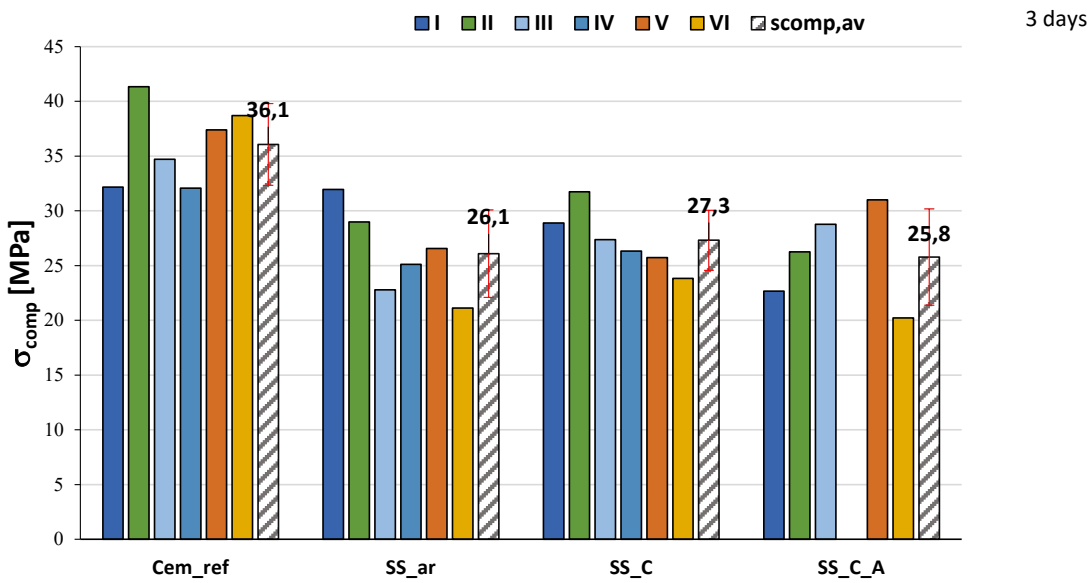


Fig. 35) Resistenza a compressione a 3 giorni

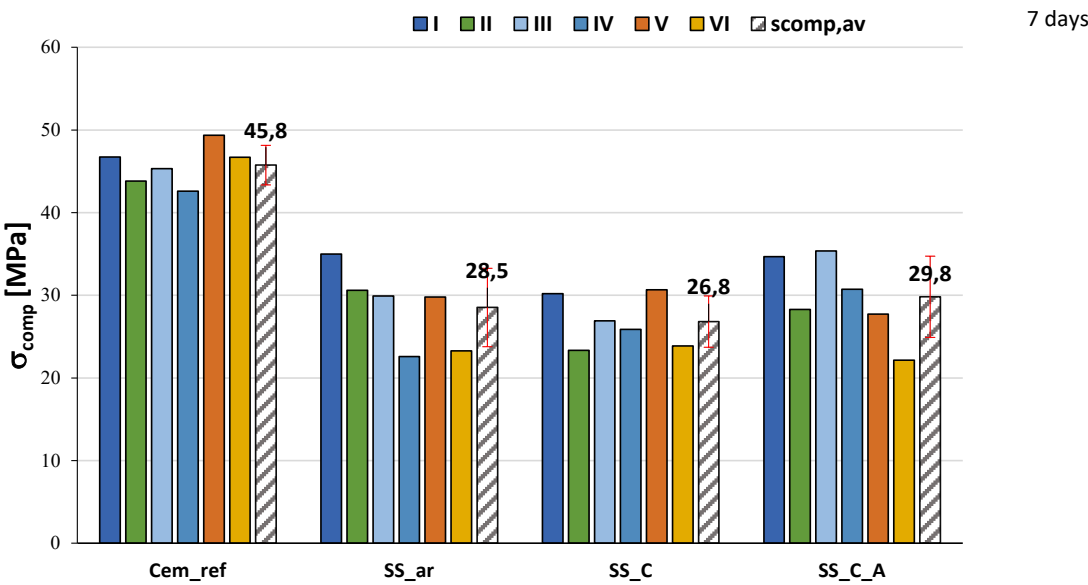


Fig. 36) Resistenza a compressione a 7 giorni

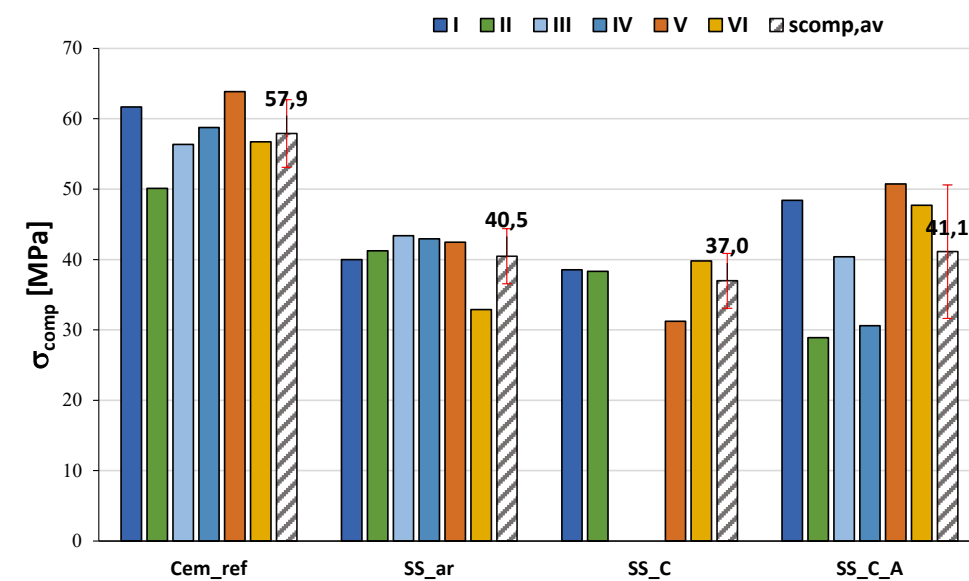


Fig. 37) Resistenza a compressione a 28 giorni

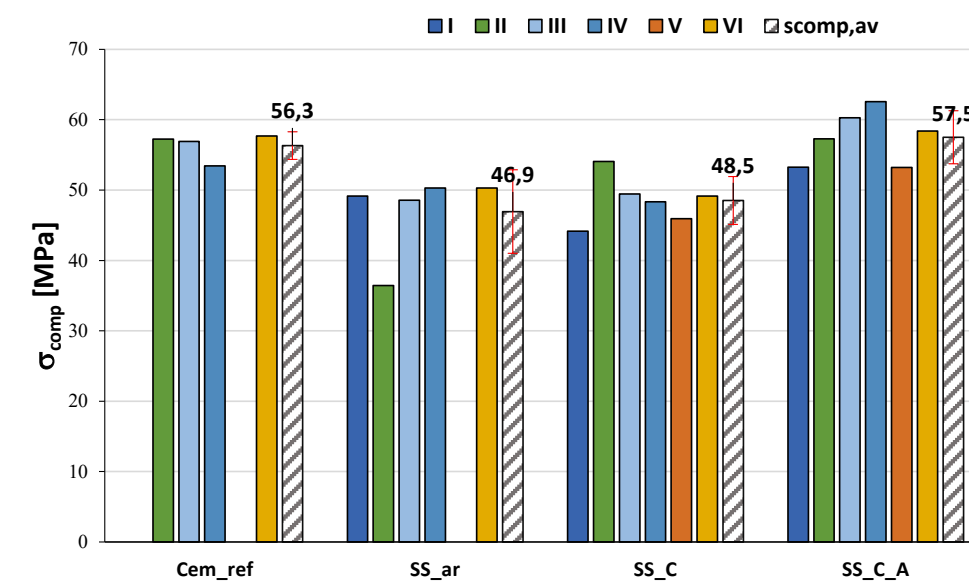


Fig. 38) Resistenza a compressione a 56 giorni

4.4) Risultati ottenuti:

I risultati ottenuti a seguito dell'attività sperimentale hanno confermato il potenziale dell'utilizzo delle scorie di acciaieria come materiale cementizio supplementare, specialmente quando sottoposto a processi di carbonatazione.

I test effettuati sulle polveri e i test meccanici hanno infatti evidenziato come il trattamento di carbonatazione abbia non solo permesso il sequestro di CO₂ all'interno del materiale, trasformando componenti reattive in carbonato di calcio stabile, ma abbia modificato la cinetica di reazione del materiale.

Analizzando da vicino i risultati, è possibile notare come l'analisi XRD abbia evidenziato nel campione non trattato (SS_AR) una forte presenza di silicati di calcio come la larnite, portlandite e composti a base di ferro (Fig.17). Si può invece notare come nei due campioni trattati (SS_C e SS_C_A), a seguito del processo di carbonatazione, i picchi della larnite e della portlandite si siano drasticamente ridotti a favore della comparsa di picchi molto pronunciati di calcite (CaCO₃) (Fig.18/19). I silicati di calcio, infatti, hanno reagito con la CO₂ per formare carbonato di calcio e gel di silice amorfa.

A conferma di ciò, l'analisi TG-DTA ha evidenziato una perdita di massa notevole compresa tra 550°C e 850°C per le polveri SS_C e SS_C_A (Fig.22/23), dimostrando la decomposizione del carbonato di calcio formatosi a seguito di assorbimento permanente della CO₂ (mineralizzazione).

Di seguito viene riportato il contenuto di CaCO₃ presente all'interno dei tre campioni, calcolato per via stechiometrica a partire dalla perdita di peso dovuta alla CO₂, applicando il fattore di conversione 2.274 (fattore di conversione stechiometrico usato in chimica per calcolare la quantità di carbonato di calcio a partire dalla quantità di anidride carbonica che si è liberata). [12]

Per quanto riguarda invece il valore effettivo di CO₂ intrappolata rispetto alla matrice solida calcinata iniziale è stato determinato applicando la seguente formula:

$$\% \text{ CO}_2 \text{ uptake} = (\% \text{ CO}_2 \text{ cont} - \% \text{ CO}_2 \text{ iniz}) / (1 - \% \text{ CO}_2 \text{ cont}) \times 100$$

Campione	Perdita di Massa 550-850°C (Contenuto di CO ₂ %)	Contenuto stimato di CaCO ₃ (%)	CO ₂ uptake
SS_AR	0,8%	1,8%	/
SS_C	17%	38,7%	19,52%
SS_A_C	15,7%	35,7%	17,67%

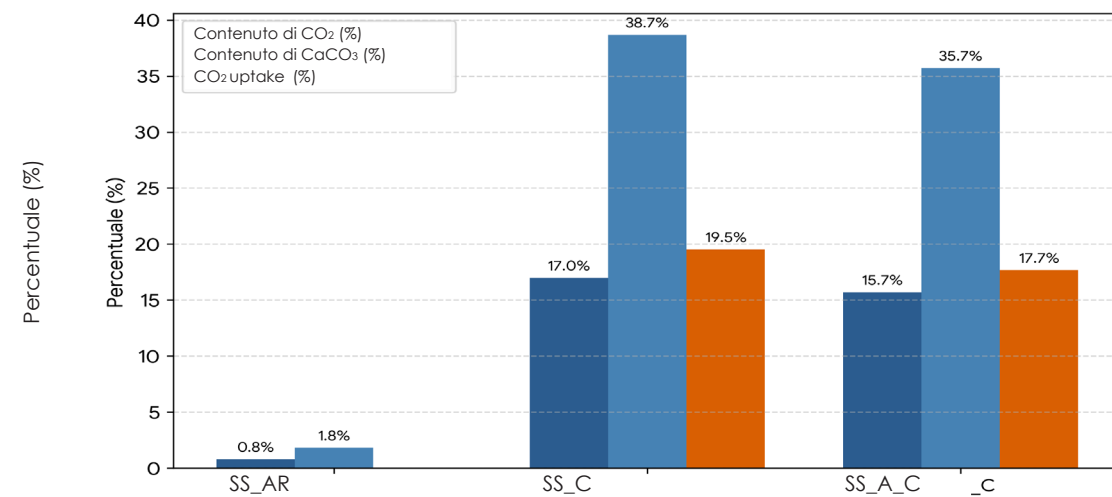


Fig. 39) Confronto dei parametri di cattura di CO₂

I test sulla reattività idraulica (bound water) e pozzolanica (portlandite consumption) hanno dimostrato come il materiale, dopo essere stato carbonatato abbia acquisito una reattività pozzolanica significativamente superiore. Ciò si spiega con la decomposizione dei silicati bicalcici originari che, oltre a formare calcite, generano gel di silice amorfa non rilevabile ai raggi X. Quando questo silicato amorfo viene idratato reagisce con la portlandite presente nella pasta cementizia, consumandola e andando a formare nuovi silicati di calcio idrati (C-S-H).

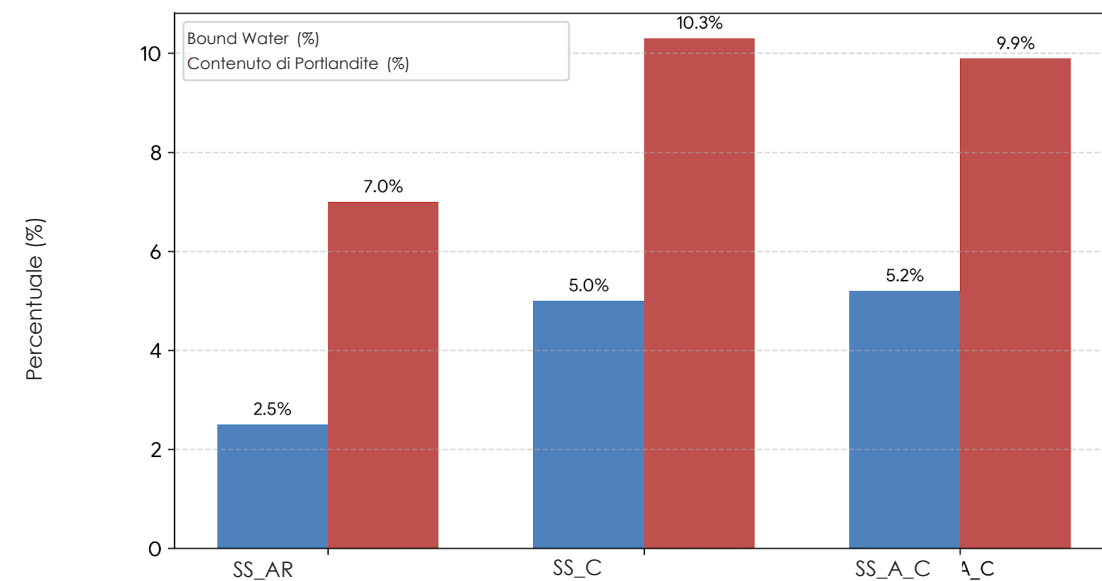


Fig. 40) Confronto tra la quantità di Bound Water e la presenza di Portlandite

Quest'evoluzione da una reattività idraulica (presente nel materiale originario non carbonatato) a una reattività pozzolanica si riflette sui test di resistenza a compressione effettuati sulle paste cementizie a 3,7,28 e 56 giorni. I valori di resistenza del campione SS_C_A mostravano infatti nel brevissimo termine risultati inferiori rispetto alla scoria non trattata (SS_AR). Questo fenomeno indica un ritardo nell'idratazione iniziale ed è un comportamento tipico dei materiali pozzolanici e delle scorie sottoposte a carbonatazione [12]. Un cambiamento di tendenza è ben visibile a partire dai 28 giorni, dove i campioni SS_C_A compensano il ritardo iniziale e superano i valori dei campioni SS_AR.

Il sorpasso definitivo avviene dopo 56 giorni, dove il campione SS_C_A ha raggiunto una resistenza maggiore anche al cemento portland di riferimento (il cui risultato è influenzato da due provini mancanti) e il campione SS_C supera le prestazioni del campione SS_AR.

In conclusione, l'attività sperimentale ha evidenziato come la carbonatazione acquosa diretta delle scorie di acciaieria rappresenti a tutti gli effetti una strategia efficace per la produzione di nuovi SCMs.

Il processo permette di stoccare in modo permanente CO₂ all'interno della scoria configurandosi a tutti gli effetti come una tecnologia CCU *Carbon Capture and Utilisation*. Dall'altro lato trasforma un materiale a bassa reattività in un materiale dalla reattività pozzolanica altamente efficiente.

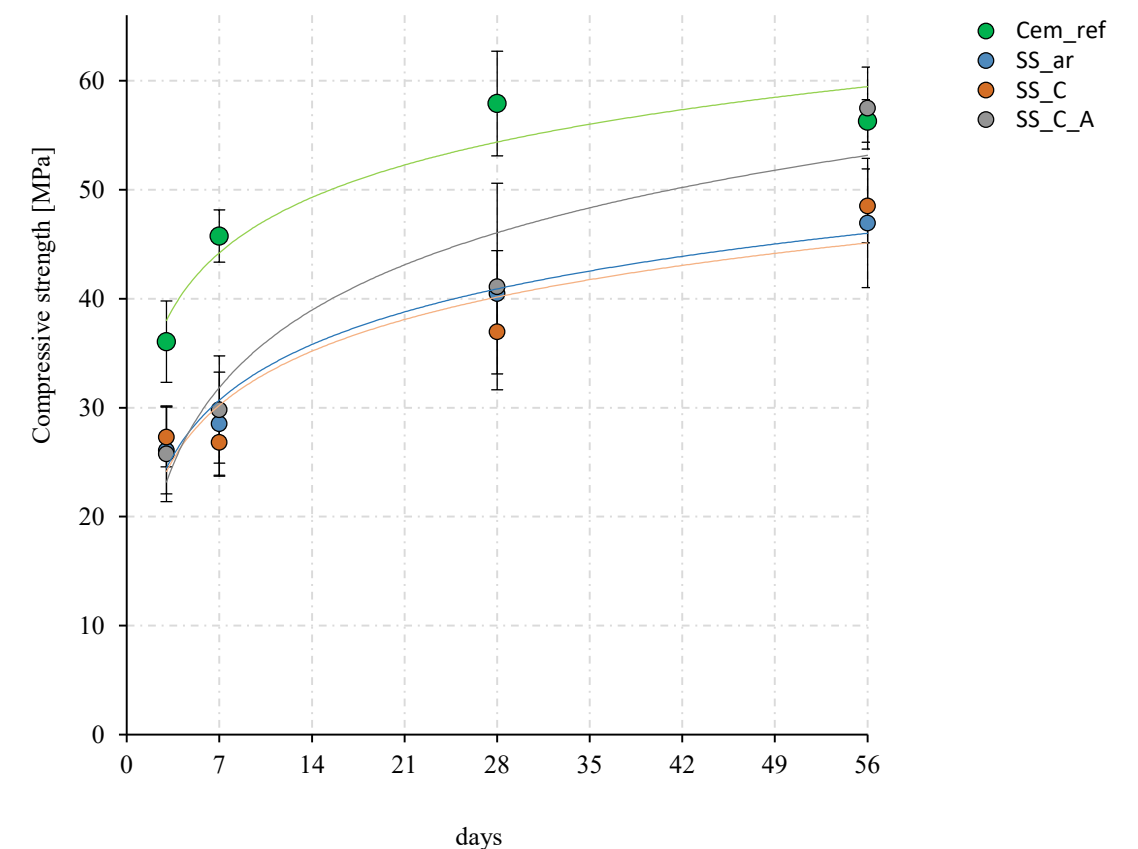


Fig. 41) Comparazione delle resistenze a compressione a 3,7,28 e 56 giorni delle 4 paste cementizie

Applicazioni industriali

Il quinto capitolo si propone di esaminare la traduzione pratica e industriale dei principi teorici e sperimentali analizzati nei capitoli precedenti, offrendo una panoramica dettagliata di come la tecnologia di carbonatazione si stia rapidamente affermando nel mercato globale delle costruzioni.

Il raggiungimento degli ambiziosi obiettivi di neutralità carbonica entro il 2050 impone al settore del cemento e del calcestruzzo un cambio di rotta radicale e in questa cornice di transizione, dove la tecnologia *CCU Carbon Capture and Utilization* è riconosciuta come una delle tecnologie principali per raggiungere gli obiettivi fissati al 2050, la carbonatazione accelerata non rappresenta più solo una frontiera della ricerca accademica ma una realtà industriale in forte crescita.

Molteplici aziende e startup innovative stanno sviluppando processi per ricarbonare scarti industriali e rifiuti da demolizione, dimostrando che l'attività sperimentale condotta in questa tesi trova una collocazione e un'applicazione immediata nel mondo produttivo.

Realtà pionieristiche come "MCI Carbon" hanno infatti industrializzato la carbonatazione minerale accelerata in fase acquosa di scorie di acciaieria operando a bassa pressione e bassa temperatura ricalcando fedelmente gli stessi principi chimico-fisici adottati nell'attività sperimentale descritta nel capitolo 4.

Allo stesso tempo, colossi globali come Heidelberg Materials, attraverso il processo "ReConcrete", e startup come "Neustark" stanno dimostrando la sostenibilità economica e tecnica dello stoccaggio permanente di anidride carbonica all'interno del calcestruzzo demolito. Infine, l'esperienza di CarbiCrete evidenzia come le scorie di acciaieria possano sostituire integralmente il cemento Portland se opportunamente attivate tramite carbonatazione accelerata.

L'analisi di queste applicazioni industriali evidenzia come la valorizzazione e l'attivazione pozzolanica di materiali alternativi come le scorie BOF ed EAF tramite processi di carbonatazione non sia soltanto una soluzione virtuosa dal punto di vista ambientale, ma una necessità commerciale impellente per rispondere alla futura scarsità di SCMs tradizionali, ponendo le basi per un'edilizia realmente circolare e a basse emissioni.

05) Applicazioni industriali

5.1) MCI Carbon

5.2) Heidelberg Materials

5.3) Neustark

5.4) CarbiCrete

5.1) **MCI Carbon**, *Mineral Carbonation International*

MCI Carbon è un'azienda australiana fondata nel 2013 e specializzata nel settore delle *clean technology* e in *Carbon Capture and Utilisation (CCU)*.^[36] Il loro obiettivo è quello di guidare la transizione globale verso le emissioni zero, creando nuovi percorsi economici focalizzati sulla rimozione permanente del carbonio ^[37]. Invece di considerare la CO₂ come un rifiuto dannoso, MCI la tratta come una preziosa risorsa commerciale. In più, a differenza delle tecnologie CCS *Carbon Capture Storage* che stoccano anidride carbonica nel sottosuolo, la tecnologia utilizzata da MCI fa sì che la CO₂ si leghi chimicamente ai minerali, bloccandola permanentemente in forma solida senza alcun rischio di perdite future^[38].

La tecnologia MCI, basata sulla carbonatazione minerale, utilizza un processo di ingegneria chimica a basso costo, bassa pressione e bassa temperatura ^[36]. Dalle emissioni dei gas di scarico delle industrie pesanti viene catturata la CO₂ che viene fatta reagire con fonti alcaline ricche di magnesio e calcio.

Queste fonti si suddividono in due macrocategorie:

Minerali naturali: La roccia di riferimento per il processo di carbonatazione di MCI è la Serpentinite ^[37]. L'azienda ha mappato la "Great Serpentine Belt" nel Nuovo Galles del Sud per individuare le fonti migliori e prive di fibre di amianto, concentrandosi sulle varianti mineralogiche "lizardite" e "antigorite"^[38].

Un altro minerale che è stato testato con successo dall'azienda è l'Olivina la quale, a differenza della Serpentinite, non richiede l'attivazione termica prima della reazione permettendo così un ottimo efficientamento energetico ^[38].

Sottoprodotti e Sarti industriali: Tra i sottoprodotti maggiormente utilizzati dall'azienda australiana vi sono proprio le scorie di acciaieria (stesso sottoprodotto utilizzato nell'attività sperimentale descritta nel capitolo 4). MCI ha testato sia le scorie provenienti dai BOF *Basic Oxygen Furnace* che da forni EAF *Electric Arc Furnace*. Un esempio dell'attuazione di questo processo è lo studio condotto in collaborazione con *BlueScoop Steel* che ha visto l'utilizzo di scorie di acciaieria provenienti dall'impianto di Port Kembla, nel Nuovo Galles del Sud.^[39]

In seguito al processo di carbonatazione di queste materie prime o sottoprodotti nascono nuovi materiali a basse (o negative) emissioni di carbonio destinati al mondo delle costruzioni.

Da questo processo produttivo si ottengono infatti carbonato di magnesio precipitato, carbonato di calcio e silice amorfa^[37]. Questi composti possono poi essere utilizzati per produrre calcestruzzo a basse emissioni, cartongesso ignifugo, blocchi da costruzione, carta, vetro, plastica e vernici^[40].

Processo di Carbonatazione:

Il processo adottato da MCI è un processo di carbonatazione minerale acquosa ^[38].

Nello specifico l'azienda ha sviluppato un innovativo processo a due fasi che opera a bassa pressione e bassa temperatura, parliamo infatti di una pressione sotto i 10 bar e una temperatura sotto i 50°C ^[38]. Questa tecnologia è stata appositamente studiata per superare i limiti dovuti agli alti costi dei metodi precedenti che richiedevano condizioni ben più complesse (150 bar e 155°C) e flussi di CO₂ purissimi ^[38].

Il processo (Fig.42) si articola nei seguenti passaggi:

- **Preparazione:** I minerali o i rifiuti industriali contenenti magnesio e calcio vengono finemente macinati utilizzando mulini ad alta efficienza (HIG mill) che riducono il consumo energetico di circa il 70% rispetto ai metodi tradizionali. Successivamente il materiale viene "attivato termicamente" in appositi forni per aumentarne la reattività chimica. ^[38]

- **Reazione:** le polveri ottenute in seguito alla frantumazione vengono poi mescolate con acqua per formare un nuovo composto ^[38]. Il composto viene poi messo a contatto con la CO₂ all'interno di un reattore continuo a colonna di bolle ("bubble column reactor"). ^[38]

- **Separazione:** il processo di MCI permette una separazione intrinseca dei materiali in uscita, da un lato carbonato di calcio o magnesio, dall'altro silice amorfa. ^[38]

Il processo di carbonatazione utilizzato da MCI Carbon e quello impiegato nell'attività sperimentale descritta nel capitolo 4 condividono lo stesso principio chimico-fisico, ovvero la carbonatazione minerale accelerata in fase acquosa. Obiettivo di entrambi i metodi è quello di catturare l'anidride carbonica facendola reagire in acqua con fonti ricche di calcio e magnesio per trasformare il gas in carbonati solidi stabili e silice amorfa. Entrambi si inseriscono infatti all'interno della medesima strategia, quella del *Carbon Capture Utilisation*, volta non soltanto allo stoccaggio permanentemente di CO₂ ma alla valorizzazione di scarti industriali da utilizzare come sostituti del cemento. Nonostante le numerose analogie vi sono anche differenze importanti dovute al passaggio di scala da un test di laboratorio a un impianto ingegnerizzato su scala industriale. In laboratorio l'insufflaggio di anidride carbonica è stato ottenuto in maniera molto semplificata, la miscela è stata mantenuta in sospensione tramite un piccolo magnete che ruota sul fondo della beuta grazie a una piastra agitante impostata a 750 rpm. La CO₂ è stata poi insufflata tramite il tubo ad un flusso costante per 60 minuti. Nel caso di MCI invece un sofisticato reattore continuo a colonna di bolle riceve in ingresso il composto formato dalla miscela di acqua e polvere e lo mette a contatto con il flusso di CO₂. In questo modo il gas si lega chimicamente al magnesio o al calcio presenti nella miscela, convertendo in modo continuo la CO₂ in carbonati solidi e silice amorfa. L'innovazione di questa strumentazione risiede nel fatto

che riesce a mescolare e far reagire gli elementi in un flusso continuo senza l'aiuto di parti interne in movimento e senza guarnizioni dinamiche. Questo riduce drasticamente i costi di manutenzione e di energia richiesta.[38] Ovviamente anche la natura dell'anidride carbonica che viene insufflata è profondamente diversa. In laboratorio è stata utilizzata anidride carbonica controllata proveniente da una bombola, il processo di MCI è invece pensato per integrarsi con le ciminiere delle acciaierie e dei cementifici, nell'ottica di recuperare i gas di scarico grezzi e a bassa purezza [37]. Un'ultima differenza importante sta nella restituzione del materiale in seguito alla carbonatazione. In laboratorio è stato generato e fatto precipitare in una singola fase, restituendo una polvere mista composta da carbonato, silice e scoria inerte non reagita. La tecnologia adottata da MCI invece è basata proprio su un processo a due fasi che permette la separazione dei composti, da un lato il carbonato di magnesio e dall'altra la silice amorfa. L'ottenimento di un duplice materiale è ideale per la commercializzazione del prodotto[38]. Nel 2024 è diventato operativo l'impianto "Myrtle" di Newcastle (Fig.43), progettato per mineralizzare circa 2500 tonnellate di CO₂ all'anno, trasformandole in circa 10.000 tonnellate di materiali vendibili.

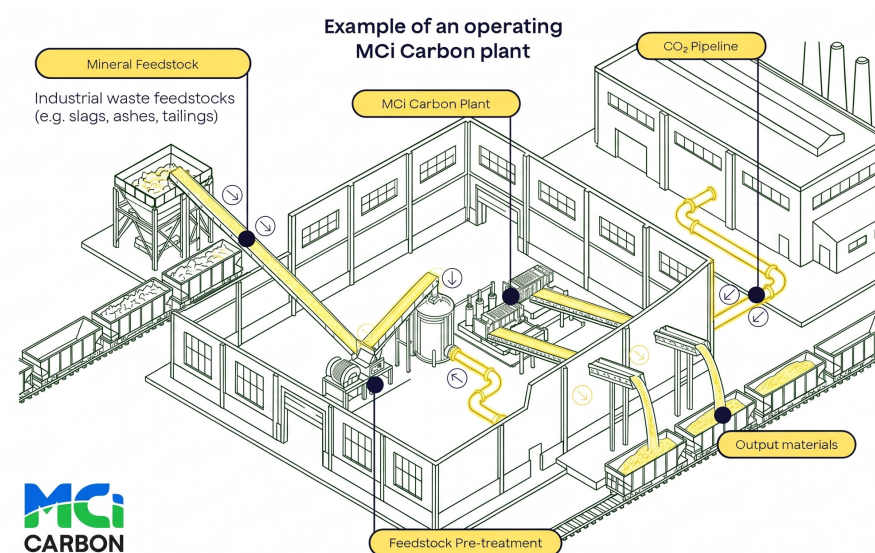


Fig. 42) Processo di preparazione, reazione e separazione di MCI Carbon. Fonte: MCI Carbon



Fig. 43) Impianto Myrtle di Newcastle, Australia. Fonte: MCI Carbon

5.2) Heidelberg Materials e il processo **ReConcrete**

La nuova sfida di Heidelberg Materials, uno dei colossi globali tra i produttori di cemento, è quello di creare una simbiosi tra economia circolare e decarbonizzazione del mondo delle costruzioni attraverso l'implementazione su scala industriale di un processo brevettato chiamato **ReConcrete**. [41][42] Obiettivo del processo è quello di riciclare completamente il calcestruzzo proveniente dalle demolizioni e valorizzarne le componenti: da un lato si recuperano sabbia e ghiaia per poter essere riutilizzate al posto di materie prime vergini, dall'altro si recupera la frazione più fine per trasformarla in una risorsa in grado di assorbire anidride carbonica per produrre cemento a ridotto impatto ambientale. [41]

Come funziona il processo ReConcrete (Fig.44):

- **Frantumazione e separazione:** Un impianto di frantumazione dotato di una tecnologia innovativa (tecnologia FCB Rhodax, fornita dall'azienda Fives) disgrega il calcestruzzo proveniente dalle demolizioni separandolo nei suoi costituenti originali [41] [43]. Questo processo restituisce in prima istanza sabbia e ghiaia di alta qualità che possono sostituire le materie prime vergini nella confezione di nuovo calcestruzzo [41].

- **Estrazione della RCP e Carbonatazione forzata:** A seguito del processo di frantumazione e separazione oltre a sabbia e ghiaia si ottiene anche Pasta di Calcestruzzo Riciclata (RCP). Questa pasta viene esposta ai gas di scarico che rilasciano anidride carbonica provenienti dai forni per la produzione di clinker [41]. La capacità della RCP di agire come pozzo di carbonio fa sì che l'anidride carbonica proveniente dai gas di scarico si leghi chimicamente all'interno del materiale in modo permanente [42].

- **Produzione di Cementi compositi:** In seguito al processo di carbonatazione, la reazione tra RCP e anidride carbonica favorisce la produzione di carbonato di calcio e un gel amorfo di silice-allumina dalle buone proprietà pozzolaniche. Questo rende perfetto il suo impiego come Materiale Cementizio Supplementare (SCM) in grado di sostituire in parte il clinker [42].

Nel luglio 2024 "Heidelberg Materials" ha inaugurato in Polonia, a Katowice, il primo impianto di riciclo per la separazione selettiva dei componenti del calcestruzzo da demolizione. L'impianto è in grado di gestire fino a 100 tonnellate di calcestruzzo ogni ora [41].

Contemporaneamente in un secondo impianto sempre situato in Polonia, a Gòrzdze, è stata avviata la costruzione di un impianto pilota per la carbonatazione forzata. Qui arriva la Pasta di Calcestruzzo Riciclata recuperata dall'impianto di Katowice e viene esposta ai gas di scarico grezzi per la produzione di clinker. Uno degli aspetti più interessanti di questo processo è proprio quello che l'anidride carbonica viene messa a contatto con la RCP così come esce dai tubi di scarico, senza bisogno di essere trattata. Alla fine del processo la Pasta di Calcestruzzo Riciclata si trasforma in cRCP Pasta di

calcestruzzo riciclata e carbonatata, un materiale a bassa impronta carbonica pronto per essere utilizzato come sostituto del clinker nella produzione di cementi compositi [42][44].

Questa tecnologia ha un potenziale molto elevato per la decarbonizzazione del settore del cemento. Il processo permette di ridurre le emissioni di anidride carbonica di circa 900-1.000 Kg per ogni tonnellata di RCP trattata. Questo risultato è dovuto alla combinazione dei due fattori che sono il fulcro del processo:

- **Cattura diretta** (100-150 kg di CO₂): rappresenta la quantità di CO₂ catturata direttamente dai gas di scarico e stoccata permanentemente all'interno del materiale tramite la carbonatazione forzata [42].
- **Emissioni risparmiate** (750-850 kg di CO₂): rappresentano le emissioni risparmiate sostituendo il clinker con il nuovo materiale prodotto, la cRCP, all'interno dei cementi compositi [42].

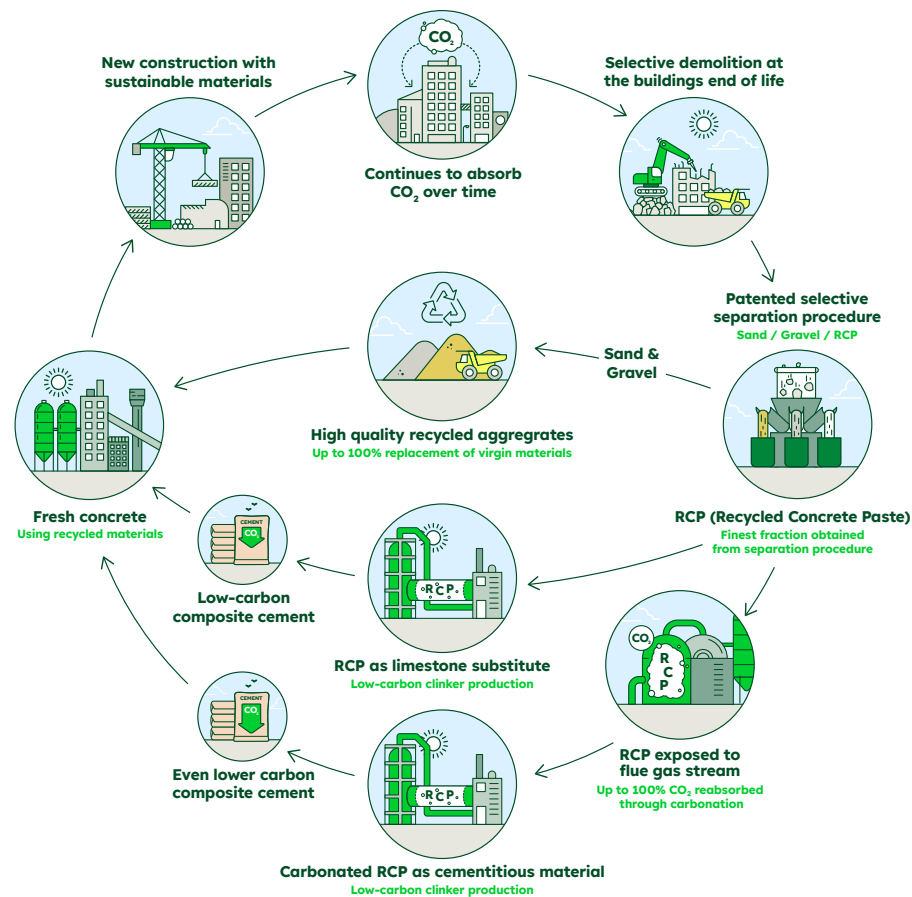


Fig. 44) Transforming demolition material into a raw material source. Fonte: Heidelberg Materials

5.3) Neustark

Neustark è una start-up svizzera che nasce nel 2019 con l'obiettivo di rimuovere l'anidride carbonica dall'atmosfera e portare il settore delle costruzioni a emissioni negative. [45]

L'approccio seguito da Neustark ha come obiettivo quello di trasformare il calcestruzzo proveniente dalle demolizioni, che per quantità rappresenta il volume di rifiuti più grande al mondo, in un pozzo di carbonio [45][46].

Il processo viene interamente gestito dalla società Bernese in tutte le sue fasi: dall'approvvigionamento e il trasporto dell'anidride carbonica, passando per lo stoccaggio permanente della CO₂ all'interno del cls da demolizione per arrivare al rilascio dei certificati *Carbon Removal*. [47]

Le fasi principali del processo sono:

- **Cattura:** Neustark ha stretto collaborazioni con gli impianti di biogas che utilizzano i rifiuti di biomassa (come scarti agricoli, letame o rifiuti alimentari) per la produzione di biogas. Durante questo processo, volto alla produzione di combustibile, il biometano prodotto viene separato dalla CO₂, che a sua volta viene emessa nell'aria. L'obiettivo di Neustark è quello di evitare che l'anidride carbonica torni nell'aria e catturarla direttamente all'uscita dell'impianto di produzione di biogas. [46][47]

- **Trasporto:** La CO₂ catturata viene liquefatta per consentirne il trasporto verso gli impianti di riciclo e valorizzazione dei rifiuti da demolizione. [46]

- **Iniezione:** L'anidride carbonica recuperata viene iniettata nel calcestruzzo demolito e alla fine del processo questo nuovo materiale "carbonatato" verrà utilizzato per produrre nuovo calcestruzzo riciclato.

Per ogni tonnellata di cls da demolizione, la tecnologia adottata da Neustark riesce a stoccare permanentemente circa 10 kg di CO₂. Questo vuol dire che un solo impianto è in grado di immagazzinare l'anidride carbonica che 50 alberi riuscirebbero a immagazzinare in un anno[47]. Va inoltre tenuto conto che l'anidride carbonica catturata dagli impianti di biogas è anidride carbonica biogenica[47], ovvero che fa parte di un ciclo naturale. Infatti, tutto ciò che viene bruciato sotto forma di biomassa ha già assorbito durante il proprio ciclo di vita quella stessa CO₂ che viene poi rilasciata per produrre combustibile. Dunque, se questa stessa CO₂ venisse rilasciata nell'aria il bilancio ambientale sarebbe "neutro" (ovvero la stessa CO₂ che è stata assorbita in passato viene rilasciata per produrre biogas). Neustark invece, catturando quell'anidride carbonica, punta a raggiungere emissioni negative.

Questo permette all'azienda bernese di poter finanziare le proprie tecnologie anche attraverso la vendita di crediti di rimozione del carbonio (*Carbon Removal*) a grandi aziende globali come Microsoft o UBS, le quali acquistano questi crediti per compensare le proprie emissioni. [45][47]

Dopo il lancio del prototipo nel 2020, nel 2022 Neustark ha inaugurato i primi quattro impianti in Svizzera presso partner commerciali che si occupano di

riciclo degli inerti come *Kastli*, *Kibag* e *Jura Materials*. Ad oggi la start-up elvetica conta circa 30 strutture che si occupano di separazione e stoccaggio di anidride carbonica ed è in fase di forte espansione. Può infatti contare su partnership commerciali strategiche con giganti del mondo delle costruzioni come *Holcim* che sta investendo a livello mondiale in questa tecnologia per poterla adottare nei propri stabilimenti. [48]

Inoltre è stato inaugurato il primo impianto in UE, nei pressi di Berlino, in collaborazione con l'azienda *Heim* che riesce a catturare oltre 1000 tonnellate di anidride carbonica all'anno.[47]

L'obiettivo principale dell'azienda è quello di espandersi sempre di più sia in Europa che oltre continente, per arrivare a stoccare in modo permanente 1 milione di tonnellate di CO₂ entro il 2030.[46][47]

Negli ultimi anni, la tecnologia promossa da Neustark è stata protagonista di due interessanti progetti architettonici, entrambi a Berna:

- **Ex deposito tram “Burgernziel” a Berna** (Fig.45): in un'area situata nel quartiere Burgernziel di Berna, dove prima sorgeva un deposito per tram è in fase di realizzazione il progetto “Labe im Burgerenziel”. Si tratta di un progetto di rigenerazione urbana che comprende 101 appartamenti, spazi per uffici, negozi e una scuola [54][55]. Si tratta del primo progetto immobiliare residenziale in Svizzera ad utilizzare calcestruzzo confezionato utilizzando inerti riciclati e carbonatati [56]. L'impresa che sta realizzando il progetto, la “Losinger Marazzi”, ha utilizzato in questo cantiere circa 600 metri cubi di calcestruzzo arricchito di anidride carbonica. [54]

- **Istituto scolastico nel quartiere di Kleefeld a Berna** (Fig.46): in questo cantiere, per la prima volta in Svizzera, il cls arricchito di anidride carbonica confezionato secondo la tecnologia di Neustark è stato impiegato come calcestruzzo strutturale. Il materiale, fornito dall'azienda “Frischbeton Rubigen AG”, è stato utilizzato per la realizzazione del parcheggio per biciclette adiacente l'edificio scolastico e per i muri di contenimento esterno.[57]



Fig. 45) Complesso residenziale ex deposito tram nel quartiere Burgernziel a Berna



Fig. 46) Istituto scolastico nel quartiere Kleefeld a Berna

5.4) Carbi-Crete

CarbiCrete è una startup canadese che ha ideato un calcestruzzo “carbon-negative”, capace di assorbire e rimuovere dall'atmosfera più anidride carbonica di quanta ne venga emessa per produrlo^[49]. La start-up canadese ha eliminato del tutto la necessità di utilizzo del cemento tradizionale, realizzando un “cemento senza cemento” basandosi su due elementi chiave:

- **Scorie di acciaio (Steel Slag):** il cemento viene sostituito al 100% con le scorie di acciaio, sottoprodotto dell'industria metallurgica (lo stesso sottoprodotto utilizzato nell'attività sperimentale descritta nel capitolo 4). ^{[49][50]}

- **Carbonatazione accelerata:** Il materiale viene lasciato stagionare all'interno di speciali camere di assorbimento in cui viene iniettata anidride carbonica. ^{[49][50]}

Attraverso la carbonatazione accelerata, la CO₂ iniettata reagisce chimicamente con i silicati presenti nelle scorie di acciaio e si trasforma in carbonato^[51]. Questi carbonati agiscono come un vero e proprio “legante” che unisce le particelle, conferendo al materiale la sua resistenza ^[51]. In questo modo l'anidride carbonica si lega permanentemente al materiale, rimanendo intrappolata senza alcuna possibilità di rilascio, neanche in seguito a una demolizione futura dell'edificio^[49].

Tramite questo processo vengono realizzati prodotti prefabbricati (Fig.47) in calcestruzzo come blocchi in muratura (Fig.48), pavimentazioni da esterno (Fig.49) e muri di contenimento ^[49]. Per ogni tonnellata di calcestruzzo prodotto, si riescono ad abbattere circa 150 kg di CO₂ ^[52], mentre per ogni blocco in cls realizzato si evitano 2 kg di emissioni di CO₂ ^[49]. Se trasferiamo questa tecnologia su scala industriale in un tipico impianto che realizza blocchi in muratura, si riuscirebbero ad abbattere 20.000 tonnellate di CO₂ all'anno, risparmiando 4.400 metri cubi d'acqua ed evitando il conferimento in discarica di 33.000 tonnellate di rifiuti ^[53].

CarbiCrete non vende direttamente i prodotti sopra citati ma concede in licenza la sua tecnologia ai produttori. Ad oggi la start-up canadese può contare su una solida rete di partner e finanziamenti:

- **NGen:** La startup ha ricevuto un grande supporto da Ngen, un'organizzazione senza scopo di lucro guidata dall'industria che gestisce il Cluster per la manifattura avanzata del Canada, che ha finanziato un progetto da 7,7 milioni di dollari. ^[52]

- **Patio Dummond:** Proprio grazie ai fondi di NGen, il passaggio alla scala industriale e commerciale è avvenuto nello stabilimento di Patio Dummond (Quebec), dando vita ai primissimi blocchi di calcestruzzo carbon-negative. ^[52]

- Aziende leader dell'edilizia mondiale come **Saint Gobain** hanno stretto una

collaborazione con CarbiCrete ma anche **Lafarge** (che si occupa di macinare le scorie di acciaio per prepararle al processo) e **Canal Block**. ^[49]



Fig. 47) Gamma di prodotti realizzati tramite tecnologia CarbiCrete



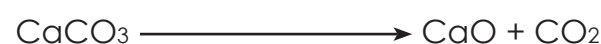
Fig. 48) Isobloc ZERO, blocco isolante



Fig. 49) CarbiCrete Grid Pavers, pavimentazione da esterno

Conclusioni

Il settore del cemento è responsabile di circa il 5% delle emissioni totali nazionali in Italia, delle quali il 60-70% derivano dall'intrinseco ed inevitabile processo chimico di calcinazione (o decarbonatazione del calcare) necessario per la produzione del clinker^[15]:



Per raggiungere la neutralità carbonica entro il 2050, tra le strategie più efficaci ed immediate, c'è la sostituzione del clinker con materiali cementizi supplementari (*SCMs Supplementary Cementitious Materials*)^[19].

Tuttavia il settore sta affrontando una crisi di approvvigionamento, destinata ad intensificarsi nei prossimi anni, di quelli che vengono definiti SCMs tradizionali come la loppa d'altoforno e le ceneri volanti (oggi ampiamente utilizzati). Infatti, in seguito alla transizione siderurgica ed energetica in atto, il consumo di ceneri volanti in Europa è destinato a crollare dai circa 3 milioni di tonnellate attuali ad un milione circa entro il 2050 e condivide lo stesso destino il consumo della loppa d'altoforno destinato a diminuire dagli attuali 13 milioni di tonnellate circa ad un massimo di 4 milioni di tonnellate entro il 2050^[19].

In questo quadro, segnato da una futura diminuzione degli SCMs tradizionali e da uno sforzo obbligato a reperire nuovi sottoprodotti, si inserisce il presente lavoro di tesi. Obiettivo principale della ricerca è stato lo studio di trattamenti di carbonatazione accelerata in fase acquosa volti a valorizzare scorie di acciaieria (nello specifico scoria di acciaieria macinata *Ground Granulated Basic Oxygen Furnace Steel Slag*, meglio nota come *BOF slag*). Il trattamento sopra citato si prefissava una duplice finalità:

- **Sequestrare** in modo permanente l'**anidride carbonica** all'interno del materiale (inserendosi pienamente all'interno di una delle tecnologie principali che il settore del cemento si è prefissato di adottare per raggiungere la neutralità carbonica entro il 2050, ovvero la tecnologia *CCU Carbon Capture and Utilization*).
- Migliorare la **reattività pozzolanica** delle scorie macinate per poterle utilizzare come materiale cementizio supplementare in parziale sostituzione del Clinker.

La metodologia sperimentale ha previsto prima di tutto la preparazione e il confronto di quattro polveri differenti:

- **Cem_Ref**: Cemento Portland 100% (CEM I 52.5 N), utilizzato come riferimento
- **SS_AR**: Scoria di Acciaieria, così come fornitaci dall'impianto
- **SS_C**: Scoria sottoposta a carbonatazione acquosa tramite insufflaggio di anidride carbonica
- **SS_C_A**: Scoria sottoposta a carbonatazione acquosa diretta, non in acqua ma in soluzione acida.

Il processo di carbonatazione è stato condotto a temperatura e pressione ambientali con un rapporto liquido/solido pari a 5 e un flusso di CO₂ di 250 l/h per 60 minuti, seguito da centrifugazione a 3800 rpm ed essiccazione a 60°C. Le polveri sono state poi caratterizzate tramite diffrattometria a raggi X (XRD), analisi termogravimetrica (TG-DTA) per quantificare l'assorbimento di CO₂ ed infine test di Bound Water (BW) e Portlandite Consumption (PC) per valutarne la reattività idraulica e pozzolanica.

In conclusione sono state confezionate paste cementizie con ognuna delle quattro polveri prodotte, la prima (CEM_Ref) è stata realizzata con 100% Cemento Portland, alle restanti tre invece (SS_AR, SS_C, SS_C_A) è stata applicata una sostituzione al cemento portland pari al 20%. Su ogni pasta cementizia sono state poi effettuate prove di resistenza a flessione e compressione a 3,7,28 e 56 giorni.

I risultati principali hanno evidenziato:

- **Efficacia del processo di mineralizzazione**: L'analisi XRD ha mostrato che la carbonatazione trasforma i silicati di calcio e l'idrossido di calcio della scoria in carbonato di calcio stabile (CaCO₃) e gel di silice amorfa. La quantificazione della CO₂ sequestrata, tramite TG-DTA, ha confermato una perdita di massa nell'intervallo 550°C-850°C pari al 17% per la polvere "SS_C" e al 15,7% per la polvere "SS_C_A" certificando l'avvenuta cattura permanente di anidride carbonica all'interno del materiale.

- **Evoluzione da reattività idraulica a pozzolanica e svolta prestazionale a lungo termine**: Le analisi diffrattometriche (XRD) e i test calorimetrici hanno dimostrato che il trattamento di carbonatazione acquosa spegne la debole idraulicità latente del materiale originale. Tuttavia, la mineralizzazione converte queste fasi in calcite e in un gel di silice amorfa altamente instabile. Questo gel silico-alluminoso, reagendo chimicamente con la portlandite (Ca(OH)₂) liberata dall'idratazione del cemento, sviluppa una reattività pozzolanica tardiva, favorendo la precipitazione di nuovi silicati di calcio idrati (C-S-H secondari) che densificano la matrice cementizia. Questo cambiamento chimico-mineralogico si riflette sulle prestazioni meccaniche. Infatti nei primi giorni di idratazione (3 e 7 giorni) le paste cementizie confezionate con il 20% di sostituzione di scoria trattata hanno mostrato resistenze inferiori rispetto alla scoria non trattata, confermando un ritardo iniziale tipico dei materiali pozzolanici. Il punto di svolta si è registrato a 56 giorni quando la pasta cementizia contenente la polvere "SS_C_A" ha subito un'impennata prestazionale in termini di resistenze, raggiungendo i 57,5 MPa. Questo valore ha dimostrato l'efficacia del trattamento nel generare un SCM dall'alta efficienza prestazionale.

La metodologia affrontata in questo lavoro di tesi può rappresentare un importante tassello di avanzamento verso la decarbonizzazione dell'industria del cemento.

Mentre la maggior parte degli studi si concentra sulla stagionatura accelerata in camere di CO₂ di elementi in calcestruzzo già gettati (processo che

deve necessariamente imbattersi in alti costi di investimento per le camere di stagionatura e in un limite di applicabilità circoscritto ad elementi prefabbricati)^[17], questo lavoro di tesi si è focalizzato sulla carbonatazione della polvere prima della miscelazione. In ambito industriale questa differenza non è di poco conto in quanto permette di creare un materiale cementizio supplementare sfuso facilmente integrabile negli impianti di betonaggio già esistenti. Proprio per questo motivo realtà industriali come la “MCi Carbon” citata nel capitolo 5, stanno investendo in questo tipo di carbonatazione.

Ad oggi le prospettive future di questa tecnologia si muovono lungo tre direttrici principali:

- **Scalabilità e integrazione industriale:** il trattamento di carbonatazione testato durante l'attività sperimentale opera in condizioni di temperatura e pressione ambientali, rappresentando un vantaggio considerevole in termini di contenimento dei consumi energetici e costi operativi rispetto ai processi industriali ad alta pressione. Infatti, come discusso nel capitolo 5, è proprio su queste tematiche che aziende come l'australiana “MCi Carbon” stanno lavorando. Garantire contenuti consumi energetici e bassi costi operativi sarà fondamentale per assicurare un futuro prossimo a questa tipologia di processo.

- **Normativa:** con la piena operatività del CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism) e il progressivo taglio delle quote ETS gratuite, ridurre le emissioni e adottare tecniche di cattura dell'anidride carbonica diventerà imperativo per le aziende. Inoltre, monetizzando la CO₂ stoccata attraverso la generazione di crediti di carbonio, i processi di cattura di anidride carbonica potrebbero diventare economicamente profittevoli per le aziende.

- **Standardizzazione:** per consentire l'effettiva immissione sul mercato di cementi contenenti scorie di acciaieria carbonatate o nuovi SCMs, nel prossimo futuro sarà fondamentale una forte attenzione sulla valutazione della durabilità a lungo termine dei calcestruzzi che utilizzano questi tipi di cemento. Necessaria sarà dunque una continua ricerca su questi materiali che dovrà essere sinergicamente affiancata da una normativa in continua evoluzione che si adatti passo dopo passo alla ricerca scientifica.

In sintesi, l'attività sperimentale svolta in questo lavoro di tesi ha dimostrato che la carbonatazione acquosa è in grado di trasformare un rifiuto industriale a bassa reattività, come le scorie di acciaieria, in una risorsa legante dalle alte prestazioni meccaniche e caratterizzata da un basso impatto carbonico rispondendo concretamente alla duplice sfida dell'economia circolare e della decarbonizzazione della filiera del cemento.

Riferimenti

- [1] C. S. T. R. Collepari Mario, Il nuovo calcestruzzo, Villorba, IT: Tintoretto, 2009.
- [2] C. T. E. C. Association, «Position paper,» 2024.
- [3] I.-I. E. Agency. [Online]. Available: <https://www.iea.org/>. [Consultato il giorno 8 12 2025].
- [4] C.-. T. E. C. Association, «CEMBEREAU, Key facts and figures,» 2025.
- [5] P. S. J. S. Ruben Snellings, «Future and emerging supplementary cementitious materials,» Cement and Concrete Research.
- [6] V. M. E. M. Karen L.Scrivener, «Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry,» Cement and Concrete Research, vol. 114, pp. 2-26, 2018.
- [7] GCCA, «Granulated blastfurnace slag (GBFS),» [Online]. Available: <https://gccassociation.org/cement-and-concrete-innovation/clinker-substitutes/granulated-blastfurnace-slag-gbfs/>. [Consultato il giorno 19 Marzo 2026].
- [8] P. A. M. P. D. T. F. Will Arnold, «The efficient use of GGBS in reducing global emissions,» September 2023.
- [9] K. Scrivener, Interviewee, Realistic Strategies for Decarbonising Construction. [Intervista]. 10 Luglio 2025.
- [10] T. S. M. S. R. G. R. G. Yuvaraj Dhandapani, «Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3),» Cement and Concrete Research, 20 Marzo 2018.
- [11] S. O. W. D. X.-Y. W. Run-Sheng Lin, «Strengthening the performance of limestone-calcined clay cement (LC3) using nano silica,» Construction and Building Materials, 6 Maggio 2022.
- [12] A. L. A. G. S. A. Piemonti, «Exploring the Potential for Steel Slags Valorisation in an Industrial Symbiosis Perspective at Meso-scale Level,» 2022.
- [13] G. F. P. H. D. G. J. M. T. P. P. Francesca Bonfante, «Aequos carbonation of EAF steel slag to produce supplementary Cementitious Material: Effects on mineral composition, hydration reactivity and mechanical properties,» Construction and Building Materials.
- [14] O. K. O. H. O. T. B. Osman Gencel, «Steel slag and its applications in cement and concrete technology: A review,» Construction and Building Materials, 2021.
- [15] R. Cucitore, «Cemento e calcestruzzo: il contributo alla sostenibilità e alla decarbonizzazione delle costruzioni,» Milano, 2023.
- [16] B. S. Maziar Kazemian, «Carbon sequestration and storage in concrete: A state-of-the-art review of compositions, methods, and developments,» Journal of CO2 Utilization, 2023.
- [17] A. B. H. E. Brahim Jouamai, «Accelerated carbonation curing of cementitious materials: a systematic review of performance, limitations, and industrial feasibility,» Innovative Infrastructure Solutions, vol. 11, n. 154, 2026.
- [18] M. U. Pangilinan, «Towards Sustainable Concrete: Life Cycle Assessment of Carbon-Incorporated Mix Design Concrete,» International Journal of Multidisciplinary and Innovative Research, vol. 03, pp. 36-42, 2026.
- [19] P. F. P. I. G. B. A. M. M. G. L. N. M. P. N. Z. Massimo Paris, «La strategia di decarbonizzazione del settore del cemento,» 2020.
- [20] F. L. Stocchetti, «Closing the CBAM gap: Including indirect emissions for EU competitiveness and global decarbonisation,» 2025.
- [21] E. Commission, «Carbon Border Adjustment Mechanism: Question and Answers,» Brussels, 2021.
- [22] P. E. e. C. d. Europea, Regolamento (UE) 2023/956 del parlamento europeo e del consiglio, 16/05/2023.
- [23] I.-I. S. p. I. P. e. I. R. Ambientale, «Rapporto Rifiuti Speciali_Edizione 2024,» 2024.
- [24] D. Mazzocco, «Cemento, le strategie circolari dell'industria italiana- i criteri ambientali minimi spingono i produttori italiani a realizzare cementi più circolari e a basse emissioni,» Materiale Rinnovabile, 2023.
- [25] R. S. M. A. N. A. Xuerun Li, «Reactivity tests for Supplementary Cementitious Materials,» Materials and Structures, October 2018.
- [26] T. Iori, Il Cemento Armato in Italia, Roma, IT: CSR, 2001.
- [27] A. M. M. Tullia Iori, 150 anni di storia del cemento in Italia, Roma: Gangemi Editore, 2011.
- [28] M. L. Andrea Campioli, Tecniche e Architettura, Novara: De Agostini Scuola, 2021.
- [29] «Heidelberg materials,» [Online]. Available: <https://www.heidelbergmaterials.it/it>.
- [30] «GCCA-Global Cement and Concrete Association,» [Online]. Available: <https://gccassociation.org/our-story-cement-and-concrete/>.
- [31] «FederBeton-Confindustria,» [Online]. Available: <https://blog.federbeton.it/economia-circolare-il-contributo-dellindustria-del-cemento/>.
- [32] A. F. L. K. Scrivener, «Financial Attractiveness of LC3,» Losanna, 2019.
- [33] Sean Monkman, Yixin Shao: «Carbonation-curing of slag-cement concrete for binding CO2 and improving performance».
- [34] Duo Zhang, Yixin Shao: «Early age carbonation curing for precast reinforced concretes».
- [35] Junwen Chen, Lei Tang, Jin Yi, Kexiong Wu, Jiwang Zhang: «Progress Analysis and Prospect on the Influence of Early-Age Carbonation Curing on Properties of Cement-Based Materials».
- [36] UN Global Compact Network Australia. MCi Carbon. Consultato il 18 giugno 2026. <https://unglobalcompact.org.au/our-members/mci-carbon/>
- [37] MCi Carbon. "Home". <https://mcicarbon.com/>. Consultato il 18 giugno 2026.
- [38] Mineral Carbonation International. MCI Project Final Report: Turning Captured CO2 into Valuable Products for Industry. Maggio 2019.
- [39] MCi Carbon Leadership Team. Opportunities in the Circular Economy: Submission to the Productivity Commission. 1 Nov. 2024.
- [40] MECLA. "MCi Carbon Article". Materials and Embodied Carbon Leaders Alliance, <https://mecla.org.au/mci-carbon-article/>. Consultato il 25 giugno 2026.
- [41] Heidelberg Materials. "Closing the loop: Heidelberg Materials inaugurates first-of-its-kind recycling plant for selective separation of demolition concrete in Poland". Heidelberg Materials, 25 Luglio 2024.
- [42] Heidelberg Materials. "Advancing circularity: Heidelberg Materials launches first industrial scale facility for enforced carbonation in Poland". Heidelberg Materials, 25 Luglio 2024.

berg Materials, 9 Luglio 2025.

[43] Fives. "Heidelberg Materials' first industrial concrete recycling facility in Poland uses award-winning FCB Rhodax® technology". Fives, 21 Ottobre 2024

[44] Pospíšková, Adéla. "Enforced Carbonation Reactor Commissioned by Heidelberg Materials". CARBON4MINERALS, 24 Luglio, <https://www.carbon4minerals.eu/news-events/enforced-carbonation-reactor-commissioned-by-heidelberg-materials>. Consultato il 20 giugno 2026.

[45] Dari, Andrea. "In Svizzera un impianto che immagazzina permanentemente CO₂ nel calcestruzzo di scarto". Ingenio, 10 Ottobre 2023, <https://www.ingenio-web.it/articoli/in-svizzera-un-impianto-che-immagazzina-permanentemente-co2-nel-calcestruzzo-di-scarto/>. Consultato il 24 giugno 2026.

[46] Società Svizzera Impresari-Costruttori. "Calcestruzzo con obiettivo climatico". Società Svizzera Impresari-Costruttori, <https://baumeister.swiss/it/calcestruzzo-con-obiettivo-climatico/>. Consultato il 24 giugno 2026.

[47] SERV. "neustark immagazzina CO₂ in modo permanente nel calcestruzzo da demolizione". SERV, 5 Marzo 2025, <https://www.serv-ch.com/it/servizi/erfolgsgeschichten/neustark-immagazzina-co2-in-modo-permanente-nel-calcestruzzo-da-demolizione/>. Consultato il 24 giugno 2026.

[48] Holcim Svizzera. "Cattura, utilizzo e stoccaggio della CO₂". Holcim Svizzera, <https://www.holcim.ch/it/node/263>. Consultato il 26 giugno 2026.

[49] 3Degrees. "Carbicrete Carbon Utilization Project - Carbon Credits". 3Degrees, <https://3degreesinc.com/projects/carbicrete-carbon-utilization-project-carbon-credits/>. Consultato il 24 giugno 2026.

[50] Carbicrete. "Low Carbon Solution". Carbicrete, <https://carbicrete.com/blog-low-carbon-solution/>. Consultato il 24 giugno 2026.

[51] Quaghebeur, M., Nielsen, P., Horckmans, L., & Van Mechelen, D. (2015). Accelerated carbonation of steel slag compacts: Development of high-strength construction materials. *Frontiers in Energy Research*, 3, Articolo 52.

[52] NGen. "Carbicrete". NGen, <https://www.ngen.ca/case-studies/carbicrete>. Consultato il 24 giugno 2026.

[53] Carbicrete. "Home". Carbicrete, <https://carbicrete.com/>. Consultato il 24 giugno 2026.

[54] Batimag. "Du béton écolo neustark pour un complexe immobilier de pointe Tramdepot Burgernziel à Berne". Batimag, <https://www.batimag.ch/technique/du-beton-ecolo-neustark-pour-un-complexe-immobilier-de-pointe-tramdepot-burgernziel-a-berne-3883>. Consultato il 24 giugno 2026.

[55] Losinger Marazzi. "Tramdepot Burgernziel: Losinger Marazzi baut mit dem klimafreundlichsten Beton der Schweiz". Losinger Marazzi, 23 Luglio 2021.

[56] Losinger Marazzi. "Le béton le plus écologique de Suisse". Losinger Marazzi, 23 luglio 2021, <https://losinger-marazzi.ch/fr/blog/detail/244/le-beton-le-plus-ecologique-de-suisse/>. Consultato il 24 giugno 2026.

[57] Schnetzer Puskas Ingenieure. "Ersatzneubauten Volksschule Klee-feld". Schnetzer Puskas Ingenieure, <https://www.schnetzerpuskas.com/de/projekte/3498-ersatzneubauten-volksschule-kleefeld>. Consultato il 24 giugno 2026.